



УДК 546.56:594.124:551.35:639.4(262.5)

**СОДЕРЖАНИЕ МЕДИ  
В ОРГАНАХ И ТКАНЯХ *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAMARCK, 1819  
И ПОТОК ЕЁ СЕДИМЕНТАЦИОННОГО ДЕПОНИРОВАНИЯ  
В ДОННЫЕ ОСАДКИ В ХОЗЯЙСТВАХ ЧЕРНОМОРСКОЙ АКВАКУЛЬТУРЫ**

© 2018 г. **Н. В. Поспелова, В. Н. Егоров, Н. С. Челядина, М. В. Нехорошев**

Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия  
E-mail: [nvpospelova@mail.ru](mailto:nvpospelova@mail.ru)

Поступила в редакцию 19.03.2018; после доработки 19.03.2018;  
принята к публикации 18.12.2018; опубликована онлайн 28.12.2018.

Роль мидий в формировании химического состава морской воды определяется особенностями протекания в них сорбционных и трофодинамических процессов. Медь является жизненно необходимым элементом и в то же время занимает второе место по токсичности после ртути среди десяти металлов, токсическое действие которых проверено на эмбрионах мидий и устриц. Выявление закономерностей накопления содержания меди в органах и тканях моллюсков позволяет проанализировать как санитарно-гигиенические риски их продуктового использования при выращивании в мариккультуре, так и их роль в биогеохимических процессах изменения состава морской среды в акваториях размещения мидийных плантаций. Цель работы — определить содержание ионов меди в органах и тканях мидий в масштабе сезонного хода онтогенеза, проанализировать с использованием математической модели и эмпирических данных степень их накопления моллюсками при пищевом пути минерального питания и оценить влияние марихозяйств на процессы переноса меди в прибрежной экосистеме. Моллюски отобраны с коллекторов мидийной фермы, расположенной на внешнем рейде г. Севастополя. Для определения содержания меди в системе среда — мидии — биоотложения использован метод атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией. Представлена общая модель процесса обмена меди между мидиями и морской средой. Предложены уравнения для определения степени усвоения из пищи ионов меди ( $q$ ) и предельного коэффициента их накопления ( $K_n$ ) по результатам измерений концентрации в рацоне мидий, в мягких тканях и в биоотложениях без применения радиоактивных меток микроэлементов. Рассчитаны величины изъятия меди из морской среды мидийной фермой. Показана роль культивируемых моллюсков в осаждении тяжёлых металлов.

**Ключевые слова:** Чёрное море, мариккультура, *Mytilus galloprovincialis*, медь, степень усвоения, донные осадки

Медь является эссенциальным элементом, поскольку входит в состав крови, а также ряда ферментов и белков моллюсков. Между тем при повышенных концентрациях в среде она может оказывать негативное влияние на жизнедеятельность гидробионтов. Благодаря своей высокой химической активности и способности связываться с атомами азота и серы, медь способна изменять физико-химические свойства аминокислот, белков, нуклеопротеинов, ДНК [3, 8].

Интенсивность участия мидий *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 в формировании химического состава морской воды определяется особенностями протекания в них сорбционных и трофодинамических процессов. Фильтрационная активность моллюсков зависит от температуры, содержания кислорода в среде, пищевых потребностей, размерных спектров и энергетической ценности взвесей, а также от стадии развития и метаболической активности мидий [10].

Морская вода — слабый электролит, в котором медь может находиться в виде положительных ионов  $\text{CuOH}^+$  и  $\text{Cu}^{2+}$ , солей угольной кислоты  $\text{CuCO}_3$ , органокомплексов. Концентрация  $\text{Cu}$  в разных районах Мирового океана варьирует от 0,8 до 200,0  $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$  [6, 12]. По санитарно-гигиеническим критериям, предельно допустимая концентрация ионов меди в морской среде (далее — ПДК) составляет 5  $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$  [2]. Из десяти металлов, токсическое действие которых проверялось в экспериментах по выживаемости эмбрионов мидий и устриц, медь занимает второе место по токсичности после ртути; аномальное развитие эмбрионов наблюдается уже при её концентрации в среде 5,3  $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$  [9]. Мидий всё более активно используют как продуктивный ресурс, особенно в связи с их выращиванием в марикультурных хозяйствах, а значит, выявление закономерностей изменения содержания  $\text{Cu}$  в моллюсках в ходе онтогенеза позволяет определить как санитарно-гигиенические риски их употребления, так и их роль в биогеохимических процессах изменения состава морской среды в акваториях размещения мидийных плантаций.

Целями нашей работы были определение содержания ионов  $\text{Cu}$  в органах и тканях мидий в масштабе сезонного хода онтогенеза, анализ с использованием математической модели и эмпирических данных степени усвоения моллюсками меди при пищевом пути минерального питания и оценка влияния марикультурных хозяйств на процессы транспорта соединений металла в системе среда — мидии *Mytilus galloprovincialis* — биоотложения.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Мидий размером 5–6 см собирали с коллекторов мидийной фермы, расположенной в б. Карантинная (г. Севастополь), с горизонта 3–4 м в летний, осенний и зимний сезоны 2003–2004 гг. У моллюсков определяли пол, стадию зрелости гонад, а также весовые характеристики (сухую и сырую массу створки, мягких тканей и гонад). Для определения пола и стадии зрелости гонад использовали методику визуального изучения мазков половых продуктов с помощью микроскопа [13]. Для работы отбирали моллюсков на 3-й (в период активного накопления питательных веществ и интенсивного роста генеративной ткани) и на 4-й (в период окончательного формирования половых клеток перед нерестом) стадиях зрелости гонад.

Для анализа содержания меди во взвешенном веществе морскую воду (20 л) фильтровали через ядерные (трековые) мембраны с диаметром пор 1  $\mu\text{м}$ , изготовленные в Исследовательском центре прикладной ядерной физики (ныне — Объединённый институт ядерных исследований) (г. Дубна, Россия). Содержание сухого вещества во взвеси определяли весовым методом после высушивания фильтров при 105 °С до постоянного веса.

