

Департамент образования города Севастополя
Государственное бюджетное образовательное учреждение
«Центр дополнительного образования «Малая академия наук»
Центр выявления и поддержки одарённых детей
города Севастополя «Альтаир»

Номинация: Человек и его здоровье

МЫШЬЯК В ЧЕРНОМОРСКИХ МОЛЛЮСКАХ: РИСКИ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

Работу выполнила:

Максимова Дарья Андреевна,
учащаяся творческого объединения
«Биология человека» ГБОУ ЦДО «Малая
академия наук», ГБОУ СПЛ, 10 класс;

Научный руководитель:

Поспелова Н.В., педагог дополнительного
образования
ГБОУ ЦДО «Малая академия наук»,
к.б.н., вед.н.с. ФИЦ ИнБЮМ

г. Севастополь, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
РАЗДЕЛ 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	7
РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	9
2.1 Характеристика района исследований.....	9
2.2 Материал и методы исследований	10
2.3 Математическая обработка данных	12
РАЗДЕЛ 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	13
3.1 Аккумуляция мышьяка в мягких тканях разноразмерных мидий	13
3.2 Аккумуляция мышьяка в раковинах разноразмерных мидий	16
3.3 Оценка рисков для здоровья человека	17
ВЫВОДЫ.....	22
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	23

ВВЕДЕНИЕ

Обоснование и анализ актуальности выбранной темы. Выращивание морских организмов является в настоящее время одним из важнейших направлений хозяйственной деятельности человека. Однако для её осуществления необходима оценка степени загрязнённости среды опасными для здоровья человека и морских организмов химическими элементами. Одним из таких загрязнителей является широко распространённый в природе микроэлемент мышьяк (As). Загрязнению окружающей среды мышьяком способствуют как природные, так и антропогенные источники. Так, около 60 % атмосферного мышьяка поступает в среду от горнодобывающих предприятий как точечные выбросы, которые транспортируются и диспергируются в виде аэрозольных частиц [Рябушко и др., 2017].

Кроме того, количество исследований видообразования As в экологических системах невелико, и, следовательно, существует необходимость не только в разработке аналитических методов видообразования, но и в применении этих методов к экологическим матрицам “реального мира”. Токсичность мышьяка также напрямую связана с биодоступной фракцией. Следовательно, исследования биодоступности все чаще признаются критически важными как для оценки рисков для окружающей среды, так и для здоровья человека [Akter et al., 2005].

Известно, что морские пищевые продукты (рыба, ракообразные, морские водоросли и др.) имеют более высокие концентрации мышьяка, чем продукты наземного происхождения. Так, около 90 % потреблённого в США мышьяка поступает в организм человека с пищей из морепродуктов. Однако в них содержатся в основном нетоксичные органические соединения мышьяка [Borak and Hosgood, 2007]. В процессе жизнедеятельности моллюски, выращиваемые в садках, способны изменять параметры среды, как правило, в негативную сторону. Двустворчатые моллюски, обитающие в определённых условиях

среды, способны концентрировать металлы в количестве до 105 % [Вязникова, Ковековдова, 2007].

Для морских организмов (моллюсков, ракообразных и других беспозвоночных), которых используют в пищевых целях, разработаны нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) токсикантов, в том числе мышьяка. По данным Технического регламента Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011), ПДК мышьяка в продовольственном сырье для моллюсков составляет $5,0 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ сырой массы [Технический..., 2011].

Анализ содержания загрязняющих веществ 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 [Goldberg's..., 2016]. За последние десятилетия проведено множество измерений концентраций загрязнителей, в частности, мышьяка, в тканях и раковинах разнообразных видов морских двустворчатых моллюсков. С целью уменьшения загрязнения культивируемых двустворчатых моллюсков поллютантами, в частности, мышьяком, необходимо учитывать факторы, влияющие на их биоаккумуляцию. Такими факторами могут быть условия окружающей среды, размер раковины и возраст моллюсков, стадия репродуктивного цикла, качество и количество пищи и др. 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. В связи с этим актуальным представляется определение накопления такого опасного поллютанта как мышьяк в мягких тканях и раковинах культивируемых мидий разных размерных групп для оценки возможных рисков для здоровья человека при потреблении мидийной продукции.

Проблема исследования. Как известно, морепродукты обладают

многими полезными свойствами для здоровья человека. Однако за последние несколько десятилетий общий уровень загрязняющих веществ в живых организмах увеличился, и морепродукты являются одним из источников воздействия загрязняющих веществ на человека при их пищевом потреблении. В настоящее время в прибрежных водах Крыма интенсивно развивается аквакультура двустворчатых моллюсков. Устойчивое развитие аквакультуры основано на выращивании безопасного продукта. Ряд веществ, опасных для здоровья человека, в том числе тяжелые металлы, могут накапливаться в культивируемых мидиях. Известно, что многие морские моллюски естественным образом накапливают поллютанты, даже когда их содержание ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) в воде [Mance, 1978; Wang, Lu, 2017; Stankovic, Jovic, 2012]. Многие исследователи определяют концентрации загрязнителей, в том числе мышьяка, 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 промышленный размер моллюсков имеет широкий диапазон.

Объект исследования: содержание мышьяка в культивируемых мидиях.

Предмет исследования: зависимость накопления мышьяка в мягких тканях и раковинах культивируемых мидий от размера их раковины.

Цель работы — исследовать накопление мышьяка культивируемыми черноморскими двустворчатыми моллюсками на примере мидии *Mytilus galloprovincialis*.

