

НАКОПЛЕНИЕ И ВЫВЕДЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ ДВУСТВОРЧАТЫМИ МОЛЛЮСКАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Л. Ф. Павленко, Н. С. Анохина, Т. О. Барабашин

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия
E-mail: anohinans@azniirkh.vniro.ru

Аннотация. Бентосные организмы относятся к важнейшим компонентам водной экосистемы, участвующим в круговороте веществ и самоочищении водоема. Рядом авторов отмечена положительная корреляция между содержанием токсикантов в бентосных организмах и местом их обитания, в связи с чем часто предлагается использовать различные виды донных беспозвоночных в качестве индикаторов при мониторинге загрязнения водных экосистем. Моллюски легко аккумулируют, но сравнительно медленно выводят углеводороды (УВ) из организма в связи с отсутствием или, по крайней мере, слабым развитием углеводород-гидроксилазной детоксицирующей системы. Объектом исследования служили двустворчатые моллюски вида *Mytilus galloprovincialis*, которые активно участвуют в процессе фильтрации придонной воды и контактируют с загрязненным грунтом. Этот вид моллюсков, имеющий кормовую ценность, широко распространен среди организмов зообентоса Азовского и Черного морей. В экспериментах использован *M. galloprovincialis* среднего размера длиной 3–4 см, выращенный на коллекторах в условно чистом районе вблизи м. Б. Утриш. Проведены две серии экспериментов с различной экспозицией: краткосрочная (5 суток) и более длительная (21 сутки). В экспериментах использовали донные отложения (ДО) различной степени загрязненности: 0,03; 0,5; 0,6; 1,0; 2,5 и 5,0 г/кг сухой массы нефтепродуктов (НП). В ходе лабораторных экспериментов установлено, что в мягкой ткани мидий динамика накопления и последующего выведения углеводородов зависит от уровня загрязненности донных отложений.

Ключевые слова: *Mytilus galloprovincialis*, индикаторы, нефтяное загрязнение, мониторинг

ACCUMULATION AND EXCRETION OF HYDROCARBONS IN BIVALVE MOLLUSCS DEPENDING ON THE LEVEL OF THE OIL POLLUTION OF BOTTOM SEDIMENTS

L. F. Pavlenko, N. S. Anokhina, T. O. Barabashin

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI "VNIRO"),
Azov-Black Sea Branch of the FSBSI "VNIRO" ("AzNIIRKH"), Rostov-on-Don 344002, Russia
E-mail: anohinans@azniirkh.vniro.ru

Abstract. Benthic organisms are among the crucial components of an aquatic ecosystem, taking part in the circulation of matter and facilitating self-purification processes in water bodies. A number of researchers indicate a positive correlation between the content of toxicants in benthic organisms and their habitat, which leads to recommendations to use various species of bottom invertebrates as indicators for the pollution monitoring of aquatic ecosystems. Molluscs accumulate hydrocarbons (HC) at a higher rate than they excrete them from their body due to the absence or, at least, low development of the hydrocarbon hydroxylase detoxification system. Bivalve molluscs *Mytilus galloprovincialis*, a species actively involved in the filtration of the bottom water layer and coming into contact with polluted

substrate, served as a subject for this investigation. This mollusc species is a valuable food source; as a part of the Azov and Black Sea zoobenthos community, it is widely spread and abundant. The experiments have been conducted on *M. galloprovincialis* individuals of the average length of 3–4 cm cultivated on the mussel collectors in the acceptably pure waters in the area near Bolshoy (Big) Utrish Cape. Two series of the experiments with different exposition time have been conducted: the short-term one (5 days) and a longer one (21 days). During the experiments, the bottom sediments (BS) of various pollution level were used: 0.03, 0.5, 0.6, 1.0, 2.5, and 5.0 g/kg petroleum products, dry weight. Following the laboratory tests, it has been found that the dynamics of accumulation and subsequent extraction of hydrocarbons from the soft tissues in mussel is dependent on the pollution level of bottom sediments.