Нахождение взвеси в желудках может влиять на определение концентрации тяжёлых металлов в тканях беспозвоночных [14, 15]. Для минимизации этого влияния моллюсков выдерживали в фильтрованной воде, чтобы освободить содержимое их пищеварительной системы.

Биоотложения собирали следующим образом. Мидий сразу после отлова помещали на 4 ч в ёмкости с профильтрованной (через ядерные мембраны с диаметром пор 1  $\mu\text{м}$ ) морской водой с постоянной подачей воздуха компрессором. После освобождения содержимого их желудков экскременты собирали пипеткой и промывали дважды дистиллированной водой.

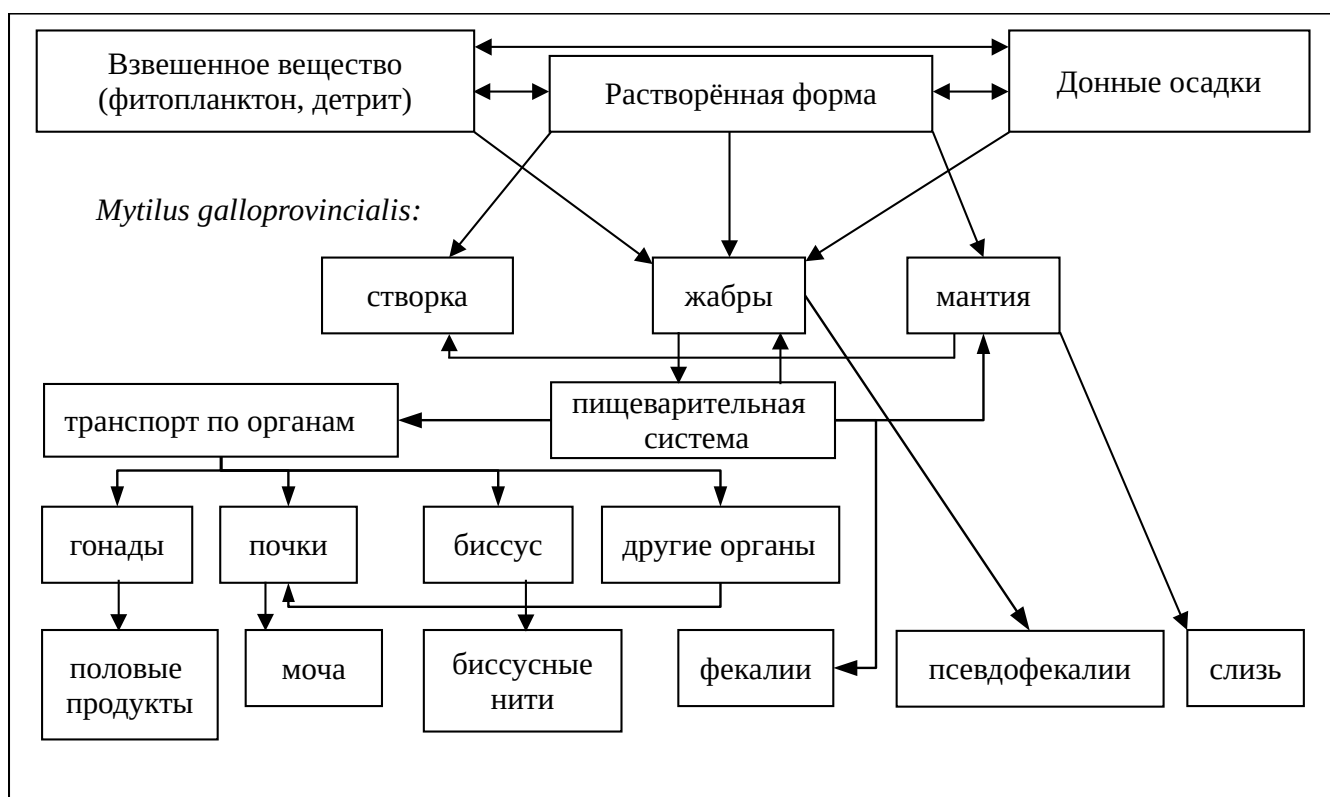
Скорость фильтрации рассчитывали по уравнениям Финенко Г. А. [4], учитывающим зависимость от сухой массы мягких тканей и от температуры. Время прохождения пищи через пищеварительный тракт определяли, добавляя в ёмкости с голодными моллюсками взвесь зелёной микроводоросли *Tetraselmis suecica* (Kyllin) Butcher. Фиксировали время от начала раскрытия створок раковины до появления фекалий зелёного цвета [11].

При исследовании содержания меди в системе среда — мидии — биоотложения использован метод атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией (ААС ЭТА) на спектрофотометре С-115М1 в комплексе с приставкой «Графит-5» после кислотной минерализации [7]. Для компенсации химических (матричных) помех в данном случае применяли дейтериевую лампу.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мидии, как и другие морские организмы, поглощают ионы металлов и микроэлементы из воды (растворённая фаза) и из пищевых частиц (пищевой путь минерального питания). Общая модель процесса транспорта меди моллюсками может быть представлена в виде схемы (рис. 1). В наши задачи входило исследование системы среда — мидии — биоотложения без рассмотрения процессов адсорбции растворённых форм металла.

При решении задач настоящей статьи биомасса особей моллюсков дифференцирована по группам органов (створки, мягкие ткани, гонады), при этом приняты очевидные допущения, что раковины консервативны при накоплении микроэлементов, мягкие ткани наиболее динамичны в масштабе онтогенеза мидий, а гонады изменчивы за счёт колебаний физиологической активности в масштабе сезонных циклов гаметогенеза — нереста — покоя.