Формулировка гипотезы. Содержание мышьяка в мягких тканях мидий зависит от размера моллюска, тогда как раковина является консервативным органом в отношении накопления мышьяка. Культивируемые в прибрежье Севастополя мидии безопасны для здоровья человека при их потреблении.

Для достижения цели были сформулированы следующие задачи:

1. На основе литературных данных проанализировать концентрации мышьяка в прибрежных водах Черного моря, а также его содержание в органах

и тканях двустворчатых моллюсков.

2. Исследовать ассимиляцию мышьяка в мягких тканях культивируемых черноморских мидий разных размерных групп.

3. Исследовать ассимиляцию мышьяка в раковинах культивируемых черноморских мидий разных размерных групп.

4. Оценить риски для здоровья человека потребления мидий, культивируемых в прибрежье Севастополя.

Методы и методика. Для проведения исследования использованы следующие методы работы: морфометрические (измерение размера раковины, весовые характеристики раковин и мягких тканей мидий), биохимические (кислотная минерализация раковин и мягких тканей мидий, их биоотложений), статистические (определение средних значений исследуемых показателей, стандартной ошибки, достоверности полученных результатов).

Научная новизна полученных результатов. Проведен сравнительный анализ накопления мышьяка в мягких тканях и раковинах мидий разных размерных групп в динамике. Определены риски для здоровья человека при регулярном потреблении культивируемых мидий.

Теоретическое значение полученных результатов. Полученные результаты имеют теоретическое значение, так как вносят вклад в более глубокое понимание биологии мидий, участие двустворчатых моллюсков в круговороте загрязняющих веществ в море.

Практическое значение полученных результатов. Результаты представляют интерес для практикующих фермеров и потребителей морепродуктов, поскольку позволяют оценить качество получаемой мидийной продукции, что имеет значение в эффективности морского фермерства, а также оценить, существуют ли риски для здоровья человека при потреблении мидий, культивируемых в прибрежье Севастополя.

РАЗДЕЛ 1

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Мидии являются массовым моллюском Чёрного моря и перспективным объектом марикультуры. Экологические условия Чёрного моря благоприятны для обитания мидий, в связи с тем они распространены повсеместно и играют важную роль в биотическом круговороте вещества [Биология.., 1989].

В современных условиях всё возрастающего антропогенного воздействия на окружающую среду, и особенно на водные экосистемы, возникла необходимость объединения усилий ряда государств для определения чёткой генеральной политики в области стратегии оценки состояния морей и океанов и стратегии морских исследований. В ряде документов отмечается необходимость развития новых методологических приёмов и инструментальных подходов для выработки критериев оценки состояния здоровья экосистем, основанных на применении биологических методов. В последние 20 лет рядом исследований показана эффективность применения биомаркеров в индикации биологических эффектов загрязняющих веществ или их смесей на состояние экосистем. В связи с этим исследования последних лет отечественных и зарубежных учёных были направлены на выработку интегральных критериев и методов, основанных на биомаркерных показателях мидий и рыб (под биомаркером понимается ответная реакция организма на биологически значимое для него воздействие различной природы), а также определении концентраций загрязняющих веществ или их смесей в поверхностных седиментах и органах морских животных.

Исходя из выдвинутой британскими учёными парадигмы: «Здоровые животные – здоровая экосистема», такого рода биомаркерные исследования, проводимые на отдельных организмах (случайным образом взятых из природной популяции), позволяют распространить выводы на состояние популяции и, таким образом, опосредованно судить об экологическом

состоянии (здоровье) акватории, в которой обитают изучаемые животные – биологические «мишени» интегрального токсического действия загрязняющих веществ [Холодкевич и др., 2018].

Ранее было показано, что средние концентрации металлов в мягких тканях мидиях промыслового размера (размер раковины более 50 мм) не превышают ПДК для пищевых продуктов, за исключением мышьяка, концентрация которого в 2.2 раза превосходила ПДК. Коэффициенты вариации концентраций металлов довольно высокие для всех размерных групп мидий и изменялись от 37.8 до 97.1% [Поспелова и др., 2021]. Полученные концентрации были такими же или несколько превышали значения, приведенные для мидий природных и искусственных поселений из других регионов Чёрного моря. Исследование содержания As в тканях культивируемых мидий в данном и сопредельных районах не показало превышения ПДК, а максимальные концентрации были меньше 5 мкг/г сухой массы мягкой ткани. Отмечена высокая индивидуальная вариабельность концентраций всех элементов, включая мышьяк, и для мягких тканей, и для раковин. Такая изменчивость в накоплении металлов мидиями отмечена ранее и для других районов, что характерно как для культивируемых моллюсков, так и для мидий из природных популяций. Такой высокий уровень вариабельности может быть связан как с изменчивостью внешних факторов среды и с физиологическими особенностями организма (скорость фильтрации, стадия зрелости гонад, пол и т.д.).

Известно, что мидия *M. galloprovincialis* в условиях культивирования в Чёрном море достигает промысловых размеров за 1.5-2 года в зависимости от времени оседания личинок на коллекторы и внешних факторов. В период роста у моллюсков интенсивнее накапливаются микроэлементы, а с возрастом у них постепенно снижается метаболическая активность и концентрации в тканях стабилизируются около средних показателей, не превышающих ПДК [Поспелова и др., 2021].

