

УДК 594.124-116:[546+577.17]

## СТЕРОИДНЫЕ ГОРМОНЫ, СЕЛЕН И ЦИНК В БИОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ГОНАДЫ — ПОЛОВЫЕ ПРОДУКТЫ — ЛИЧИНКИ МИДИИ *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAM.

© 2021 г. Л. Л. Капанова, В. И. Рябушко, М. В. Нехорошев, С. В. Капанов

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,  
Севастополь, Российская Федерация  
E-mail: [lar\\_sa1980@mail.ru](mailto:lar_sa1980@mail.ru)

Поступила в редакцию 20.07.2020; после доработки 27.08.2020;  
принята к публикации 29.09.2021; опубликована онлайн 30.11.2021.

Оценка взаимодействия морских хозяйств с окружающей средой при промышленном выращивании мидии *Mytilus galloprovincialis* весьма актуальна. В системе мидийная ферма — среда важную роль играют биотические потоки веществ через гонады, половые продукты (сперма и яйцеклетки) и личинки. Поскольку гонады выполняют ключевую роль в размножении мидий, представляется интересным рассмотреть элементы баланса веществ, принимающих непосредственное участие в этом процессе. Тестостерон, эстрадиол, жирные кислоты, а также селен и цинк, потребляемые моллюсками вместе с пищей и водой, прежде всего необходимы им для осуществления нереста, а также для роста и развития. Часть потребляемых веществ задействуется организмом мидий в процессе метаболизма, а часть экскретируется в водную среду вместе с половыми продуктами. Цель данной статьи — провести количественное определение элементов баланса стероидных гормонов, жирных кислот и биогенных микроэлементов в гонадах, половых продуктах и личинках моллюсков, играющих важную роль в метаболизме их организма. Концентрацию общего тестостерона и эстрадиола в гонадах и половых продуктах определяли методом твёрдофазного иммуноферментного анализа. Содержание микроэлементов измеряли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Относительный состав жирных кислот гонад, половых продуктов и личинок мидий определяли методом хромато-масс-спектрометрии. Концентрации селена и цинка в гонадах и половых продуктах мидий зависят от стадии репродуктивного цикла. В женских гонадах содержание селена и цинка выше, чем в мужских. Наибольшая концентрация селена обнаружена в яйцеклетках —  $(14,7 \pm 2,9) \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ . Концентрация в сперматозоидах —  $(14,4 \pm 1,8) \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ . Содержание цинка в гонадах до нереста выше, чем в половых продуктах. В гонадах самцов до нереста концентрация цинка составляет  $(27,5 \pm 3,7) \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ , в сперматозоидах —  $(19,3 \pm 6,4) \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ . В гонадах самок —  $(53,6 \pm 10,9) \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ , в яйцеклетках —  $(49,3 \pm 8,2) \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ . В весенний период значения степени усвоения селена и цинка из пищи ( $q$ ) в гонадах мидий колеблются в диапазоне от 0,1 до 0,6. Значения предельного коэффициента пищевого накопления селена и цинка ( $K_p$ ) составляют от 0,6 до 1,4. Мидии служат источником полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), которые, вероятно, используются другими гидробионтами. Со спермой выделяется до 56,2 % ПНЖК, с яйцеклетками — 48,1 %, тогда как в личинках этот показатель не превышает 10,2 %. Полученные данные свидетельствуют о том, что моллюски потребляют гормоны, жирные кислоты, селен и цинк из пищи и воды для поддержания жизненных процессов: из ПНЖК в организме образуются простагландины, из тестостерона — сложные эфиры тестостерона. Селен и цинк, соединяясь с белками, играют ключевую роль в размножении и формировании оболочек личинок.

**Ключевые слова:** мидия *Mytilus galloprovincialis*, половые продукты, личинки, селен, цинк, тестостерон, эстрадиол, жирные кислоты, Чёрное море

Тестостерон, эстрадиол, полиненасыщенные жирные кислоты (далее — ПНЖК) и микроэлементы обладают высокой биологической активностью (Капранова et al., 2019 ; Nikonova et al., 2017). Селен обеспечивает защиту организма от активных форм кислорода, а также жизнеспособность сперматозоидов. Его отсутствие во время сперматогенеза влияет на качество спермы и плодовитость животных (Ahsan et al., 2014). Известно, что цинк используется для поддержки функций репродуктивной системы, а также для активации ферментов, синтеза ДНК и белков в организме. Поэтому особую актуальность приобретают исследования, позволяющие оценить содержание стероидов, жирных кислот (далее — ЖК), селена и цинка в репродуктивной системе гидробионтов.

Морские фермы по выращиванию моллюсков являются значимым компонентом прибрежных морских экосистем. Во взаимоотношении мидийная ферма — среда важную роль играют биотические потоки вещества и энергии в системе вещество → гонады → половые продукты (сперма и яйцеклетки) → личинки. Оценить потоки вещества через эти компоненты позволяет балансовый подход. Наиболее подробно изучен энергетический баланс поселений черноморских мидий в естественных популяциях (Финенко и др., 1990). Для морских ферм подобный подход реализован при исследовании потока каротиноидов в системе среда — мидия (*Mytilus galloprovincialis*) — биоотложения мидий на основе определения качественного и количественного состава каротиноидов в различных органах *M. galloprovincialis* в зависимости от сезона года и оценки усвояемости пигментов моллюском (Поспелова и Нехорошев, 2003). В результате изучения трансформации отдельных каротиноидов в процессе метаболизма и количественной оценки их ассимиляции установлено, сколько животное потребляет и выделяет каротиноидов.