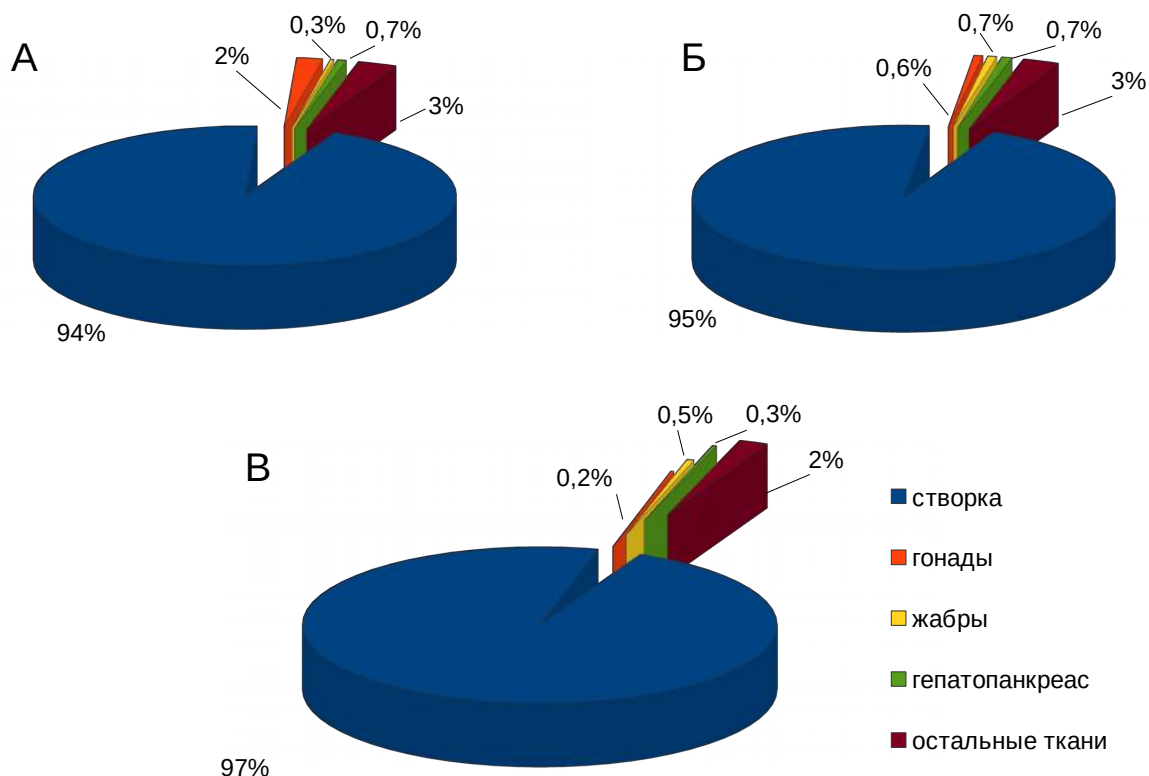
**Рис. 1.** Блок-схема процессов накопления и выведения меди мидиями

**Fig. 1.** The block diagram of processes of accumulation and excretion of copper by mussels

По соотношению сухой массы органов и тканей моллюсков в масштабе сезонного онтогенеза (рис. 2) определено, что створки раковин составляли от 93 до 96 % в общем сухом весе моллюска. Доля гонад колебалась от 0,5 до 2,0 % в течение года в зависимости от стадии репродуктивного цикла. Сухая масса жабр и гепатопанкреаса не превышала 1 %, а масса остальных тканей варьировала от 2 до 3 %.

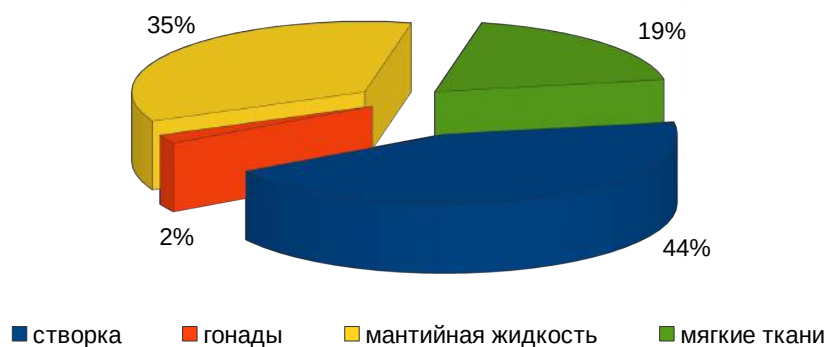
Выявлено, что вес мантийной жидкости составляет 33–38 % от общего веса моллюсков (в пределах 2–4-й стадий зрелости гонад) (рис. 3).

Исследования показали, что доля меди максимальна (от 45 до 93 %) в створках мидий. Доля Cu в жабрах составляет 2–6 %, в гонадах — 1–10 %, в гепатопанкреасе — 2–16 %. На остальные ткани приходится от 2 до 23 % (рис. 4). Наибольшее содержание меди в метаболически активных органах мидий наблюдалось в летний период.



**Рис. 2.** Соотношение между сухим весом различных органов черноморской мидии (размер 50 мм) (А — лето 2003 г.; Б — осень 2003 г.; В — зима 2004 г.)