РАЗДЕЛ 2

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Характеристика района исследований

Исследования проводили на экспериментальной мидийно-устричной ферме, созданной с участием ИнБЮМ, расположенной на внешнем рейде Севастопольской бухты в 700 м от берега на глубинах 5 – 10 м между бухтами Карантинная и Севастопольская (рис. 2.1). Севернее Севастопольской бухты в море впадает река Бельбек, непосредственно в бухту – река Чёрная. В непосредственной близости от фермы расположен аварийный выпуск хозяйственно-бытовых сточных вод.



Рисунок 2.1 Район расположения станции отбора проб на экспериментальной мидийной ферме.

Циркуляция вод в районе фермы определяется скоростью и направлением ветра, а также стоковыми водами из Севастопольской бухты. Вследствие значительной изменчивости ветровых условий, скорости течений на ферме невелики – от 5 до 20 см/с, но таких скоростей вполне достаточно для хорошего

обмена вод, т.е. ферма хорошо «вентируется» даже незначительным ветровым волновым перемешиванием. Для этого района характерны скрытые, не выходящие на поверхность сгонные процессы (апвеллинги), которые наблюдаются при устойчивых ветрах восточной и северо-восточной составляющей.

2.2 Материал и методы исследований

Мидий отбирали с коллекторов фермы по 40 – 60 экз., делили на размерные группы с длиной раковины: 5 см и более, 4-5 см, 3-4 см, 2-3 см. Отбор проб проводили в феврале, апреле, августе и октябре в периоды разного физиологического состояния моллюсков (период активного гаметогенеза, период массового нереста). Февраль – начало биологической весны на Черном море, T воды составляла $+9,2^{\circ}\text{C}$, гонады половозрелых моллюсков находились на стадии активного гаметогенеза, готовились к весеннему нересту. Апрель – массовое весеннее развитие фитопланктона и начало нереста мидий, T воды = $+10,4^{\circ}\text{C}$. К концу летнего сезона, в августе t воды максимальна - $+25,6^{\circ}\text{C}$, идет подготовка мидий к осеннему массовому нересту. В октябре при T воды = $+20,3^{\circ}\text{C}$ у части мидий продолжался осенний нерест, часть уже отнерестились.

Длину створок измеряли при помощи штангенциркуля. Мягкие ткани отделяли от раковин, взвешивали сырую ткань, после чего сушили в сухожаровом шкафу при $t=105^{\circ}\text{C}$ до постоянного веса.

Определение ТМ в пробах проводили с помощью сотрудников ФИЦ ИнБЮМ на базе ЦКП «Спектрометрия и Хроматография» методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре «PlasmaQuant MS Elite» (Analytik Jena AG, Германия). В качестве предварительной подготовки использовали кислотную минерализацию в растворе концентрированной 65% HNO_3 марки «ОСЧ», используя пробирки из фторопласта. Полученный минерализат выпаривали досуха, сухой остаток растворяли в бидистиллированной воде (4-5 мл) и использовали для анализа.

Расчет рисков для здоровья человека

К большому сожалению, в России мидии ещё не доступны широким слоям населения, в то время как в других странах потребление мидий составляет до нескольких килограммов на человека в год (в Нидерландах, к примеру, это число достигает 8-12 кг на человека в год).

Оценка содержания микроэлементов в мидиях проводилась на основе законодательства РФ [Предельно..., 1986], которое устанавливает предел допустимого содержания мышьяка в пищевых продуктах = 10 мкг/г сухого веса или 2 мкг/г сырого веса. Что касается оценки риска при потреблении человеком мидий, подход был основан на нескольких показателях, из которых мы выбрали следующие: целевой риск рака (TCR), целевой коэффициент опасности (THQ). Все эти индексы были рассчитаны в соответствии с рекомендациями, предложенными USEPA (2010). При этом различаются потребители низкого уровня (ALM) и потребителями высокого уровня (HLM), соответственно, 17,86 г/день и 35,71 г/день мидий. Все индексы учитывали массу тела 60 кг для взрослого человека и были рассчитаны с концентрацией мышьяка, полученной из сырой массы мидий и устриц [Yap et al., 2003, 2016].

Коэффициент целевого риска (THQ): расчет этого индекса описано в USEPA (2000), а $THQ > 1$ предполагает потенциальный риск для здоровья человека:

EF = частота воздействия (365 дней в году); ED = продолжительность воздействия (70 лет); CR = скорость потребления (ALM = 17,86 г/день; HLM = 35,71 г/день); MC = концентрации мышьяка в мидиях (ww); ORF = пероральная эталонная доза для мышьяка (по (USEPA(2015) равна 0,3); ABW = средняя масса тела (и взрослый 60 кг); AET = среднее время воздействия (365 дней × 70 лет).

Целевой $TCR = \frac{EF \times ED \times CR \times MC \times CPSo}{ABW \times AETc} \times 10^{-3}$ риск рака (TRC):
этот индекс оценивает

вероятность чрезмерного риска рака из-за воздействия потенциально токсичного элемента на протяжении всей жизни. В настоящем исследовании TCR был рассчитан для мышьяка на основе коэффициента канцерогенной активности при приеме внутрь (CPSo), установленного USEPA (2015), 1,5 мг/кг/день.

EF = частота воздействия (365 дней в году); ED = продолжительность воздействия (70 лет); CR = скорость потребления (ALM = 17,86 г/день; HLM = 35,71 г/день); MC = концентрации металлов в мидиях; CPSo = коэффициента канцерогенной активности при приеме внутрь; ABW = средняя масса тела (и взрослый 60 кг); AET = среднее время воздействия канцерогена (365 дней × 70 лет).