Между тем данные по элементам баланса иных биологически активных веществ, выполняющих важную роль в метаболизме организма, таких как стероидные гормоны, ЖК и биогенные микроэлементы, в гонадах и половых продуктах моллюсков весьма ограничены, что обусловило цель выполнения этой работы.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследований выбран двустворчатый моллюск *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819, выращиваемый в морских хозяйствах г. Севастополя: в Ласпинской бухте (44°24.56'N, 33°42.19'E) и бухте Карантинной (44.61°N, 33.49°E). Мидий добывали водолазным способом с глубины 2–3 м в апреле — мае 2020 г. Температурный диапазон воды — +7...+21 °C. Всего обработано около 600 экз. одноразмерных мидий с длиной раковины 50–60 мм. Перед началом эксперимента моллюсков 3–6 ч выдерживали в профильтрованной морской воде для очистки пищеварительных трактов. Половую принадлежность и стадию репродуктивного цикла мидий определяли на мазках гонад с помощью микроскопа, основываясь на анализе гистологических препаратов гонад (Пиркова и др., 2019). Сперматозоиды и яйцеклетки мидий получали по методике, ранее описанной Л. Л. Никоновой с соавторами (Nikonova et al., 2017). Сухую массу половых продуктов определяли после высушивания 1 мл взвеси гомогенизированных сперматозоидов и яйцеклеток при +105 °C. При этой же температуре определяли сухую массу гонад.

Концентрацию общего тестостерона и эстрадиола в гонадах и половых продуктах определяли методом твёрдофазного иммуноферментного анализа (Nikonova et al., 2017). Содержание микроэлементов измеряли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с применением многоэлементного стандарта IV-ICPMS-71A Inorganic Ventures (США). Относительный состав жирных кислот определяли по методике, разработанной Л. Л. Капрановой с соавторами (Капранова et al., 2019). Получение личинок и определение их ЖК-состава проводили по методике, указанной в публикации (Капранова и др., 2020). Измерения содержания микроэлементов и ЖК-состава выполнены в ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведём анализ содержания стероидных гормонов, селена и цинка в гонадах мидии на разных стадиях зрелости, а также в яйцеклетках и сперматозоидах (табл. 1).

**Таблица 1.** Концентрация стероидных гормонов, селена и цинка в гонадах, яйцеклетках и сперматозоидах мидии *M. galloprovincialis*

**Table 1.** Concentration of steroid hormones, selenium, and zinc in gonads, eggs, and sperm of the mussel *M. galloprovincialis*

Стадия зрелости гонад (половые продукты)	Концентрация стероидных гормонов, $\times 10^{-6}$ мкг·г <sup>-1</sup> <sub>сух</sub>				Концентрация микроэлементов, мкг·г <sup>-1</sup> <sub>сух</sub>			
	Общий тестостерон		Эстрадиол		Селен		Цинк	
	♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀
1	7757,8 ± 2315,2	2154,5 ± 643,1	90,1 ± 28,6	512,5 ± 33,1	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
2	2453,1 ± 1409,8	592,1 ± 112,8	120,9 ± 27,8	623,0 ± 40,8	12,0 ± 1,5	н. д.	33,3 ± 6,6	н. д.
3	781,1 ± 60,1	210,3 ± 30,0	104,7 ± 30,1	747,0 ± 30,0	8,7 ± 0,7	10,8 ± 1,7	24,6 ± 3,6	35,6 ± 11,8
4	979,0 ± 83,9	352,0 ± 192,0	119,5 ± 26,3	636,7 ± 22,0	9,3 ± 1,9	9,0 ± 2,5	16,3 ± 1,9	45,5 ± 31,2
5А	975,1 ± 464,3	859,0 ± 116,1	132,2 ± 34,3	529,0 ± 26,1	10,7 ± 2,8	9,7 ± 3,3	22,9 ± 5,7	56,3 ± 17,9
5В	692,2 ± 115,4	144,2 ± 14,4	110,6 ± 20,4	501,8 ± 34,4	8,8 ± 1,4	13,7 ± 1,9	27,5 ± 3,7	53,6 ± 10,9
Я	н. о.	10,1 ± 4,8	н. о.	539,5 ± 122,8	н. о.	14,7 ± 2,9	н. о.	49,3 ± 8,2
С	14 284,8 ± 259,2	н. о.	194,4 ± 59,2	н. о.	14,4 ± 1,8	н. о.	19,3 ± 6,4	н. о.

**Примечание:** н. о. — не обнаружено; н. д. — нет данных; 5А и 5В — гонады до и после нереста; Я — яйцеклетки; С — сперматозоиды.

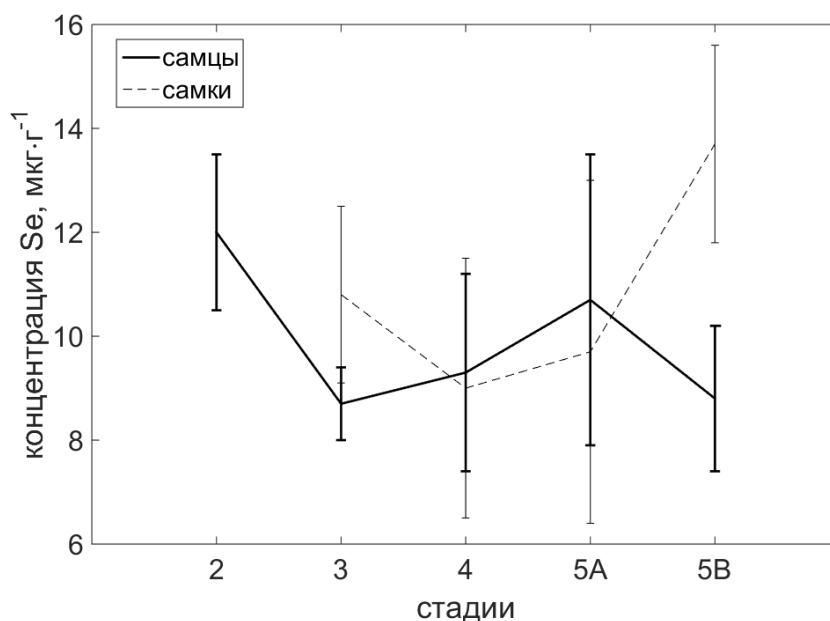
**Note:** н. о. denotes not found; н. д., no data; 5A and 5B, gonads before and after spawning; Я, eggs; С, sperm.

Концентрации селена в гонадах и половых продуктах самок и самцов мидий (табл. 1, рис. 1) изменяются аналогично концентрациям стероидных гормонов (Nikonova et al., 2017) и зависят от репродуктивного цикла моллюсков (Goede et al., 1993). Концентрация селена в гонадах самцов положительно коррелирует с концентрацией тестостерона. Коэффициент корреляции по Пирсону составил 0,89 ( $p = 0,045$ ).