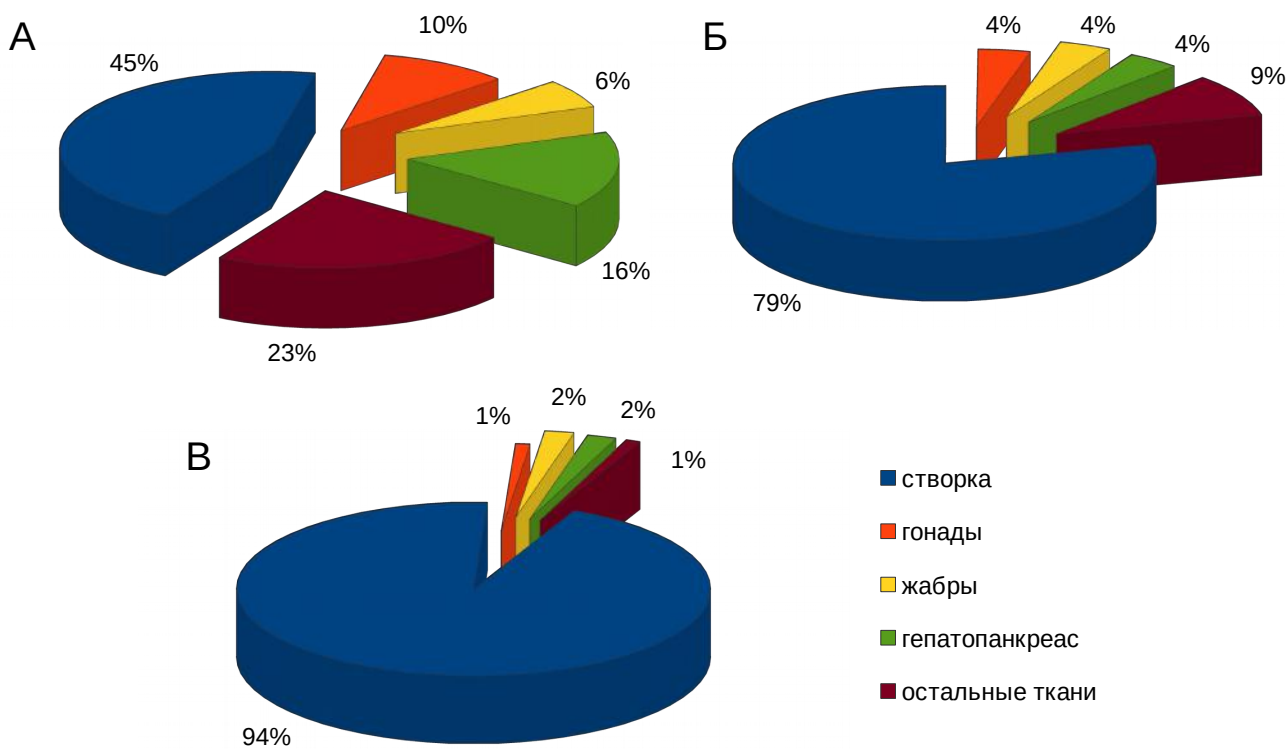
**Fig. 2.** The ratio of dry weight of various organs of the Black Sea mussel (size 50 mm) (A – summer 2003; B – autumn 2003; B – winter 2004)



**Рис. 3.** Соотношение между сырым весом отдельных частей живой мидии

**Fig. 3.** The ratio of wet weight of individual parts of live mussels

Наши наблюдения выявили, что в пределах исследуемой размерной группы мидий концентрация  $Cu$  в сырой массе их гонад, составляющей от 0,20 до 0,45 г в общей массе органов и тканей, в условиях высокой вариабельности ( $R^2 = 0,004$ ) достигала в среднем  $8,0 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ . Результаты оценки распределения меди в органах и тканях моллюсков в целом, а также отдельно (в створках) показаны на рис. 5. Полученные данные свидетельствуют (рис. 5а), что в условиях высокой вариабельности показателей ( $R^2 = 0,109$ ) концентрация  $Cu$  для рассмотренной размерной группы мидий возрастала с увеличением сырой массы их тканей.