2.3 Математическая обработка данных

Рассчитывали среднее, стандартное отклонение и доверительный интервал.

Рассчитаны коэффициенты накопления (K_n) металлов в мидиях по формуле: $K_n = C_m/C_w$, где C_m – концентрация металлов в моллюсках, C_w – концентрация металлов в воде.

Концентрацию металлов в воде не измеряли, а воспользовались литературными данными [Поспелова и др., 2022].

РАЗДЕЛ 3

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для понимания зависимости веса мягких тканей от длины раковины моллюска была построена кривая степенной зависимости (рисунок 3.1).

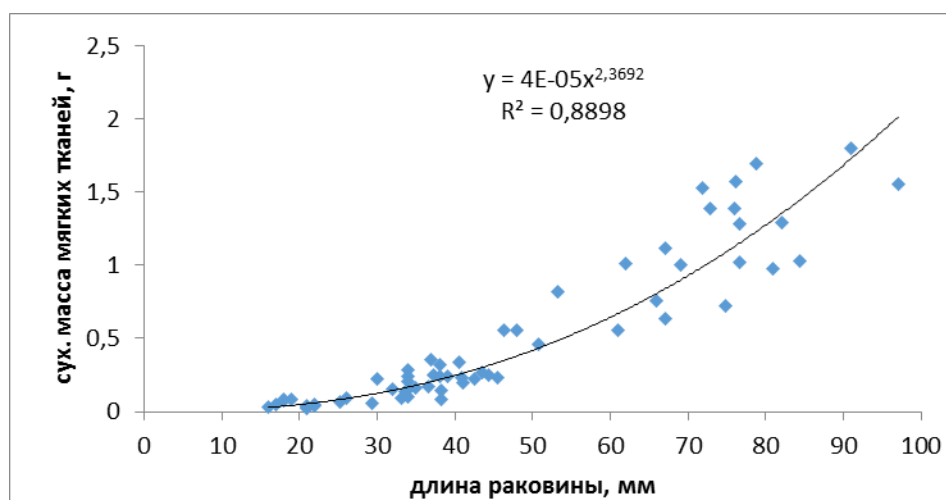


Рисунок 3.1 – Зависимость сухого веса мягких тканей от длины раковины мидии

Показано, что сухая масса мягких тканей прямо пропорционально зависит от размера моллюска (длины раковины L) – коэффициент детерминации составил $R=0,89$. В связи с этим мы предположили, что накопление мышьяка в тканях мидий может увеличиваться с увеличением веса мягких тканей и/или размера раковины.

3.1 Аккумуляция мышьяка в мягких тканях разноразмерных мидий

Исследовали накопление мышьяка в мягких тканях культивируемых мидий разных размерных групп. Показано, что накопление этого элемента не зависит ни от веса мягких тканей (рисунок 3.2А), ни от размера моллюска (рисунок 3.2Б).

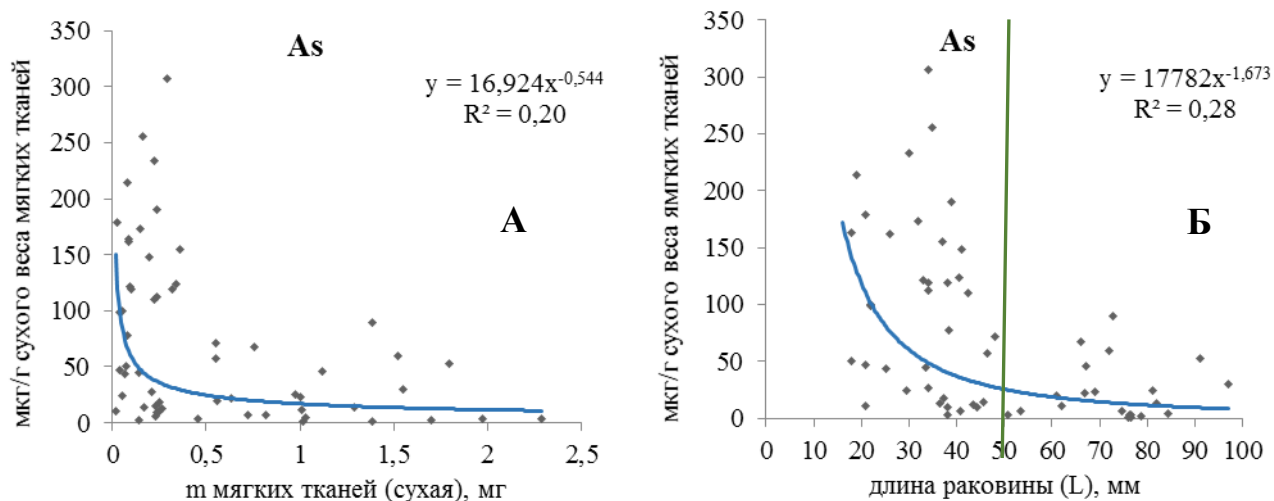


Рисунок 3.2 – Зависимость накопления мышьяка в тканях мидий в зависимости от веса тканей (А) и длины раковины (Б)

Коэффициент детерминации R составил 0,2 и 0,28 соответственно. Т.е. мы не можем констатировать достоверную взаимосвязь между концентрацией мышьяка в тканях моллюсков и длиной их раковины и весом мягких тканей. Можно лишь отметить тенденцию. Вероятно, есть более значимые факторы, влияющие на накопления мышьяка в мягких тканях культивируемых мидий.