Keywords: *Mytilus galloprovincialis*, indicators, oil pollution, monitoring

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения являются местом обитания бентосных организмов, которые относятся к важнейшим компонентам водной экосистемы, участвующих в круговороте веществ и самоочищении водоема. За счет высокой фильтрационной активности и локализации на дне водоема донные беспозвоночные обладают повышенной способностью к накоплению токсикантов, содержащихся в водной среде и донных отложениях. Ряд авторов отмечают положительную корреляцию между содержанием токсикантов в бентосных организмах и местом их обитания — донных осадках, поэтому довольно часто предлагается использовать различные виды донных беспозвоночных (в частности двустворчатых моллюсков) в качестве индикаторов при мониторинге загрязнения морской среды [1–7].

Одним из наиболее распространенных видов антропогенного воздействия на водные биоресурсы является нефтяное загрязнение. Накопление нефтяных компонентов в бентосных организмах происходит при поглощении в процессе питания, при фильтрации, а также в результате остальных процессов биосорбции — при контакте органов и тканей гидробионтов с токсикантами, находящимися в воде в растворенном и взвешенном состоянии или сорбированными ДО. На степень накопления гидробионтами индивидуальных УВ влияют их физико-химические свойства, в первую очередь степень липофильности, а также тип питания гидробионтов (фильтраторы, детритофаги или плотоядные).

Сведения по составу и содержанию УВ в морских организмах довольно отрывочны, касаются лишь отдельных классов соединений, отдельных акваторий, выполнены авторами с применением различных методов исследования, в результате чего получены трудно сопоставимые данные [8]. Литературные сведения, касающиеся изучения вопросов рассеяния, аккумуляции, детоксикации, трансформации морскими организмами также весьма противоречивы и ограничены. Противоречивость имеющихся данных с одной стороны связана со сложностью и зависимостью от многих условий процессов трансформации углеводов (УВ), а с другой стороны — с трудностями методического характера, обусловленными многочисленностью УВ, имеющих различное строение и свойства, которые положены в основу их аналитического определения.

Все превращения поступивших в организм УВ происходят на фоне биосинтеза и биохимической динамики природных УВ, содержащихся в органах и тканях живых организмов, называемых биогенными углеводородами. Присутствие в гидробионтах собственных УВ является одной из методических трудностей, с которыми приходится сталкиваться при изучении накопления нефтяных УВ в морских организмах.

По мнению ряда авторов, в связи с отсутствием или, по крайней мере, слабым развитием углеводород-гидроксилазной детоксицирующей системы моллюски легко аккумулируют, но сравнительно медленно выводят из организма поступившие УВ [9]. Предпосылкой к использованию мидий в качестве индикаторов для оценки загрязнения водных экосистем является широкое распространение моллюсков в морской среде, и особенно в прибрежной зоне, прикрепленный образ жизни, высокая фильтрационная активность, а также низкий процент биотрансформации УВ, приводящий к аккумуляции органических загрязнителей.

Установление количественных зависимостей между загрязнением среды обитания гидробионтов, поступлением в водоем различных поллютантов и потерями биоресурсов является одной из наиболее