Максимальная концентрация селена отмечена в половых продуктах: в яйцеклетках —  $(14,7 \pm 2,9)$  мкг·г<sup>-1</sup><sub>сух</sub>, в сперматозоидах —  $(14,4 \pm 1,8)$  мкг·г<sup>-1</sup><sub>сух</sub>. Снижение концентрации селена в гонадах мидии после нереста объясняется началом фазы посленерестовой перестройки.

Селен является эссенциальным элементом для мидий. Приоритетный путь его поступления в организм — алиментарный с кормом (90 %) и водой (10 %) (Ahsan et al., 2014). Весь этот селен находится в двухвалентной органической форме, причём в животных продуктах преобладает селеноцистеин (SeCys), а в растительных — селенометионин (SeMet). Селен поступает в организм животных в основном в виде селенометионина. Транспорт и депонирование селена осуществляются селенопротеинами, содержащими селеноцистеин. Селенопротеин представляет собой селеноцистеинсодержащий белок с окислительно-восстановительной активностью, участвующий в антиоксидантной реакции. Se является составной частью селенопротеинов, которые защищают

сперматозоиды в процессе их созревания от окислительного повреждения, а также служат структурными компонентами зрелых сперматозоидов. Таким образом, селен и селенопротеины обеспечивают жизнеспособность сперматозоидов и защиту от активных форм кислорода. Исследования селенопротеинов на генном уровне показали, что их отсутствие во время сперматогенеза приводит к аномальному развитию сперматозоидов, что, в свою очередь, влияет на качество спермы, фертильность и либидо (Ahsan et al., 2014).



**Рис. 1.** Концентрация селена в гонадах мидии *M. galloprovincialis*: 5A — гонады перед нерестом, 5B — гонады после нереста

**Fig. 1.** Concentration of selenium in gonads of the mussel *M. galloprovincialis*: 5A and 5B denote gonads before and after spawning

При изучении селенопротеина из жемчужной мидии *Cristaria plicata* удалось экспрессировать матричную рибонуклеиновую кислоту (мРНК) из тканей мантии, жабр, гемоцитов, мышц и гепатопанкреаса. Самой высокой была экспрессия из тканей гепатопанкреаса (Hu et al., 2014 ; Kopp et al., 2018).

Цинк используется организмом животных для активации ферментов, синтеза ДНК и белков и для поддержки функций репродуктивной системы. Он также действует как антиоксидант, подавляя способность соединений свободных радикалов повреждать клеточную ткань и генетический материал. Экскреция Zn из мягких тканей мидий проходит, по-видимому, через ооциты при нересте (Lowe & Moore, 1979). У *M. galloprovincialis*, собранных в некоторых портах Западного Алжира, концентрация цинка изменялась в диапазоне от 87,1 до 731,5  $\text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}_{\text{сух}}$  (Hadj et al., 2012). В сперматозоидах мидии из Чёрного моря содержание Zn составило  $(30,4 \pm 6,4) \text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ , в яйцеклетках —  $(115,4 \pm 24,2) \text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}_{\text{сух}}$  (Караванцева и др., 2012). В настоящей работе отмечено более высокое содержание цинка в гонадах до нереста, чем в половых продуктах, что говорит о частичной экскреции Zn вместе со спермой и яйцеклетками. В гонадах самцов до нереста концентрация Zn составляла  $(27,5 \pm 3,7) \text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ , а в сперматозоидах —  $(19,3 \pm 6,4) \text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ . Содержание в гонадах самок —  $(53,6 \pm 10,9) \text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ , в яйцеклетках —  $(49,3 \pm 8,2) \text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ .

Цинк, полученный из пищи, связан в основном с мягкими тканями мидий, а Zn из морской воды — с раковинами (Fisher et al., 1996). Изменение массы мягких тканей и раковин у мидий *M. galloprovincialis* может быть обусловлено различными уровнями накопления цинка.

Например, вес раковин мидий, загрязнённых Zn, увеличился после 51-дневного периода очистки (Soto et al., 2000).

В наших исследованиях отмечена отрицательная корреляция между концентрацией цинка и концентрацией эстрадиола в гонадах самок на разных стадиях полового созревания. Коэффициент корреляции по Пирсону составил  $-0,98$  ( $p = 0,024$ ). Как известно, эстрадиол признан важным регулятором как потребления пищи, так и расхода энергии (Mauvais-Jarvis et al., 2013). Эстрадиол регулирует массу тела, способствуя её увеличению (Mauvais-Jarvis et al., 2013).

В работе (Soto et al., 2000) показано, что Zn накапливался в мягких тканях пропорционально его концентрации в морской воде, в то время как концентрация в гемолимфе была немного выше, чем в окружающей среде. Поглощение Zn происходило через кишечник, мантию и жабры. Zn транспортировался из жабр и кишечника ( $t_{1/2} \approx 8$  дней) через гемолимфу либо в виде комплекса с высокой молекулярной массой, либо в виде гранулированных амёбоцитов в почку. Большая часть Zn в организме присутствовала в зернистых амёбоцитах, которые находились во всех тканях организма, или в кишечнике и почках. Например, у мидии *Mytilus edulis* почка является органом, в котором хранятся многие микроэлементы; она содержит 30 % (около  $1000 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ ) от общего количества цинка в организме. При этом цинк локализуется в виде нерастворимых гранул в мембранно-элиминированных везикулах, занимающих около 20 % объёма клеток. Экскреция Zn происходит путём дефекации, экзоцитоза почечных гранул в мочу и диапедеза амёбоцитов (George & Pirie, 1980).

Для оценки степени усвоения гидробионтами селена и цинка из пищи применяли математическую модель, где в качестве базового использовали уравнение Г. Г. Поликарпова и В. Н. Егорова (1986):

$$\frac{dC_r}{dt} = R(C_p q - C_r q_p) - C_r p, \quad (1)$$

где  $C_r$  и  $C_p$  — концентрация химического элемента в гидробионте и его пище,  $\text{мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ ;

$R$  — относительный рацион,  $\text{сут}^{-1}$ ;

$q$  — степень усвоения элемента из пищи;

$q_p$  — степень усвоения пищи для роста ( $= K_2$ );

$p$  — показатель скорости обмена элемента гидробионтом,  $\text{сут}^{-1}$ .