Однако мы отметили, что максимальные концентрации мышьяка накапливались у моллюсков непромыслового размера – с длиной раковины менее 50 мм (рисунок 3.2Б). Известно, что длины раковины 50 мм культивируемые в Черном море мидии достигают после 1,5 лет выращивания [Биология..., 1989]. После этого срока скорость роста замедляется. Аналогичная ситуация с массой мягких тканей. Максимальные концентрации мышьяка отмечены у моллюсков с весом мягких тканей менее 0,5 г (рисунок 3.2А).

В связи с вышеизложенным мы проанализировали сезонное накопление мышьяка в тканях моллюсков непромыслового ($L_{\text{раковины}} < 50$ мм) и промыслового ($L_{\text{раковины}} > 50$ мм) размеров. Тем более это важно при оценке возможной опасности потребления мидий фермы для здоровья человека. Данные приведены на рисунке 3.3.

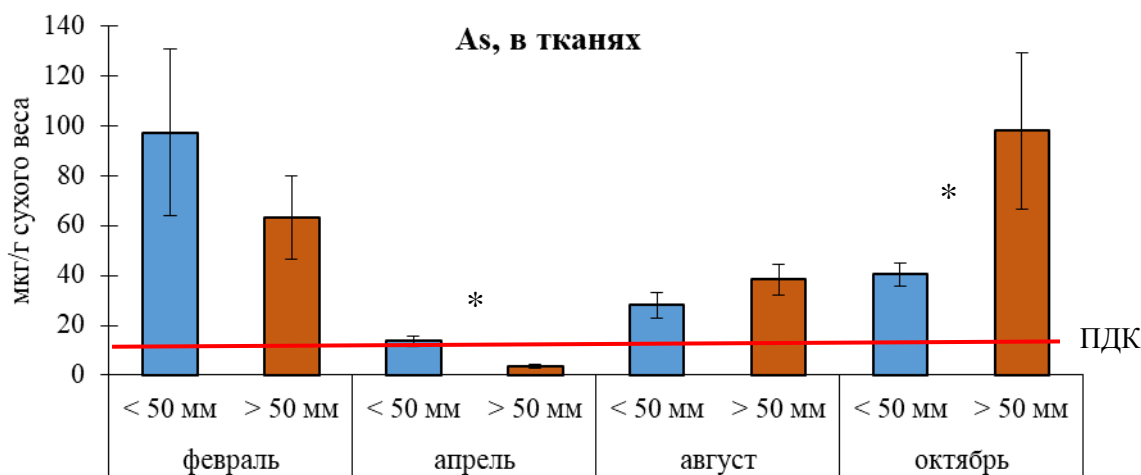


Рисунок 3.3 Концентрация мышьяка в мягких тканях промысловых и непромысловых культивируемых мидий (* - различия достоверны при $p < 0,05$)

Показано, что в зимний и весенний период при низкой температуре морской воды ($+9,2 - +10,4^{\circ}\text{C}$) в большей степени накапливают мышьяк более непромысловые моллюски. В феврале концентрация мышьяка во обеих группах моллюсков значительно (в 5-13 раз) превышала ПДК для морепродуктов [Предельно..., 1986]. Достоверные различия получены в апреле – в период массового весеннего нереста мидий (рисунок 3.3). Весной же и концентрация мышьяка была самой низкой за весь период исследований и практически не превышала ПДК. В августе значимых различий в накоплении мышьяка между двумя группами мидий не отмечено, превышение ПДК составило 2,5-4 раза. В период осеннего нереста мы видим, что промысловые моллюски накапливали мышьяк в 2,5 раза интенсивнее ($p < 0,05$), чем непромысловые. Это можно объяснить тем, что промысловые моллюски к этому времени отнерестились и относительная концентрация As (на грамм веса) увеличилась, тогда как непромысловые еще не приступили к нересту, вес их мягких тканей увеличился в связи со значительным ростом гонад и, соответственно, относительная концентрация As (на грамм веса) была ниже. ПДК было превышено в 4-12 раз.

Поскольку мидий используют в мониторинговых исследованиях для определения фонового содержания загрязнителей в воде, следует отбирать

пробы моллюсков разных размерных групп. Также 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.

3.2 Аккумуляция мышьяка в раковинах разноразмерных мидий

Предполагали, что раковина является консервативным органом и содержание мышьяка в ней не изменяется в течение года. Однако это оказалось не так. Максимальные концентрации этого элемента в раковине показаны в августе, минимальные – в апреле (различия достоверны при $p < 0,05$) (рисунок 3.4).

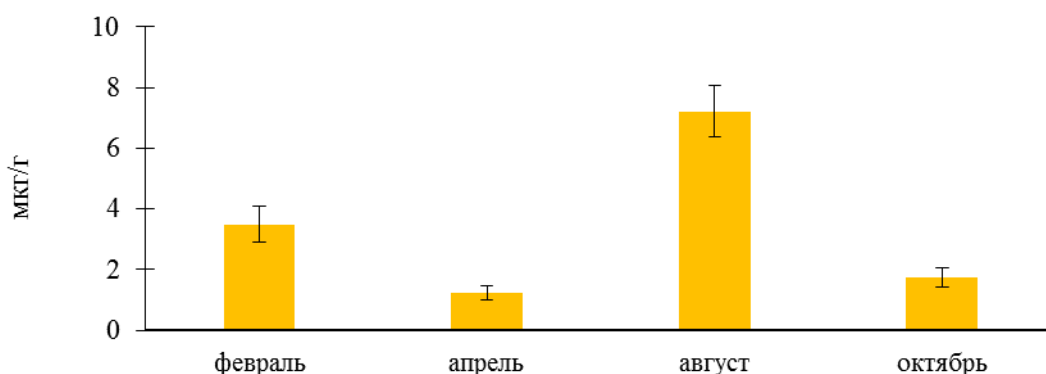


Рисунок 3.4 Сезонное накопление мышьяка в раковинах культивируемых мидий

Провели сравнительный анализ содержания мышьяка в тканях и раковинах мидий (рисунок 3.5).