актуальных задач рыбохозяйственной науки. Решение ее непосредственно зависит от того, насколько полно и точно получаемая информация о распространении и динамике состава поллютантов в основных элементах экосистемы отражает ее реальное состояние.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования включали изучение степени накопления и выведения УВ двустворчатыми моллюсками, находящихся в контакте с ДО различной степени загрязненности. Объектом исследования служили двустворчатые моллюски *Mytilus galloprovincialis*, которые активно участвуют в процессе фильтрации придонной воды и контактируют с загрязненным грунтом. Этот вид моллюсков, имеющий кормовую ценность, широко распространен среди организмов зообентоса Азовского и Черного морей. В экспериментах использовали *M. galloprovincialis* среднего размера длиной 3–4 см. Проведены две серии экспериментов с различной экспозицией — 5 суток и 21 сутки. В экспериментах использовали ДО различной степени загрязненности: в первой серии — 0,03; 0,5 и 1,0 г/кг; во второй серии — 0,03; 0,6; 2,5 и 5,0 г/кг сухой массы НП. Данные концентрации были выбраны в соответствии с результатами многолетнего мониторинга нефтяного загрязнения ДО Азовского моря [10]. Концентрации 1,0; 2,5 и 5,0 г/кг характерны для районов повышенной антропогенной активности и иногда фиксируются в сильно загрязненных районах, портах, в местах сброса канализационных стоков промышленных предприятий и т. п. В качестве контроля взяты условно чистые ДО, содержащие 0,03 г/кг — это минимальное количество НП, обнаруживаемое в осадках моря. При этом, гранулометрический состав используемых в эксперименте осадков относился к одному типу и был представлен ракушей, песком и илом в соотношении 40:40:20 в первой серии экспериментов и 45:45:10 — во второй. В каждом аквариуме экспонировалось по 14 мидий. В аквариумах проводилась непрерывная аэрация, содержание кислорода в воде микрокосмов находилось на уровне 7,0–7,2 мг/л, в аквариальной поддерживался стабильный температурный режим (21–22 °С).

Пробы воды, ДО и моллюсков отбирали ежедневно в первой серии экспериментов и на 1, 3, 5, 7, 10, 14 и 21 сутки — во второй. Мягкие ткани мидий после отбора замораживали в жидком азоте. Пробы анализировали в 5 повторностях. Определение УВ в моллюсках проводили с использованием разработанной методики, основанной на экстракции ацетонитрилом и 2-кратной очистке экстракта на оксиде алюминия, импрегнированном гидроксидом натрия. Количество выделенных УВ определяли по интенсивности люминесценции при $\lambda_{\text{возб}}=370$ нм и $\lambda_{\text{люм}}=460$ нм, ПАУ — методом ВЭЖХ. В качестве стандарта для калибровки приборов использовали УВ, выделенные из льяльной воды.

Определение УВ в воде и ДО проводили с использованием методик, зарегистрированных в Федеральном информационном фонде единства измерений под шифрами ФР.1.31.2005.01511 и ФР.1.31.2005.01512; УВ и ПАУ в моллюсках — под шифрами ФР.1.31.2013.15609 и ФР.1.31.2011.10982 [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первой серии экспериментов концентрации УВ в воде, отобранной из аквариумов с ДО различной степени загрязненности, к концу эксперимента уменьшились. При этом, в опытах с более загрязненными ДО (1,0 г/кг) максимальная концентрация УВ в воде отмечена на 2 сутки. В опытах с осадками, содержащими 0,5 г/кг — на 4 сутки (рис. 1).

Уменьшение концентраций УВ связано с осаждением взвешенных мелкодисперсных частиц, однако основное значение в очищении воды имели помещенные в аквариумы мидии. Физиологические особенности мидий таковы, что в процессе фильтрации мидии не пропускают через пищеварительную систему крупные минеральные и другие частицы (в частности, взвешенные в толще воды донные отложения), а, обволакивая, тут же сбрасывают их в виде псевдофекалий, тогда как почти все мелкодисперсные и растворимые компоненты проходят «переработку» в организме. В течение эксперимента вокруг мидий появлялись «кучки» взвешенных частиц, которые мидии отфильтровывали при всасывании воды. Ротовое отверстие мидий состоит из двух трубочек (сифонов). Через один сифон всасывается морская вода со всеми взвешенными в ней частицами, которые оседают в специальном аппарате

моллюска, а через другой очищенная морская вода поступает обратно в море. При этом, пропуская через фильтрационный аппарат взвесь, непригодную для питания, мидии выделяют слизь, которая обволакивает такие компоненты, и выделяют ее наружу, образуя псевдофекалии. Таким же образом мидии поступают и с избытком корма. Могут также наблюдаться процессы биоконцентрирования вторичного загрязнения. У моллюсков значительное количество органического вещества, в том числе и УВ, остается в фекалиях и псевдофекалиях, которые могут являться пищей для специально адаптированных организмов.