Уравнение, предложенное Г. Г. Поликарповым и В. Н. Егоровым (1986) для описания кинетики обмена микроэлементов в гидробионтах при пищевом поглощении элементов, может быть применено для мидий, если измерено содержание микроэлементов в гонадах моллюсков и в половых продуктах с учётом известного коэффициента  $K_2$ . Степень усвоения микроэлементов из пищи оценивают коэффициентом  $q$ , который может являться важной характеристикой, определяющей потребность морских организмов в рассматриваемых нами микроэлементах.

Преобразованием данного уравнения (Поспелова и др., 2018a) была получена формула для оценки степени усвоения селена (цинка)  $q$  по данным измерений концентраций элементов в тканях мидии и половых продуктах:

$$q = \frac{C_r q_p}{C_r q_p + C_p (1 - q_p)}, \quad (2)$$

где  $q$  — степень усвоения элемента из пищи;

$C_r$  — концентрация химического элемента в гонадах,  $\text{мкг} \cdot \text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ ;

$C_p$  — его концентрация в сперматозоидах или яйцеклетках мидии,  $\text{мкг} \cdot \text{г}^{-1}_{\text{сух}}$ ;

$q_p$  — степень усвоения пищи для роста ( $= K_2$ ).

Следует отметить, что при данном подходе не учитывались доли селена и цинка, которые могли бы экскретироваться вместе с биоотложениями.

Ранее исследование кинетики содержания микроэлементов в *M. galloprovincialis* показало, что концентрация и обмен химического микроэлемента в мидиях может рассматриваться как интегральный процесс во всём онтогенезе (Поликарпов и Егоров, 1986). В первом приближении для оценки усвояемости элементов моллюсками можно использовать среднегодовое значение степени усвоения пищи на рост  $q_{\text{п}}$  ( $K_2$ ) (Финенко и др., 1990). Для границ диапазона  $q_{\text{п}}$  — 0,14 и 0,42 — определим значения  $q$  для селена (цинка) в весенний период (табл. 2).

**Таблица 2.** Значение степени усвоения селена и цинка из пищи ( $q$ ) мидией *Mytilus galloprovincialis*  
**Table 2.** Assimilation of selenium and zinc from food ( $q$ ) by the mussel *Mytilus galloprovincialis*

Стадия зрелости гонад	q селена ( $q_{\text{п}} = 0,14$ )		q цинка ( $q_{\text{п}} = 0,14$ )	
	♂	♀	♂	♀
1	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
2	$0,12 \pm 0,03$	н. д.	$0,22 \pm 0,08$	н. д.
3	$0,09 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,07$	$0,17 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$
4	$0,10 \pm 0,04$	$0,09 \pm 0,07$	$0,12 \pm 0,05$	$0,13 \pm 0,02$
5A	$0,11 \pm 0,06$	$0,10 \pm 0,08$	$0,16 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$
5B	$0,09 \pm 0,04$	$0,13 \pm 0,08$	$0,19 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,01$
Стадия зрелости гонад	q селена ( $q_{\text{п}} = 0,42$ )		q цинка ( $q_{\text{п}} = 0,42$ )	
	♂	♀	♂	♀
1	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
2	$0,38 \pm 0,09$	н. д.	$0,55 \pm 0,07$	н. д.
3	$0,30 \pm 0,06$	$0,35 \pm 0,02$	$0,48 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,03$
4	$0,32 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,01$	$0,38 \pm 0,08$	$0,40 \pm 0,06$
5A	$0,35 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,02$	$0,46 \pm 0,02$	$0,45 \pm 0,03$
5B	$0,31 \pm 0,11$	$0,40 \pm 0,20$	$0,51 \pm 0,07$	$0,44 \pm 0,20$

**Примечание:** н. д. — нет данных; 5A и 5B — гонады до и после нереста.

**Note:** н. д. denotes no data; 5A and 5B, gonads before and after spawning.

В гонадах мидий в весенний период среднегодовые значения  $q$  для селена колеблются в диапазоне от 0,1 до 0,4, что ниже степени усвоения пищи на рост ( $K_2$ ). Известно: если эффективность усвоения микроэлементов из пищи ниже степени усвоения пищи на рост, передача вещества по трофической цепи будет идти с понижением темпа загрязнения последующего звена (Поликарпов и Егоров, 1986). Среднегодовые значения  $q$  для цинка — от 0,1 до 0,6.

При известных значениях степени усвоения элемента из пищи ( $q$ ) и степени усвоения пищи на рост ( $q_{\text{п}}$ ) можно определить предельный коэффициент пищевого накопления микроэлемента по уравнению  $K_{\text{п}} = Rq / (Rq_{\text{п}} + p)$  (Поликарпов и Егоров, 1986), откуда (при  $p = 0$ , где  $p$  — показатель скорости обмена элемента гидробионтом, сут<sup>-1</sup>)  $K_{\text{п}} = q / q_{\text{п}}$ , то есть  $K_{\text{п}}$  равен отношению степени усвоения селена или цинка из пищи к степени усвоения пищи на рост (табл. 3).

Значения  $K_{\text{п}}$  для селена и цинка в гонадах мидий в весенний период составляют от 0,64 до 1,36, что выше степени усвоения и вовлечения в биохимические процессы ( $q$ ) рассматриваемых микроэлементов. Этот факт показывает, что селен и цинк экскретируются вместе с половыми продуктами в окружающую среду.

Поскольку мы использовали мидий, выращиваемых в морских хозяйствах, рассчитаем, сколько стероидных гормонов, селена и цинка содержится в половых продуктах одной тонны моллюсков [это 71124 экз. размером 51–60 мм (Холодов и др., 2017)] (табл. 4).