Показано, что ткани (в мкг/г) накапливают на порядок больше мышьяка, чем раковина (рисунок 3.5А). Однако, если рассчитать эти данные на экземпляр моллюска, то мы видим, что в мягких тканях одновременно содержится от 30 до 55% мышьяка, в раковинах – 45-70% (рисунок 3.5Б). Т.е. наибольший вклад в общее накопление мышьяка в мидий вносят мягкие ткани, при этом концентрация элемента в них зависит от физиологического состояния и от сезона. В долевым соотношении и мягкие ткани и раковина вносят практически

одинаковый вклад в содержания мышьяка в мидии, и раковина является более консервативным органом, чем ткани.

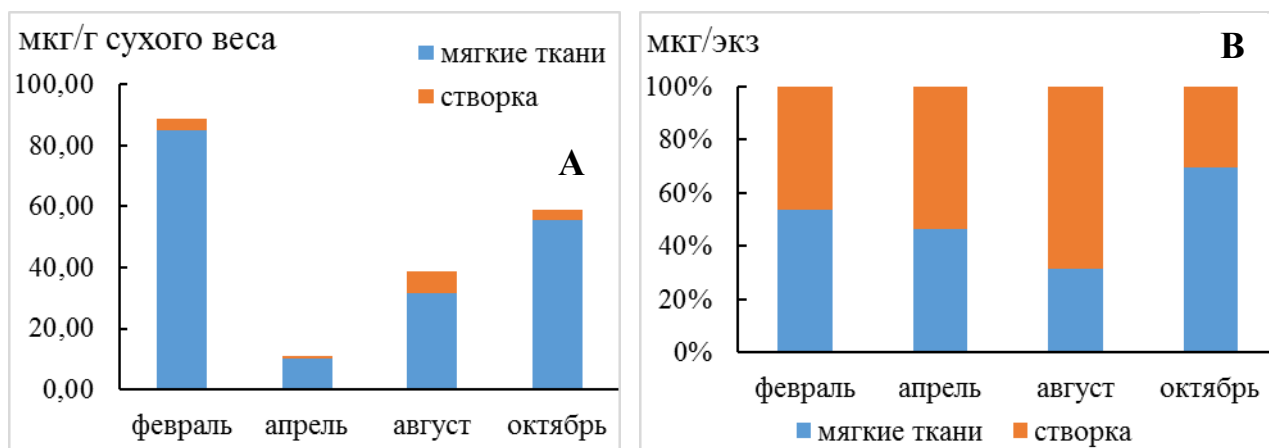


Рисунок 3.5 Накопление мышьяка в тканях и раковинах мидий

3.3 Оценка рисков для здоровья человека

Настораживает тот факт, что концентрация мышьяка в мягких тканях моллюсков превышает ПДК для пищевых продуктов. Мы предположили, что это может быть связано с высокой концентрацией этого элемента среде. Для этого мы воспользовались литературными данными [Поспелова и др., 2022] и рассчитали коэффициенты накопления мышьяка мидиями в сезонном аспекте (рисунок 3.6). Коэффициент накопления для тканей варьировал от $8,3 \cdot 10^4$ (в апреле) до $17,3 \cdot 10^5$ (августе), для раковины эти значения составили от $9,9 \cdot 10^3$ до (октябре) до $4,0 \cdot 10^5$.

Таким образом, мягкие ткани накапливают мышьяк с большей интенсивностью, чем раковины и это может нанести ущерб здоровью человека при потреблении мидий с высокой концентрацией мышьяка.

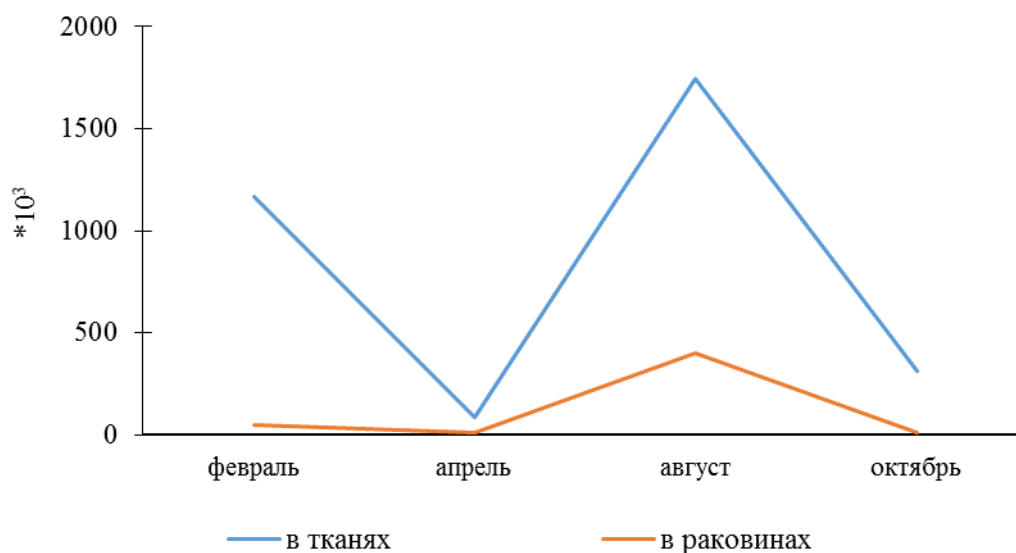


Рисунок 3.6 Коэффициент накопления мышьяка в мягких тканях и раковинах культивируемых мидий