Максимальное накопление УВ (парафиновые, нафтенные и ароматические) в мягкой ткани мидий было отмечено на 3 сутки эксперимента (рис. 2). К концу эксперимента концентрации УВ в мидиях или остались на уровне, обнаруженных на 3 сутки, или уменьшились.

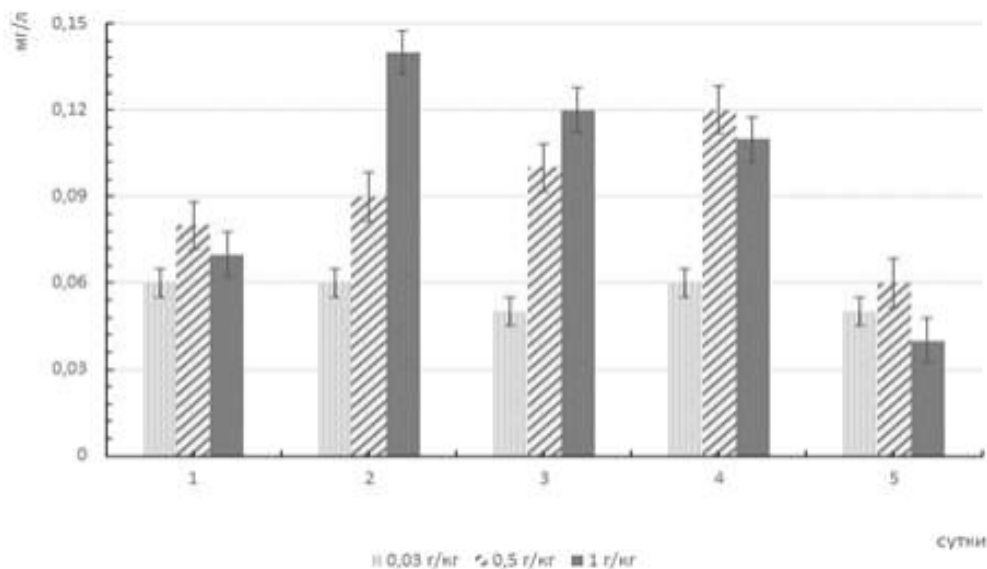


Рис. 1. Динамика концентраций УВ в воде аквариумов (мг/л), содержащих ДО различной степени загрязненности (0,03; 0,5 и 1,0 г/кг сухой массы)