**Таблица 3.** Максимальный коэффициент пищевого накопления микроэлемента ( $K_{\text{п}}$ ) мидией *M. galloprovincialis***Table 3.** Maximum coefficient of food accumulation of trace element ( $K_{\text{п}}$ ) by the mussel *M. galloprovincialis*

Стадия зрелости гонад	$K_{\text{п}}$ селена ( $q_{\text{п}} = 0,14$ )		$K_{\text{п}}$ цинка ( $q_{\text{п}} = 0,14$ )	
	♂	♀	♂	♀
1	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
2	$0,86 \pm 0,21$	н. д.	$1,57 \pm 0,59$	н. д.
3	$0,64 \pm 0,23$	$0,79 \pm 0,52$	$1,21 \pm 0,07$	$0,79 \pm 0,07$
4	$0,71 \pm 0,31$	$0,64 \pm 0,53$	$0,86 \pm 0,35$	$0,93 \pm 0,12$
5A	$0,79 \pm 0,42$	$0,71 \pm 0,62$	$1,14 \pm 0,07$	$1,14 \pm 0,07$
5B	$0,64 \pm 0,74$	$0,93 \pm 0,61$	$1,36 \pm 0,07$	$1,07 \pm 0,07$
Стадия зрелости гонад	$K_{\text{п}}$ селена ( $q_{\text{п}} = 0,42$ )		$K_{\text{п}}$ цинка ( $q_{\text{п}} = 0,42$ )	
	♂	♀	♂	♀
1	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
2	$0,90 \pm 0,20$	н. д.	$1,31 \pm 0,2$	н. д.
3	$0,71 \pm 0,12$	$0,83 \pm 0,05$	$1,14 \pm 0,02$	$0,81 \pm 0,07$
4	$0,76 \pm 0,02$	$0,74 \pm 0,02$	$0,90 \pm 0,23$	$0,95 \pm 0,14$
5A	$0,83 \pm 0,05$	$0,76 \pm 0,05$	$1,10 \pm 0,05$	$1,07 \pm 0,07$
5B	$0,74 \pm 0,23$	$0,95 \pm 0,54$	$1,21 \pm 0,22$	$1,05 \pm 0,54$

**Примечание:** н. д. — нет данных; 5A и 5B — гонады до и после нереста.

**Note:** н. д. denotes no data; 5A and 5B, gonads before and after spawning.

**Таблица 4.** Содержание тестостерона, эстрадиола, селена и цинка в одной тонне мидии *M. galloprovincialis***Table 4.** Concentration of testosterone, estradiol, selenium, and zinc per one ton of the mussel *M. galloprovincialis*

Стадии зрелости гонад (половые продукты)	Содержание стероидных гормонов, $\times 10^{-6} \text{ г} \cdot \text{г}^{-1} \text{ сух}$				Содержание микроэлементов, $\text{г} \cdot \text{г}^{-1} \text{ сух}$			
	Общий тестостерон		Эстрадиол		Se		Zn	
	♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀
5A	$975,1 \pm 464,3$	$859,0 \pm 116,1$	$132,2 \pm 34,3$	$529,0 \pm 26,1$	$10,7 \pm 2,8$	$9,7 \pm 3,3$	$22,9 \pm 5,7$	$56,3 \pm 17,9$
5B	$692,2 \pm 115,4$	$144,2 \pm 14,4$	$110,6 \pm 20,4$	$501,8 \pm 34,4$	$8,8 \pm 1,4$	$13,7 \pm 1,9$	$27,5 \pm 3,7$	$53,6 \pm 10,9$
Я	н. о.	$10,1 \pm 4,8$	н. о.	$539,5 \pm 122,8$	н. о.	$14,7 \pm 2,9$	н. о.	$49,3 \pm 8,2$
С	$14\,284,8 \pm 259,2$	н. о.	$194,4 \pm 59,2$	н. о.	$14,4 \pm 1,8$	н. о.	$19,3 \pm 6,4$	н. о.

**Примечание:** н. о. — не обнаружено; 5A и 5B — гонады до и после нереста; Я — яйцеклетки; С — сперматозоиды.

**Note:** н. о. denotes not found; 5A and 5B, gonads before and after spawning; Я, eggs; С, sperm.

Согласно данным табл. 4 и литературным сведениям (Капанова, 2020 ; Scott, 2018), стероиды и микроэлементы экскретируются моллюсками в водную среду вместе с половыми продуктами. В весенний период во время массового нереста в половые продукты полностью переходят тестостерон, а также эстрадиол и селен. Цинк экскретируется частично, что связано, скорее всего, с порционным нерестом мидий. Массовый нерест мидий в Чёрном море повторяется два раза в год — весной и осенью. Максимальное количество нерестящихся мидий зарегистрировано

в середине апреля. Осенний массовый нерест начинается в сентябре — октябре и продолжается в ноябре — декабре (Холодов и др., 2017). Пик нереста мидий в юго-восточной части крымского побережья Чёрного моря отмечен в декабре — январе; менее значительный зарегистрирован в мае — июне. Таким образом, сезонная средняя продолжительность массового нереста достигает четырёх месяцев в год.

В работе А. В. Пирковой с соавторами (Пиркова и др., 2019) указаны динамика созревания гонад и соотношение полов мидий в зависимости от времени года. Максимальное число самцов нерестится в июле, соотношение самок и самцов в выборке (%) составляет 25,0 : 75,0.

Элементы баланса ЖК у мидии *M. galloprovincialis* можно представить в условной системе гонады — половые продукты — трохофоры (табл. 5).

**Таблица 5.** Содержание жирных кислот (% от общих липидов) в гонадах, половых продуктах и трохофорах мидии *M. galloprovincialis*

**Table 5.** Fatty acid content (% of total lipids) in gonads, reproductive products, and trochophores of the mussel *M. galloprovincialis*

Стадии зрелости гонад (половые продукты)	НЖК			МНЖК			ПНЖК		
	♂	♀	Личинки	♂	♀	Личинки	♂	♀	Личинки
1	100	100	58,2	н. о.	н. о.	31,6	н. о.	н. о.	10,2
2	48,2	100		15,8	н. о.		36,0	н. о.	
3	35,1	100		11,3	н. о.		53,6	н. о.	
4	42,5	81,1		35,9	3,7		21,6	15,2	
5	100	44,4		н. о.	22,1		н. о.	33,5	
Я	н. о.	46,7		н. о.	5,2		н. о.	48,1	
С	34,0	н. о.		9,8	н. о.		56,2	н. о.	