Как было указано в главе Материал и методы, для оценки рисков для здоровья человека при потреблении культивируемых мидий, мы рассчитали коэффициент целевого риска (THQ) и целевой риск рака (TRC) при потреблении моллюсков потребителями среднего уровня (ALM) и потребителями высокого уровня (HLM) (по европейской шкале).

Известно, что в морской воде преобладающей формой является As(V) – арсенатная форма [Vieira et al., 2021]. Эта форма менее токсична и считается менее подвижной в окружающей среде, чем арсенидная - As(III). Несмотря на низкие концентрации мышьяка в морской воде, в морепродуктах могут быть обнаружены значительно более высокие значения, как в нашем исследовании. Это может быть связано с переходом неорганического мышьяка в его органические формы в морской пищевой сети. Соединения мышьяка в морепродуктах делятся на классы в зависимости от их структуры и свойств, и среди этих веществ (AB) в большинстве моллюсков В двусторчатых моллюсках основным видом мышьяка является арсенобетаин (AB), значительная доля которого растворима. Арсенобетаин является очень стабильным соединением для распада или метаболизма, и его источник и образование в пищевой сети до сих пор неясны. Воздействие на человека As

для населения, не подвергающегося профессиональному воздействию, проявляется при потреблении элемента с пищей. Взаимосвязь между As и тенденцией к увеличению заболеваемости раком среди населения является объектом ряда исследований [Yap et al., 2011; Vieira et al., 2021]. Считают, что загрязняющие элементы, считающиеся неканцерогенными, должны иметь пороговое значение, ниже которого не будет наблюдаться никаких неблагоприятных последствий для здоровья. С другой стороны, предполагается, что канцерогены не имеют эффективного порогового значения, что означает существует риск развития рака даже при воздействии низких доз [Yap et al., 2011].

Целевой коэффициент опасности (THQ) >1 означает, что уровень воздействия элемента превысил ORF , и, следовательно, ежедневное воздействие на таком уровне должно вызывать проблемы со здоровьем человека на протяжении всей жизни, если человек потребляет эти загрязненные организмы.

Наши данные показали, что для потребителей среднего уровня во все сезоны $THQ < 1$. При высоком уровне потребления в летне-осенний период THQ составил 1,17-1,57 (при употреблении промысловых моллюсков) (таблица 3.1).

Таблица 3.1 Целевой коэффициент опасности (THQ) для человека при

THQ / период	февраль	апрель	август	октябрь	среднегодовое значение
для потребителей среднего уровня					
для промысловых мидий	0,38	0,002	0,80	0,58	0,44
для непромысловых мидий	0,56	0,01	0,59	0,24	0,35
для потребителей высокого уровня					
для промысловых мидий	0,75	0,004	1,57	1,17	0,86
для непромысловых мидий	1,10	0,02	1,12	0,58	0,69

потреблении культивируемых мидий

Это может свидетельствовать о проблемах с риском для здоровья для активных любителей морепродуктов при употреблении этих мидий. Среднегодовые значения ТНҚ при этом для всех потребителей остаются в пределах нормы.

Поскольку в России уровень потребления мидий гораздо ниже среднеевропейского, опасности для здоровья россиян мидии, выращенные в прибрежье Севастополя, не представляют.

Так как мышьяк является канцерогенным элементом, мы рассчитали также такой коэффициент, как целевой риск развития рака (TRC) при регулярном потреблении мидий (таблица 3.2). Этот индекс показывает незначительный риск развития рака у человека, если значения $TCR < 10^{-6}$, значения $10^{-6} < TCR < 10^{-4}$ считаются приемлемыми, а $TCR < 10^{-4}$ считается порогом риска развития рака при употреблении пищи, загрязненной мышьяком.

Таблица 3.2 Целевой риск рака (TRC) для человека при потреблении культивируемых мидий

TRC / период	февраль	апрель	август	октябрь	среднего- довое значение
для потребителей среднего уровня					
для промысловых мидий	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
для непромысловых мидий	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
для потребителей высокого уровня					
для промысловых мидий	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$
для непромысловых мидий	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$

Наши исследования показали, что TCR для As был $< 10^{-4}$ для потребителей мидий как среднего, что свидетельствует о высоком риске заболевания раком при регулярном потреблении мидий, если скорость их

потребления составляет 17,86 - 35,71 г/день. Однако, как мы уже указывали, в России уровень потребления мидий на порядок ниже, чем в Европе, поэтому риск заболевания не так высок. И все же полученные данные вызывают беспокойство. И это требует постоянного мониторинга содержания токсичных элементов в объектах марикультуры.

ВЫВОДЫ

1. Накопление мышьяка в мягких тканях культивируемых мидий слабо зависит от веса мягких тканей и от размера моллюска. Однако показано, что максимальные концентрации мышьяка накапливались у моллюсков непромыслового размера (длина раковины менее 50 мм) и сухим весом мягких тканей менее 0,5 г. Концентрация мышьяка у промысловых и непромысловых моллюсков в феврале, августе и октябре 3-13 раз превышала ПДК для пищевых продуктов.