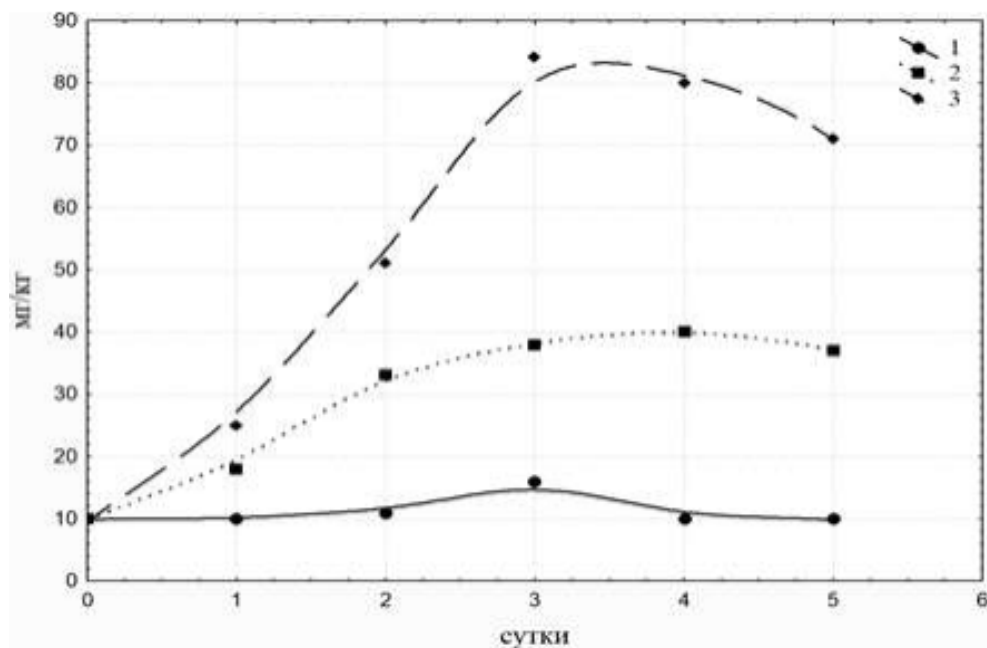


Рис. 2. Накопление УВ в мягкой ткани *M. galloprovincialis* в аквариумах с донными отложениями различной степени загрязненности, мг/кг: 1 — контроль (0,03 г/кг); 2 — 0,50 г/кг; 3 — 1,00 г/кг сухой массы

На 5 сутки эксперимента под влиянием загрязненных ДО (концентрации 0,5 и 1,0 г/кг) наблюдались достоверные изменения физиологических показателей мидий. При концентрации НП в ДО 1,0 г/кг содержание общего водорастворимого белка в мягких тканях мидий снизилось на 25,6 % по сравнению с контрольным уровнем. Активность трансаминаз была заметно снижена относительно контрольных показателей — аспаратаминотрансферазы (АсАТ) на 38,7 и 39,0 % соответственно в вариантах опыта с концентрациями НП в ДО 0,5 и 1,0 г/кг, аланиаминотрансферазы (АлАТ) — на 42,9 % (концентрация НП в ДО 1,0 г/кг). Изменения активности ферментов, регулирующих направленность аминокислотного обмена, наблюдались на фоне повышения активности АлАТ и АсАТ в контроле к концу экспозиции [12]. Вероятнее всего, на изменение биохимических показателей моллюсков оказывают ПАУ, которые устойчивы к процессам биodeградации и являются наиболее токсичным компонентом.

Во второй серии экспериментов длительностью 21 сутки в воде на протяжении всей экспозиции отмечено постепенное уменьшение концентраций УВ (рис. 3). При этом, в эксперименте с наиболее загрязненными ДО, отмечено более резкое снижение концентраций УВ в воде. В контрольных аквариумах концентрации УВ в воде за время эксперимента практически не изменились. Уменьшение концентраций УВ в воде аквариумов может быть связано как с очищающей ролью мидий, так и с осаждением взвешенных мелкодисперсных коллоидных частиц, которые вследствие высокой сорбционной способности содержат большие количества УВ.