**Примечание:** н. о. — не обнаружено; Я — яйцеклетки; С — сперматозоиды.

**Note:** н. о. denotes not found; Я, eggs; С, sperm.

Изменение ЖК-профиля в гонадах и половых продуктах мидий в зависимости от стадии полового созревания уже обсуждалось в работе (Капранова и др., 2020). Содержание НЖК в трохофорах мидий примерно равно суммарному содержанию НЖК в яйцеклетках и сперматозоидах (Капранова и др., 2020) (табл. 5). Такую зависимость можно объяснить тем, что до закладки органов и тканей трохофоры мидий находятся на пассивном питании; видимо, НЖК выполняют преимущественно защитную функцию, формируя оболочки клеточных мембран (Фокина и др., 2010). Кроме того, на начальных стадиях полового созревания ЖК, вероятно, участвуют в этерификации стероидных гормонов, так как в этот процесс вовлечены преимущественно НЖК С16 и С18 (Scott, 2018).

Содержание МНЖК как в женских, так и в мужских половых продуктах мидий практически в два раза меньше, чем в гонадах. Этот факт показывает, что и насыщенные, и ненасыщенные ЖК поступают в организм мидий вместе с пищей и водой, а затем используются в процессах, поддерживающих их жизнедеятельность (Поспелова и др., 2018b ; Urban et al., 2002). Аналогично содержанию МНЖК, содержание ПНЖК в личинках на порядок меньше, чем суммарное содержание ПНЖК в половых продуктах самцов и самок, так как большая часть ЖК поступает в ткани мидий из микроводорослей и накапливается на протяжении жизненного цикла. ПНЖК необходимы для адаптации к условиям окружающей среды (температура, солёность и другие факторы) (Фокина и др., 2010 ; Urban et al., 2002). У моллюсков ПНЖК, вероятно, также являются предшественниками простагландинов (Rowley et al., 2005). Суммарное содержание простагландинов в моллюсках невысокое (Tadasi & Hiroshi, 1976); тем не менее простагландины и родственные



им эйкозаноиды, являясь кислородсодержащими метаболитами ПНЖК C20, оказывают физиологическое воздействие на нерест у двустворчатых моллюсков (Stanley-Samuelson, 1994). Избыточное количество ПНЖК, возможно, выделяется в водную среду, а затем потребляется другими гидробионтами.

**Заключение.** Полученные данные свидетельствуют о том, что мидии, скорее всего, не способны синтезировать тестостерон, эстрадиол и жирные кислоты. Моллюски потребляют селен, цинк, половые стероиды и жирные кислоты из пищи и воды для поддержания жизненных функций. В процессе биохимических превращений из ПНЖК в организме мидий образуются простагландины, из тестостерона — сложные эфиры тестостерона. Селен и цинк выполняют ключевую роль в размножении моллюсков. Концентрация Se в гонадах самцов положительно коррелирует с концентрацией тестостерона. Цинк влияет на массу гонад мидий. Концентрация Zn в гонадах самок отрицательно коррелирует с концентрацией эстрадиола. На примере селена и цинка в весенний период рассчитаны значения степени усвоения этих элементов гонадами мидий из пищи ( $q$ ) и предельный коэффициент пищевого накопления данных микроэлементов ( $K_p$ ). Значения  $q$  для рассматриваемых микроэлементов ниже степени усвоения пищи на рост ( $K_2$ ), что указывает на активное взаимодействие мидий с окружающей средой. Избыточное количество свободных форм тестостерона, эстрадиола, жирных кислот, селена и цинка экскретируется с половыми продуктами с целью поддержания баланса между свободными и связанными формами этих веществ. Вместе с половыми продуктами передаются необходимые количества стероидов и микроэлементов образующимся личинкам, которые находятся первые несколько суток на эндогенном питании. Одна тонна мидий во время нереста способна выделять в окружающую среду вместе со спермой до  $14,28 \cdot 10^{-3}$  мг тестостерона,  $0,19 \cdot 10^{-3}$  мг эстрадиола, 14,4 г цинка и 19,3 г селена. С яйцеклетками одной тонны мидий экскретируется  $0,54 \cdot 10^{-3}$  мг эстрадиола, 14,7 г селена и 49,3 г цинка. Мидии служат источником ПНЖК, которые, вероятно, используются другими гидробионтами. Со спермой выделяется до 56,2 % ПНЖК, с яйцеклетками — 48,1 %, тогда как в личинках этот показатель не превышает 10,2 %.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по темам «Фундаментальные исследования популяционной биологии морских животных, их морфологического и генетического разнообразия» (№ 121040500247-0) и «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ 121030300149-0).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Капранова Л. Л. Экскреция тестостерона и эстрадиола культивируемой мидией *Mytilus galloprovincialis* Lam. (Чёрное море) // *Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского — природного заповедника РАН*. 2020. Вып. 2 (14). С. 56–66. [Kapránova L. L. Testosterone and estradiol excretion by cultivated mussels *Mytilus galloprovincialis* Lam. (Black Sea). *Trudy Karadagskoi nauchnoi stantsii im. T. I. Vyazemskogo – prirodnogo zapovednika RAN*, 2020, iss. 2 (14), pp. 56–66. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.14.06>
2. Капранова Л. Л., Малахова Л. В., Нехорошев М. В., Лобко В. В., Рябушко В. И. Состав жирных кислот в трохофорах мидий *Mytilus galloprovincialis*, выращенных в условиях загрязнённости полихлорбифенилами // *Морской биологический журнал*. 2020. Т. 5, № 2. С. 38–49. [Kapránova L. L., Malakhova L. V., Nekhoroshev M. V., Lobko V. V., Ryabushko V. I. Fatty acid composition in trochophores of mussel *Mytilus galloprovincialis* grown under contamination with polychlorinated biphenyls. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 38–49. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2020.05.2.04>
3. Караванцева Н. В., Пospelова Н. В., Бобко Н. И., Нехорошев М. В. Методика отбора половых продуктов мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. // *Системы контроля окружающей среды*.