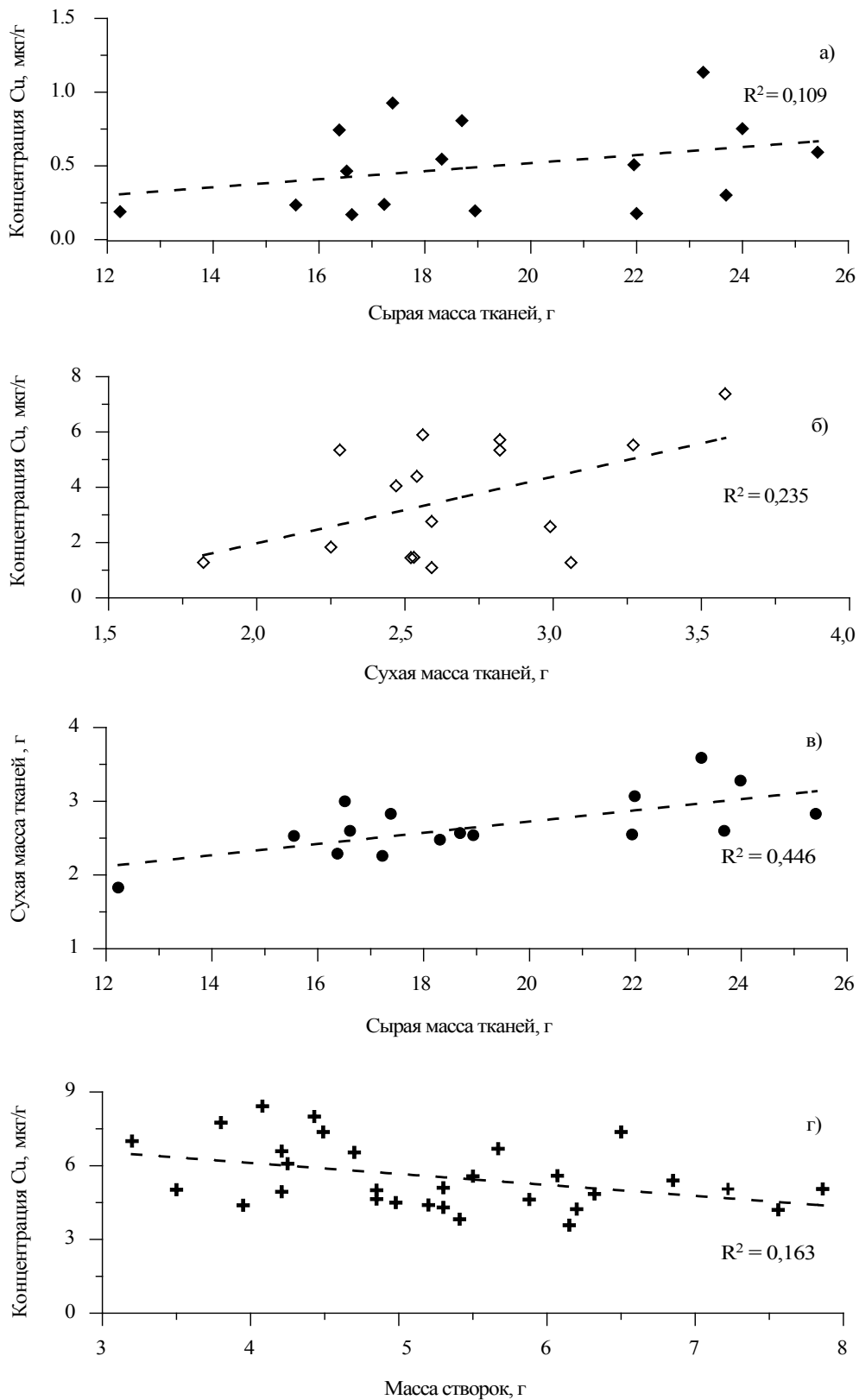


**Рис. 4.** Соотношение между содержанием меди в органах мидий в различные сезоны (А — лето 2003 г.; Б — осень 2003 г.; В — зима 2004 г.)

**Fig. 4.** The ratio of copper content in various mussel organs in different seasons (А – summer 2003; Б – autumn 2003; В – winter 2004)

При пересчёте степени адсорбционной способности моллюсков на сухую массу их органов и тканей отмеченная зависимость проявлялась с меньшей вариабельностью результатов наблюдений ( $R^2 = 0,235$ ) (рис. 5б), что подтверждается повышением статистической значимости ( $R^2 = 0,446$ ) отношения сухой массы органов и тканей мидий к сырой (рис. 5в). В то же время концентрация меди в створках моллюсков с увеличением их массы уменьшалась (рис. 5г). Характеристики распределения в целом свидетельствовали, что ионы  $\text{Cu}$  в большей степени концентрировались в синтезируемых в процессе роста необменных фондах меди. Эффект снижения адсорбционной способности створок может быть объяснён сокращением поверхностно массовых соотношений при превалировании процессов накопления  $\text{Cu}$  створками.

По современным представлениям, при изучении массового энергетического и минерального баланса морских организмов степень усвоения пищи для роста оценивается коэффициентом  $K_2$  (для черноморских мидий он равен 0,14–0,42 [10]), а степень усвоения элемента из пищи — коэффициентом  $q$  [5]. Различие в оценках усвоения пищи для роста и усвоения химического элемента из пищи связано с тем, что в продукционных процессах потребность в энергетических компонентах (характеризуются  $K_2$ ) и химических элементах ( $q$ ) может отличаться. Именно поэтому определение степени усвоения меди из пищи может характеризовать потребность морских организмов в рассматриваемом микроэлементе. Применительно к моллюскам интерпретация величины  $K_2$  имеет ряд особенностей. Мидия в процессе созревания гонад проходит шесть стадий зрелости [13], при этом стадии 1–4 сопровождаются соматическим и генеративным ростом, стадия 5 — только генеративным, а в стадии 6 рост моллюска отсутствует. Следовательно, для черноморских мидий надо или оценивать  $K_2$  для каждой стадии, или использовать среднюю для цикла величину  $K_2$ .



**Рис. 5.** Концентрационные характеристики содержания меди в мидиях: а) концентрация Cu в пересчёте на сырую массу органов и тканей; б) концентрация Cu в пересчёте на сухую массу органов и тканей; в) отношение сухой массы органов и тканей к сырой; г) концентрация Cu в сухой массе створок мидий

**Fig. 5.** The concentration characteristics of copper content in mussels: а) Cu concentration in terms of wet weight of organs and tissues; б) Cu concentration in terms of dry weight of organs and tissues; в) the ratio of dry to wet weight of organs and tissues; г) Cu concentration in dry mass of mussel flaps



В исследованиях для оценки степени усвоения пищи для роста обычно используют радиотрассерные методы [5]. Во избежание применения радиоактивных меток микроэлементов одной из наших задач был поиск иного способа определения  $q$  по результатам измерений концентраций элемента в пище мидий, их мягких тканях и биоотложениях. Для этой цели построена математическая модель, где в качестве базового использовано уравнение 4.15 [5, с. 92]:

$$\frac{dC_2}{dt} = R(C_n q - C_2 q_n) - C_2 p,$$

где  $C_2$  и  $C_n$  — концентрация химического элемента в гидробионте и его пище, мкг·г<sup>-1</sup>;

$p$  — показатель скорости обмена элемента гидробионтом, сут<sup>-1</sup>;

$R$  — относительный рацион, сут<sup>-1</sup>;

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

$q$  — степень усвоения элемента из пищи.

Из условия стационарности системы концентрирования меди в пище мидий (при  $dC_2/dt = 0$ ) следует:

$$C_2 = \frac{C_n q R}{R q_n + p}, \quad (1)$$

откуда:

$$q = \frac{C_2 (R q_n + p)}{C_n R}. \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что величина  $q$  в стационарном состоянии определяется концентрацией элемента в пище мидий  $C_n$ , относительным рационом  $R$ , степенью усвоения пищи для роста  $q_n$  (=  $K_2$ ), а также константой времени обмена элемента мидиями  $p$ . В рамках наших исследований мы определяли  $C_2$  и  $C_n$  по результатам наблюдений, а величину  $q_n$  оценивали по литературным данным [10].