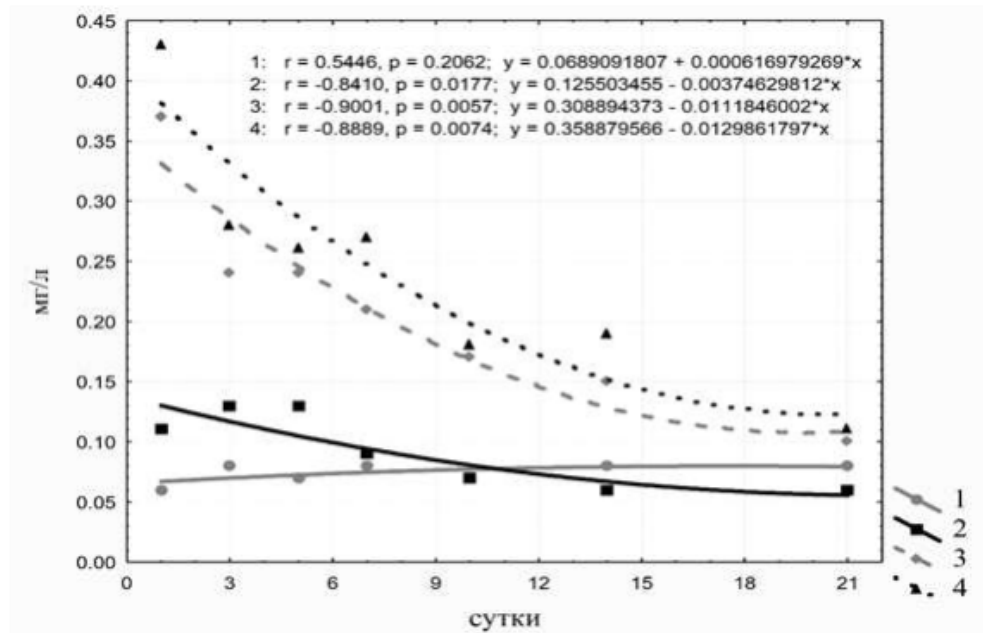


Рис. 3. Динамика концентраций УВ в воде аквариумов с донными осадками различной степени загрязненности, мг/л: 1 — контроль (0,03 г/кг); 2 — 0,6 г/кг; 3 — 2,5 г/кг; 4 — 5,0 г/кг сухого грунта

Осаждение взвеси подтверждается увеличением концентраций УВ в створках моллюсков, связанного с физической адсорбцией мелкодисперсных частиц створками раковин *M. galloprovincialis* в течение эксперимента (рис. 4).

Доля УВ, сорбированных на стенках аквариумов и раковин и седиментировавших на дно, не превышала 1–3 % от содержащихся в ДО. Уменьшение концентрации растворенных нефтяных УВ к 21 суткам до 15–20 % от доли НП, перешедших из ДО в водную фазу, обусловлено процессами сорбции, что подтверждается экспериментами по изучению трансформации компонентов нефти и динамики изменения соотношения между парафино-нафтеновыми, ароматическими (включая одно- и двухядерные) и полициклическими (трехядерные и выше) ароматическими углеводородами, фиксирующих уменьшение доли растворенных в воде более полярных фракции НП [13].

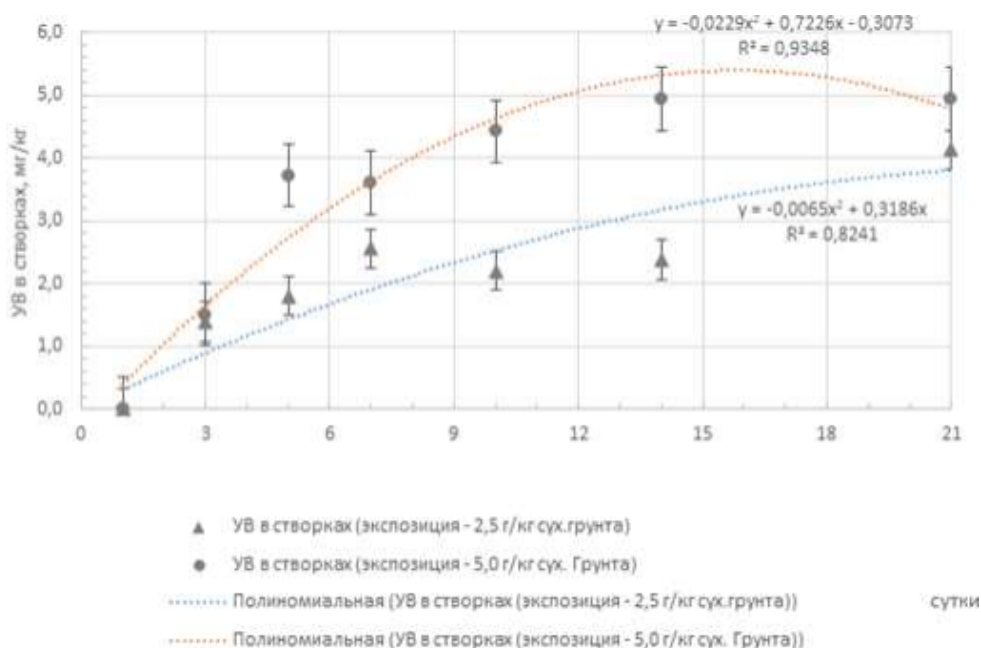


Рис. 4. Изменение содержания УВ в створках *M. galloprovincialis*, мг/кг

Накопление УВ гидробионтами осуществляется непосредственно из воды и с пищей. Биоаккумуляция УВ моллюсками из воды происходит в результате процессов биосорбции при контакте органов и тканей гидробионтов с токсикантами, находящимися в воде в растворенном состоянии. В первую очередь это относится к низкомолекулярным УВ и ПАУ.