2012. № 17. С. 184–187. [Karavantseva N. V., Pospelova N. V., Bobko N. I., Nekhoroshev M. V. Technique for collection of mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. gametes. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, 2012, no. 17, pp. 184–187. (in Russ.)]
4. 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 // *Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2019. Т. 5 (71), № 1. С. 92–106. [Pirkova A. V., Ladygina L. V., Shchurov S. V. Formation of settlements of mussel *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) on collectors of the Laspi Bay farm depending on environmental factors. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya*, 2019, vol. 5 (71), no. 1, pp. 92–106. (in Russ.)]
  5. Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н. *Морская динамическая радиохемокология*. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 176 с. [Polikarpov G. G., Egorov V. N. *Morskaya dinamicheskaya radio-khemoekologiya*. Moscow : Energoatomizdat, 1986, 176 p. (in Russ.)]
  6. Пospelova Н. В., Егоров В. Н., Челябинина Н. С., Нехорошев М. В. Содержание меди в органах и тканях *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 и поток её седиментационного депонирования в донные осадки в хозяйствах черноморской аквакультуры // *Морской биологический журнал*. 2018а. Т. 3, № 4. С. 64–75. [Pospelova N. V., Egorov V. N., Chelyadina N. S., Nekhoroshev M. V. The copper content in the organs and tissues of *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 and the flow of its sedimentary deposition into bottom sediments in the farms of the Black Sea aquaculture. *Morskoj biologicheskij zhurnal*, 2018a, vol. 3, no. 4, pp. 64–75. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.4.07>
  7. Пospelova Н. В., Нехорошев М. В. Содержание каротиноидов в системе «взвешенное вещество – мидия (*Mytilus galloprovincialis* Lmk.) – биоотложения мидий» // *Экология моря*. 2003. Вып. 64. С. 62–66. [Pospelova N. V., Nekhoroshev M. V. Balance researches of carotenoids in system “suspended substance – mussel (*Mytilus galloprovincialis* Lmk.) – biodeposits of mussels”. *Ekologiya morya*, 2003, iss. 64, pp. 62–66. (in Russ.)]
  8. Пospelova Н. В., Трощенко О. А., Субботин А. А. Изменчивость кормовой базы двустворчатых моллюсков в двухлетнем цикле выращивания на мидийно-устричной ферме (Чёрное море, Голубой залив) // *Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2018b. Т. 4 (70), № 4. С. 148–164. [Pospelova N. V., Troshchenko O. A., Subbotin A. A. Variability of food reserve of bivalves in the two-year growing cycle on the mussel-oyster farm (Black Sea, Blue Gulf). *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya*, 2018b, vol. 4 (70), no. 4, pp. 148–164. (in Russ.)]
  9. Финенко Г. А., Романова З. А., Аболмасова Г. И. Экологическая энергетика черноморских мидий // *Биоэнергетика гидробионтов* / под ред. Г. Е. Шульмана, Г. А. Финенко. Киев : Наукова думка, 1990. С. 32–72. [Finenko G. A., Romanova Z. A., Abolmasova G. I. *Ekologicheskaya energetika chernomorskikh midii*. In: *Bioenergetika gidrobiontov* / G. E. Shulman, G. A. Finenko (Eds). Kiev : Naukova dumka, 1990, pp. 32–72. (in Russ.)]
  10. Фокина Н. Н., Нефедова З. А., Немова Н. Н. *Липидный состав мидий *Mytilus edulis* L. Белого моря. Влияние некоторых факторов среды обитания*. Петрозаводск : Изд-во КарНЦ РАН, 2010. 243 с. [Fokina N. N., Nefedova Z. A., Nemova N. N. *Lipidnyi sostav midii *Mytilus edulis* L. Belogo morya. Vliyanie nekotorykh faktorov sredy obitaniya*. Petrozavodsk : Izd-vo KarNTs RAN, 2010, 243 p. (in Russ.)]
  11. Холодов В. И., Пиркова А. В., Ладыгина Л. В. *Выращивание мидий и устриц в Чёрном море*. Воронеж : Изд-во ООО «Издат-Принт», 2017. 508 с. [Kholodov V. I., Pirkova A. V., Ladygina L. V. *Cultivation of Mussels and Oysters in the Black Sea*. Voronezh : Izd-vo ООО “Izdat-Print”, 2017, 508 p. (in Russ.)]
  12. Ahsan U., Kamran Z., Raza I., Ahmad S., Babar W., Riaz M. H., Iqbal Z. Role of selenium in male reproduction – A review. *Animal Reproduction Science*, 2014, vol. 146, iss. 1–2, pp. 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.01.009>