Величина  $p$  может быть установлена, как правило, лишь по итогам экспериментов с радиоактивной меткой, а значит, выражение (1) содержит два неизвестных —  $q$  и  $p$ . Следовательно, для оценки  $q$  необходимы дополнительные допущения. Из уравнения (1) видно: если  $p$  намного меньше  $R \times q_n$ , то, пренебрегая величиной  $p$ , можно получить формулу расчёта для  $q$ , в которую входят  $C_2$ ,  $C_n$  и  $q_n$ :

$$C_2 = C_n \frac{q}{q_n},$$

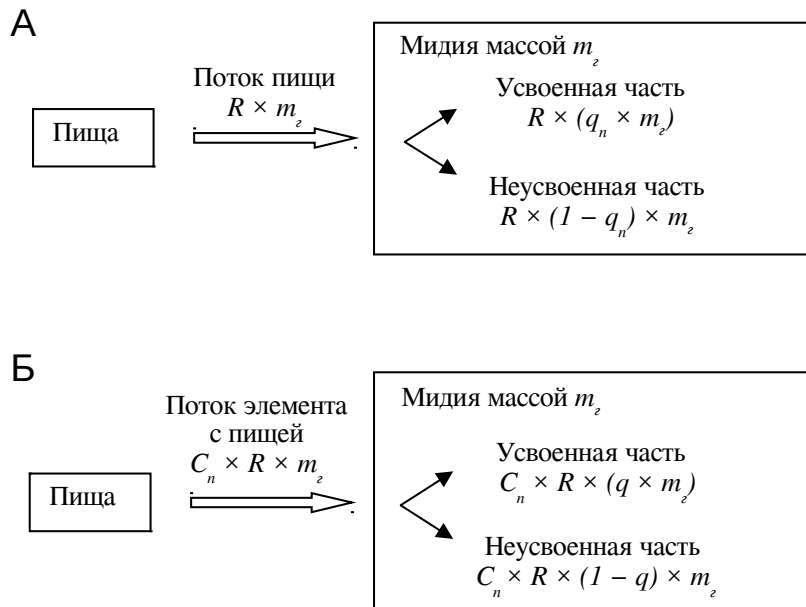
откуда:

$$q = \frac{C_2 q_n}{C_n}. \quad (3)$$

В формулу (3) не входит величина концентрации микроэлемента в биоотложениях мидий  $C_\phi$ , а значит, возможен поиск соотношений, которые бы повысили определённость  $q$  с учётом этого фактора. Для оценки величины  $q$ , позволяющей принимать в расчёт  $C_\phi$ , мы использовали структурные схемы пищевого и минерального метаболизма мидий, указанные на рис. 6.

Рассмотрение данных структурных схем показало, что в первом случае мы имеем оценку массы биоотложений за сутки, а во втором — оценку потока выхода неусвоенного элемента с биоотложениями. Их отношение и является выражением концентрации элемента в биоотложениях  $C_\phi$ :

$$C_\phi = C_n \frac{1 - q}{1 - q_n}. \quad (4)$$



**Рис. 6.** Структурные схемы пищевого (А) и минерального (Б) метаболизма мидий  
**Fig. 6.** The structural patterns of alimentary (A) and mineral (Б) metabolism of mussels

Отсюда можно получить формулу для расчёта  $q$ :

$$q = 1 - \frac{C_\phi}{C_n} (1 - q_n). \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) видно, что  $q$  можно определить по известным значениям  $C_\phi$ ,  $C_n$  и  $q_n$ . Следовательно, использование соотношений (3) и (5) позволяет получить две оценки, которые в пределах погрешности характеризуют величину  $q$ .

В то же время есть возможность определить  $q$  по данным измерений только концентраций элемента в мидии и биоотложениях  $C_\phi$ , объединив уравнения (3) и (5). Значение  $C_n$  выражено из одной формулы и поставлено в соотношение:

$$q = \frac{C_2 q_n}{C_2 q_n + C_\phi (1 - q_n)}. \quad (6)$$

Проанализировав данные, полученные всеми тремя способами определения  $q$ , то есть с помощью формул (3), (5) и (6), мы остановились на уравнении (6) — на расчёте степени усвоения элемента из пищи  $q$  по его концентрациям в мидиях и их биоотложениях. Способы расчёта, учитывающие концентрацию элемента во взвешенном веществе, обычно дают большую погрешность и не отражают влияние процессов обмена металла в организме моллюсков. При известных значениях степени усвоения элемента из пищи  $q$  и степени усвоения пищи для роста  $q_n$  можно определить предельный коэффициент пищевого накопления металла ( $K_n$ ) по уравнению 4.16 [5]:

$$K_n = Rq / (Rq_n + p), \quad (7)$$

из которого следует, что при  $p = 0$  величина  $K_n$  представляет собой отношение степени усвоения элемента из пищи к степени усвоения пищи для роста, то есть  $K_n = q / q_n$ . Таким образом, коэффициент  $K_n$  в наших расчётах является максимально возможным: если  $p \neq 0$ , значение  $K_n$  будет снижаться с увеличением  $p$ .



Величина коэффициента  $q_n$  ( $K_2$ ) для черноморских мидий нами принята равной 0,14–0,42 исходя из исследований, проведённых ранее другими авторами [10], поэтому в таблице 1 даются два значения  $q$  и  $K_n$  — для диапазона  $q_n$  от 0,14 до 0,42. Остальные данные, необходимые для расчётов  $q$  и  $K_n$ , получены нами.

**Таблица 1.** Степень усвоения меди из пищи ( $q$ ) и предельный коэффициент пищевого накопления меди ( $K_n$ )

**Table 1.** The level of copper assimilation from food ( $q$ ) and the limiting coefficient of food accumulation of copper ( $K_n$ )

Август 2003 г.		Ноябрь 2003 г.		Январь 2004 г.		Среднегодовое значение	
$q$	$K_n$	$q$	$K_n$	$q$	$K_n$	$q$	$K_n$
0,07–0,25	0,50–0,60	0,03–0,11	0,21–0,26	0,11–0,35	0,79–0,83	0,07–0,24	0,50–0,57

Несмотря на значительный разброс данных по  $q$  и  $K_n$  в разные сезоны, среднегодовые значения показателей  $q$  для меди составляют 0,07–0,35, что в 2 раза меньше значений степени усвоения пищи для роста. Это указывает на то, что потребность моллюсков в исследуемом микроэлементе значительно ниже, чем в энергетических компонентах питания.

Таким образом, показано, что уравнение описания кинетики обмена металлов в гидробионтах при пищевом поглощении элементов [5] может быть решено для черноморской мидии без использования радиотраассерных методов, если измерено содержание металлов в тканях моллюсков и в биоотложениях с учётом известного коэффициента  $K_2$ .