Экспериментально установлено, что переход нефтепродуктов из донных отложений, в зависимости от их гранулометрического состава, не превышает 10 % [14, 15]. Поэтому накопление УВ в моллюсках в большей степени обусловлено тем, что в пищеварительный тракт моллюсков попадала пелитовая часть ила с адсорбированными тяжелыми нефтяными компонентами.

Особенность накопления УВ в мягкой ткани моллюсков связана с тем, что, захватывая минеральные и органические частицы, находящиеся во взвешенном состоянии или перешедшие в осадок, моллюски током воды транспортируют их в мантийную полость, где и происходит сортировка преимущественно по размерности частиц, а не по пищевой ценности [16].

В ходе лабораторных экспериментов установлено, что в мягкой ткани мидий динамика накопления и последующего выведения УВ зависит от уровня загрязненности донных отложений. В контрольных аквариумах ($C_{\text{нп}}=0,03$ г/кг в ДО) и в эксперименте с ДО, содержащими 0,6 г/кг, в течение экспозиции концентрации УВ в моллюсках остались на уровне концентраций, отмеченных в начале экспериментов (рис. 5).

В аквариумах с более высоким содержанием НП накопление УВ в моллюсках имело волнообразный характер. В аквариуме с ДО, содержащими 2,5 г/кг НП, максимальное накопление УВ в мягкой ткани *M. galloprovincialis* отмечено на 7 сутки. В ходе дальнейшей экспозиции наблюдалось снижение концентрации УВ, которое отмечалось на 10 и на 14 сутки. На 21 сутки отмечено увеличение содержания УВ в мягкой ткани моллюсков. В аквариуме с еще большим содержанием НП в ДО — 5,0 г/кг первый максимум концентрации УВ в мягкой ткани моллюсков обнаружен уже на 5 сутки, следующий максимум — на 14 сутки. В ходе дальнейшей экспозиции отмечено повторное снижение концентрации УВ (рис. 6).

В отличие от сложной динамики накопления УВ в мидиях, независимо от длительности эксперимента, накопление ПАУ было постоянным в течение всей экспозиции как краткосрочной, так и более продолжительной. В большей степени это связано с отсутствием возможности эффективной ферментативной деструкции ПАУ у моллюсков [9]. Метаболизм полиаренов, обусловленный процессами ферментативного окисления, происходит у позвоночных и беспозвоночных животных, однако интенсивность этих процессов у беспозвоночных заметно ниже.