13. Hu B.-Q., Liu Y., Wen C.-G., Li A.-H., Hu X.-P., Wu D., Hu X.-J., Tao Z.-Y. Cloning and expression of selenoprotein W from pearl mussels *Cristaria plicata*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2014, vol. 167, pp. 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2013.09.008>
14. Fisher N. S., Teyssié J.-L., Fowler S. W., Wang W.-X. Accumulation and retention of metals in mussels from food and water: A comparison under field and laboratory conditions. *Environmental Science & Technology*, 1996, vol. 30, iss. 11, pp. 3232–3242. <https://doi.org/10.1021/es960009u>
15. Goede A. A., Wolterbeek H. Th., Koese M. J. Selenium concentrations in the marine invertebrates *Macoma balthica*, *Mytilus edulis*, and *Nereis diversicolor*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1993, vol. 25, pp. 85–89. <https://doi.org/10.1007/BF00230716>
16. Hadj Z., Boutiba Z., Belbachir B. *Mytilus galloprovincialis* as mussel watch for butyltins, tin, copper and zinc contamination, from antifouling paint particles, in West Algerian coastal waters. *Journal of Environmental Protection*, 2012, vol. 3, iss. 9, pp. 1047–1053. <https://doi.org/10.4236/jep.2012.39122>
17. Kapranova L. L., Nekhoroshev M. V., Malakhova L. V., Ryabushko V. I., Kapranov S. V., Kuznetsova T. V. Fatty acid composition of gonads and gametes in the Black Sea bivalve mollusk *Mytilus galloprovincialis* Lam. at different stages of sexual maturation. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2019, vol. 55, iss. 6, pp. 448–455. <https://doi.org/10.1134/S0022093019060024>
18. Kopp T. I., Outzen M., Olsen A., Vogel U., Ravn-Haren G. Genetic polymorphism in selenoprotein P modifies the response to selenium-rich foods on blood levels of selenium and selenoprotein P in a randomized dietary intervention study in Danes. *Genes and Nutrition*, 2018, vol. 13, art. no. 20 (10 p.). <https://doi.org/10.1186/s12263-018-0608-4>
19. Lowe D. M., Moore M. N. The cytochemical distributions of zinc (Zn II) and iron (Fe III) in the common mussel, *Mytilus edulis*, and their relationship with lysosomes. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1979, vol. 59, iss. 4, pp. 851–858. <https://doi.org/10.1017/S0025315400036882>
20. Mauvais-Jarvis F., Clegg D. J., Hevener A. L. The role of estrogens in control of energy balance and glucose homeostasis. *Endocrine Reviews*, 2013, vol. 34, iss. 3, pp. 309–338. <https://doi.org/10.1210/er.2012-1055>
21. Nikonova L. L., Nekhoroshev M. V., Ryabushko V. I. Total testosterone and estradiol in the gonads and gametes of the mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2017, vol. 53, iss. 6, pp. 519–522. <https://doi.org/10.1134/S0022093017060114>
22. Orban E., Di Lena G., Navigato T., Casini I., Marzetti A., Caproni R. Seasonal changes in meat content, condition index and chemical composition of mussels (*Mytilus galloprovincialis*) cultured in two different Italian sites. *Food Chemistry*, 2002, vol. 77, iss. 1, pp. 57–65. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00322-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00322-3)
23. Rowley A. F., Vogan C. L., Taylor G. W., Clare A. S. Prostaglandins in non-insectan invertebrates: Recent insights and unsolved problems. *Journal of Experimental Biology*, 2005, vol. 208, iss. 1, pp. 3–14. <https://doi.org/10.1242/jeb.01275>
24. Scott A. P. Is there any value in measuring vertebrate steroids in invertebrates? *General and Comparative Endocrinology*, 2018, vol. 265, pp. 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2018.04.005>
25. Soto M., Ireland M. P., Marigómez I. Changes in mussel biometry on exposure to metals: Implications in estimation of metal bioavailability in ‘Mussel-Watch’ programmes. *Science of the Total Environment*, 2000, vol. 247, iss. 2–3, pp. 175–187. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(99\)00489-1](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(99)00489-1)
26. Stanley-Samuelson D. W. The biological significance of prostaglandins and related eicosanoids in invertebrates. *American Zoologist*, 1994, vol. 34, iss. 6, pp. 589–598. <https://doi.org/10.1093/icb/34.6.589>
27. George S. G., Pirie B. J. S. Metabolism of zinc in the mussel, *Mytilus edulis* (L.): A combined ultrastructural and biochemical study. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1980, vol. 60, iss. 3, pp. 575–590. <https://doi.org/10.1017/S0025315400040273>
28. Tadasi N., Hiroshi O. Distribution of prostaglandins in the animal kingdom. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Lipids and Lipid Metabolism*, 1976, vol. 431, iss. 1, pp. 127–131. [https://doi.org/10.1016/0005-2760\(76\)90266-6](https://doi.org/10.1016/0005-2760(76)90266-6)

**STEROID HORMONES, SELENIUM, AND ZINC  
IN THE GONADS – GAMETES – LARVAE BIOLOGICAL SYSTEM  
OF THE MUSSEL *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAM.**

**L. L. Kapranova, V. I. Ryabushko, M. V. Nekhoroshev, and S. V. Kapranov**

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation  
E-mail: [lar\\_sa1980@mail.ru](mailto:lar_sa1980@mail.ru)

Assessment of the interaction of marine farms with the environment in the industrial cultivation of the mussel *Mytilus galloprovincialis* is very important. In the mussel farm – environment system, biotic fluxes of chemical compounds through gonads, gametes (sperm and eggs), and larvae make a considerable contribution to this interaction. Since gonads play a key role in the mussel reproduction, it is interesting to study the budget of materials, that are directly involved in this process. Out of these materials, testosterone, estradiol, fatty acids, and some trace minerals, such as Se and Zn, are known to affect spawning, growth, and development. The molluscs absorb these materials from food and water. These materials are partly metabolically assimilated by mussels and partly excreted into the environment with gametes. The aim of this study was to estimate the components of the budget of steroid hormones, fatty acids, and two essential trace elements (Zn and Se) in mussel gonads, gametes, and larvae. The total testosterone and estradiol in gonads and gametes were quantified by enzyme-linked immunosorbent assay. The contents of the trace elements were found using inductively coupled plasma mass spectrometry. The fatty acid composition was determined by means of gas chromatography–mass spectrometry. The contents of Se and Zn in mussel gonads and gametes were found to depend on the stage of the reproductive cycle. In female gonads, Se and Zn concentrations were higher than in male ones. The highest concentration of Se was recorded in eggs:  $(14.7 \pm 2.9) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  dry weight (d. w.). In sperm, it was  $(14.4 \pm 1.8) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  d. w. Zn content in gonads before spawning was higher than in gametes. In male gonads and in sperm, its values were  $(27.5 \pm 3.7)$  and  $(19.3 \pm 6.4) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  d. w., respectively. In female gonads and eggs, the contents of zinc were  $(53.6 \pm 10.9)$  and  $(49.3 \pm 8.2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  d. w., respectively. In spring, the mean values of Se and Zn assimilation degree (q) in gonads of the mussel were within 0.1–0.6. The limit values of the alimentary accumulation coefficient ( $K_{\text{lim}}$ ) of Se and Zn ranged 0.6 to 1.4. While spawning, mussels excrete polyunsaturated fatty acids (PUFA), which are probably used by other marine organisms. Up to 56.2 % of PUFA are excreted with sperm, and 48.1 %, with eggs, whereas in larvae this fraction does not exceed 10.2 %. The data obtained indicate that the molluscs assimilate sex hormones, fatty acids, selenium, and zinc to maintain vital processes: prostaglandins are synthesized from PUFA in the body, and testosterone esters are formed from testosterone. Se and Zn, when coupled with proteins, play a key role in the reproduction and formation of larval shells.

**Keywords:** mussel *Mytilus galloprovincialis*, gametes, larvae, selenium, zinc, testosterone, estradiol, fatty acids, Black Sea