Взвешенное органическое вещество морской воды играет роль концентратора, сорбента и транспортёра микроэлементов из фотического слоя в донные отложения. На взвеси развивается множество микроорганизмов, которые, как показано, способны концентрировать значительные количества металлов. Взвешенное вещество — основной источник питания мидий, поэтому оценка транспорта тяжёлых металлов в составе взвеси через организм моллюсков в донные осадки имеет ключевое значение. Концентрирование живыми организмами микроэлементов существенно влияет на геохимическое поведение последних, так как способствует изменению их формы нахождения в морской воде. Нами выявлено значительное превышение содержания меди в биоотложениях гидробионтов по сравнению с содержанием её в тканях. При этом концентрации Си в тканях мидий из марихозяйства не превышали ПДК для мяса моллюсков и ракообразных (30 мкг·г<sup>-1</sup> сырого веса) [2], что особенно важно для марикультуры.

Организация крупных хозяйств по культивированию мидий требует определения их возможного влияния на окружающую среду. Ранее для Азовского моря и для северных частей Чёрного моря были рассчитаны величины изъятия тяжёлых металлов природной популяцией черноморской мидии и показана роль моллюсков в осаждении тяжёлых металлов [1]. Однако в этих работах не учитывалось содержание металлов в биоотложениях гидробионтов. Нами сделаны расчёты, показывающие степень участия мидийной фермы в изъятии и осаждении меди из акватории, в которой расположено марихозяйство (табл. 2).

За годичный период выращивания мидии хозяйства фильтруют в среднем 70 млн м<sup>3</sup> воды, а за сутки — от 144 до 234 тыс. м<sup>3</sup>. Объём акватории, где расположена ферма, — более 120 тыс. м<sup>3</sup>, то есть за 24 ч вся вода марихозяйства может быть полностью профильтрована 1–2 раза. Отметим, что моллюски за сутки потребляют от 181 до 846 кг взвеси, куда входят фитопланктон, детрит и неорганические фракции. Мидии, культивируемые на ферме, изымают за 24 ч из взвешенного вещества от 61,9 до 85,9 г ионов меди, при этом на марикультурном хозяйстве в составе мягких тканей моллюсков концентрируется от 28 до 408 г соединений этого металла (табл. 2).

**Таблица 2.** Поток меди на модульном мидийном хозяйстве (1 га, 15 млн экз. мидий размером 5–6 см)  
**Table 2.** The copper flow in the modular mussel farm (1 hectare, 15 million mussels with a shell length 5–6 cm)

Сезон	Потреблено с взвешенным веществом, г·сут <sup>-1</sup>	Содержание в мягких тканях мидий, г	Выделено с биоотложениями, г·сут <sup>-1</sup>
август 2003 г.	85,9	408,5	46,7
ноябрь 2003 г.	67,9	105,0	26,2
январь 2004 г.	61,9	28,4	4,3

Определено, что мидия товарного размера выделяет от 12 до 46 мг биоотложений в сутки, что составляет в среднем 8,6 г в год. В пересчёте на модульное хозяйство (1 га, 5 тыс. коллекторов, 15 млн мидий) это 129 тонн сухого вещества биоотложения в год, то есть моллюски хозяйства за сутки могут перевести в биоотложения от 4,3 до 46,7 г Cu. Таким образом, мидийные фермы, изымая медь из взвешенного вещества и выделяя её с биоотложениями, участвуют в биогеохимическом круговороте Cu в прибрежных акваториях, способствуя процессам самоочищения прибрежных экосистем от тяжёлых металлов.

**Заключение.** В процессе роста моллюсков медь больше всего концентрировалась в необменных фондах их органов и тканей. Уравнение описания кинетики обмена металлов в гидробионтах при пищевом поглощении элементов может быть решено для черноморской мидии без использования радиотраассерных методов, если измерено содержание металлов в тканях моллюсков и в биоотложениях с учётом известного коэффициента  $K_2$ . Впервые получены значения степени усвоения ( $q$ ) и предельного коэффициента пищевого накопления ( $K_n$ ) меди культивируемыми мидиями. Степень усвоения ионов Cu из пищи составляет в среднем 0,07–0,35, что в 2 раза ниже значения коэффициента эффективности усвоения пищи для роста ( $K_2$ ). Показатели среднегодовых значений  $K_n$  для меди колеблются от 0,21 до 0,60. Полученные данные по изъятию гидробионтами меди из взвешенного вещества и по её выделению с биоотложениями позволяют рекомендовать использование мидийной фермы в качестве биотехнологического комплекса для улучшения качества воды в прибрежных акваториях.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИМБИ по темам «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2) и «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6).*

**Благодарность.** Авторы признательны к. б. н. Иванову В. Н. за идею настоящего исследования и за её плодотворное обсуждение на начальных этапах работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Доценко И. В. *Оценка осаждения тяжёлых металлов черноморской мидией (Mytilus galloprovincialis Lam.) в морских акваториях* : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.23. Ростов-на-Дону, 2005. 25 с. [Dotsenko I. V. *Otsenka osazhdeniya tyazhelykh metallov chernomorskoj midiei (Mytilus galloprovincialis Lam.) v morskikh akvatoriyakh*: avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.23. Rostov-na-Donu, 2005. 25 p. (in Russ.)].
2. *Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения.* Утв. приказом Федерального агентства по рыболовству