2. Поскольку мидий используют в мониторинговых исследованиях для определения фонового содержания поллютантов в воде, следует отбирать пробы моллюсков разных размерных групп. Также необходим контроль содержания токсичных элементов как в культивируемых мидиях промыслового размера, так и для моллюсков других размерных групп, особенно, если они используются для производства биологически активных добавок, кормов и т.д.

3. Наибольший вклад в общее накопление мышьяка в мидиях вносят мягкие ткани, при этом концентрация элемента в них, вероятно, зависит от физиологического состояния моллюсков и от сезона. В долевом соотношении (в % от абсолютного содержания, мкг/экз) и мягкие ткани, и раковина вносят практически одинаковый вклад в содержания мышьяка в мидии, и раковина является более консервативным органом в отношении накопления мышьяка, чем ткани.

4. Целевой коэффициент опасности (ТНҚ) для здоровья человека при потреблении мидий показал, что ежедневное потребление мидий на среднеевропейском уровне не должно вызывать проблемы со здоровьем человека на протяжении всей жизни, если человек потребляет мидии, содержащие мышьяк в концентрациях до 100 мкг/г сухого веса мягких тканей.

5. Индекс целевого риска развития рака у потребителей мидий, выращенных на взморье Севастополя свидетельствует о высоком риске заболевания раком при регулярном среднеевропейском потреблении мидий 17,86 - 35,71 г/день.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Akter K. F. et al. Arsenic speciation and toxicity in biological systems //Reviews of environmental contamination and toxicology. – 2005. – С. 98.
- 2 Borak J., Hosgood H. D. Seafood arsenic: implications for human risk assessment. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2007, vol. 47, no. 2, pp. 204–212.
- 3 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>
- 4 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>
- 5 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>
- 6 USEPA, 2000. Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories. EPA-823-B-00-007. Available online at:. In: *Fish Sampling and Analysis*, third ed. Vol. 1. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC
<http://www.epa.gov/region6/qa/qadevtools/mod4references/supplemental/volume1.pdf>.
- 7 USEPA, 2010. Toxicological review of inorganic arsenic (CAS No. 7440-38-2) EPA/635/R-10/001 (draft document)
- 8 USEPA, 2015. Human health risk assessment. Regional screening level (RSL) — summary table. (Available online at: http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rbconcentration_table/Generic_Tables/docs/master_sl_table_run_JAN2015.pdf).
- 9 Vieira, K. S., Delgado, J. F., Lima, L. S., Souza, P. F., Crapez, M. A. C., Correa, T. R., & Fonseca, E. M. Human health risk assessment associated with the consumption of mussels (*Perna perna*) and oysters (*Crassostrea rhizophorae*)

- contaminated with metals and arsenic in the estuarine channel of Vitória Bay (ES), Southeast Brazil. *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Т. 172. С. 112877. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112877>
- 10 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>
- 11 Yap, C.K., Azmizan, A.R., Hanif, S., 2011. Biomonitoring of trace metals (Fe, Cu, and Ni) in the mangrove area of Peninsular Malaysia using different soft tissues of flat tree oyster *isognomon alatus*. *Water Air Soil Pollut.* 218 (1), 19–36. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0621-8>
- 12 Yap, C.K., Cheng, W.H., Karami, A., Ismail, A., 2016. Health risk assessments of heavy metal exposure via consumption of marine mussels collected from anthropogenic sites. *Sci. Total Environ.* 553, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.092>
- 13 Биология культивируемых мидий. [В. Н. Иванов, В. И. Холодов, М. И. Сеничева и др.]. К.: Наук. думка, 1989. 100 с.
- 14 Вязникова К. С., Ковековдова Л. Т. Содержание металлов и мышьяка в культивируемом приморском гребешке (*Mizuhopecten yessoensis*) и влияние марикультурного хозяйства в заливе Петра Великого на содержание тяжелых металлов в донных отложения. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство.* – 2016. – №. 3. – С. 109.
- 15 Поспелова Н. В., Егоров В. Н., Проскурнин В. Ю., Приймак А. С. Взвешенное вещество как биогеохимический барьер для тяжёлых металлов в районах размещения морских ферм (Севастополь, Чёрное море). *Морской биологический журнал*. 2022. Т. 7, № 4. С. 55-69. <https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.4.05>
- 16 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. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-4-67-80> [РИНЦ 0.459].
- 17 Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах (утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 31 марта 1986 г. N 4089-86) (режим доступа <https://base.garant.ru/71376186/38d0e20d10a9099ed1e190abf152a12a/> Проверено 15.12.2022)
- 18 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. Т. 2. №. 3. – С. 68.
- 19 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011). Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г., № 880.
- 20 Холодкевич Сергей Викторович, Кузнецова Татьяна Владимировна, Куракин Антон Сергеевич, Солдатов Александр Александрович, Гостюхина Ольга Леонидовна, Головина Ирина Владимировна, Андреевко Татьяна Ивановна, Кирин Максим Петрович Новый методологический подход к оперативной оценке экологического состояния прибрежных морских акваторий // Известия ТИНРО. 2018. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-metodologicheskiiy-podhod-k-operativnoy-otsenke-ekologicheskogo-sostoyaniya-pribrezhnyh-morskih-akvatoriy>.