- от 18.01.2010, № 20. 215 с. [*Normativy kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativy predel'no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya*. Utv. prikazom Federal'nogo agentstva po rybolovstvu ot 18.01.2010, no. 20. 215 p. (in Russ.)].
3. Патин С. А. *Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана*. Москва : Пищевая промышленность, 1979. 250 с. [Patin S. A. *Vliyanie zagryazneniya na biologicheskie resursy i produktivnost' Mirovogo okeana*. Moscow: Pischevaya promyshlennost', 1979, 250 p. (in Russ.)].
  4. Печень-Финенко Г. А. Фильтрационная активность мидий в условиях Севастопольской бухты // *Гидробиологический журнал*. 1992. Т. 28, № 5. С. 44–50. [Pechen-Finenko G. A. Filtration activity of mussels under conditions of the Sevastopol Bay. *Gidrobiologicheskij zhurnal*, 1992, vol. 28, no. 5, pp. 44–50. (in Russ.)].
  5. Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н. *Морская динамическая радиохемэкология*. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 176 с. [Polikarpov G. G., Egorov V. N. *Morskaya dinamicheskaya radiokhemiya*. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 176 p. (in Russ.)].
  6. Попов Н. И., Федоров К. Н., Орлов В. М. *Морская вода*. Москва : Наука, 1979. 327 с. [Popov N. I., Fedorov K. N., Orlov V. M. *Morskaya voda*. Moscow: Nauka, 1979, 327 p. (in Russ.)].
  7. Поспелова Н. В., Копытов Ю. П., Нехорошев М. В. Простой способ подготовки проб для анализа содержания тяжёлых металлов в системе «взвесь – мидии – биоотложения» методом атомной абсорбции // *Учёные записки ТНУ. Сер. «Биология, химия»*. 2006. Т. 19 (58), № 1. С. 156–160. [Pospelova N. V., Kopytov Yu. P., Nekhoroshev M. V. Prostoi sposob podgotovki prob dlya analiza soderzhaniya tyazhelykh metallov v sisteme “vzves’ – midii – biootlozheniya” metodom atomnoi absorbtzii. *Uchenye zapiski TNU. Ser. “Biologiya, khimiya”*, 2006, vol. 19, iss. 58, no. 1, pp. 156–160. (in Russ.)].
  8. Саенко Г. Н. *Металлы и галогены в морских организмах*. Москва : Наука, 1993. 252 с. [Saenko G. N. *Metally i galogeny v morskikh organizmakh*. Moscow: Nauka, 1993, 252 p. (in Russ.)].
  9. Таможняя В. А., Горомосова С. А. Биохимические показатели метаболизма мидий при действии на них токсинов // *Экология моря*. 1985. Вып. 21. С. 64–68. [Tamozhnyaya V. A., Goromosova S. A. Biochemical indices of mussel metabolism under the toxin effect. *Ekologiya morya*, 1985, iss. 21, pp. 64–68. (in Russ.)].
  10. Финенко Г. А., Романова З. А., Аболмасова Г. И. Экологическая энергетика черноморской мидии // *Биоэнергетика гидробионтов* / ред.: Г. Е. Шульман, Г. А. Финенко. Киев : Наукова думка, 1990. С. 32–72. [Finenko G. A., Romanova Z. A., Abolmasova G. I. Ekologicheskaya energetika chernomorskoj midii. In: *Bioenergetika gidrobiontov* / G. E. Shul'man, G. A. Finenko (Eds). Kiev: Naukova dumka, 1990, pp. 32–72. (in Russ.)].
  11. Цихон-Луканина Е. А. *Трофология водных моллюсков*. Москва : Наука, 1987. 176 с. [Tsihon-Lukanina E. A. *Trofologiya vodnykh mollyuskov*. Moscow: Nauka, 1987, 176 p. (in Russ.)].
  12. Bryan G. W. Heavy metals contamination in the sea. In: *Marine pollution* / Johnston R. (Ed.). London ; New York ; San-Francisco: Academic Press, 1976, ch. 3, pp. 185–302.
  13. Pirkova A. V., Stolbova N. G., Ladygina L. V. Seasonal dynamics of spawning of *Mytilus galloprovincialis* on muddy biotopes in areas of the Black Sea. *Oceanographic Literature Review*, 1996, vol. 43, no. 4, pp. 398.
  14. Robinson W. E., Ryan D. K., Wallace G. T. Gut contents: A significant contaminant of *Mytilus edulis* whole body metal concentrations. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1993, vol. 25, no. 4, pp. 415–421. <https://doi.org/10.1007/BF00214329>.
  15. Wallner-Kersanach M., Lobo S. E., Da-Silva E. M. Depuration effects on trace metals in *Anomalocardia brasiliiana* (Gmelin, 1791). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1994, vol. 52, no. 6, pp. 840–847. <https://doi.org/10.1007/BF00200692>.

**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**

**N. V. Pospelova, V. N. Egorov, N. S. Chelyadina, M. V. Nekhoroshev**

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: [nvpospelova@mail.ru](mailto:nvpospelova@mail.ru)

The role of mussels in formation of water chemical composition is determined by the peculiarities of sorption and trophodynamic processes. Copper is a vital element, but of ten metals the toxic effect of which was tested for the survival of mussel and oyster embryos, copper is following mercury. Studying the regularities of copper content change during mussel ontogeny allows to determine both sanitary and hygienic risks of mussel product use during the mollusks cultivation in mariculture and the biogeochemical role in the formation of the chemical composition of the marine water near mussel farms. The purpose of this work is to determine the copper content in the organs and tissues of the mussels during seasonal course of mollusks ontogenesis, to analyze the degree of copper assimilation along the food path of mineral nutrition using the mathematical model and empirical data and to assess the influence of marine farms on the copper exchange processes in the coastal ecosystem. The mollusks were collected from the mussel farm located in the external roadstead of Sevastopol. Studying the copper content in the environment – mussel – biodeposition system, a method of atomic absorption spectroscopy with electrothermal atomization was used. A general model illustrating the process of copper exchange between the mussels and the water environment is presented. Equations for determining the degree of assimilation of metal from food ( $q$ ) and the limiting coefficient of food accumulation of metal ( $K_n$ ) are proposed based on the results of measurements of its concentrations in the mussels' diet, soft tissue and their biodeposition without using radioactive trace elements. The values of the copper removal by the mussel farm were calculated. The role of cultivated mollusks in the heavy metals precipitation was shown.

**Keywords:** Black Sea, mariculture, *Mytilus galloprovincialis*, copper, degree of assimilation, benthic sediments