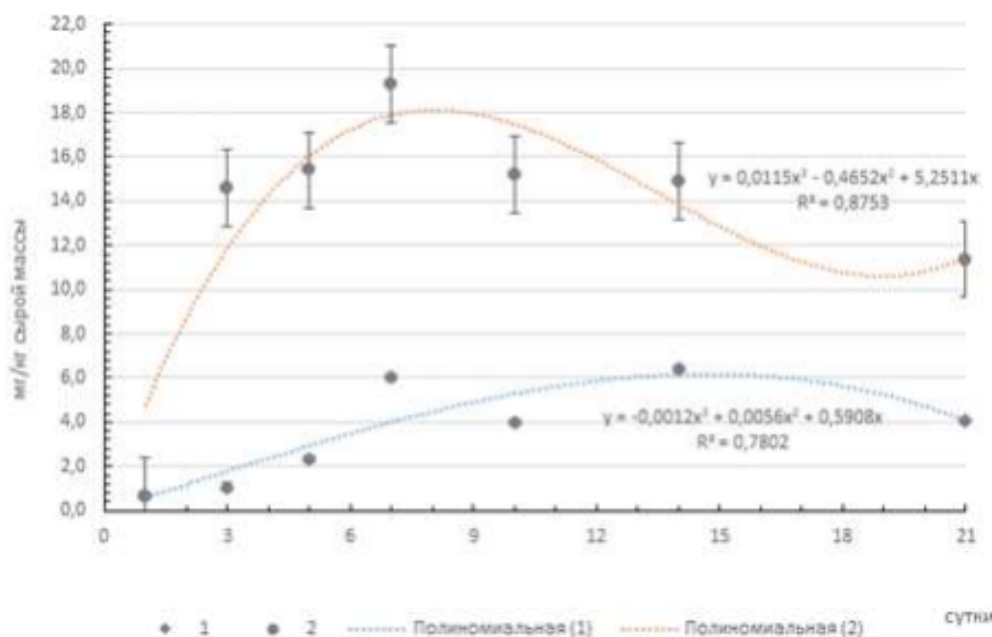


Рис. 5. Накопление УВ в мягкой ткани *M. galloprovincialis* в аквариумах с ДО различной степени загрязненности: 1 — контроль (0,03 г/кг); 2 — 0,6 г/кг

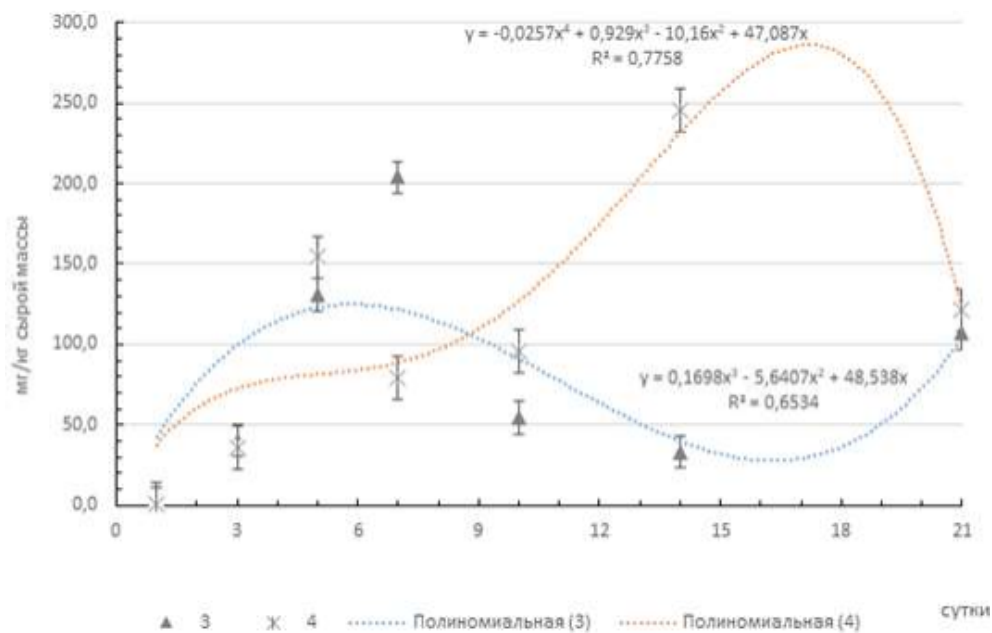


Рис. 6. Накопление УВ в мягкой ткани *M. galloprovincialis* в аквариумах с донными отложениями различной степени загрязненности: 3 — 2,5 г/кг; 4 — 5,0 г/кг сухого грунта

По литературным данным с увеличением степени нефтяного загрязнения ДО снижается скорость фильтрации воды моллюсками, что связано с угнетением некоторых их физиологических функций [17]. Влияние ДО, загрязненных НП, на биохимические показатели (содержание каротиноидов, водорастворимых белков, активности ААТ и детоксикационной способности комплекса цитохромов) моллюсков проявляется уже на 5 сутки эксперимента. Наиболее интенсивное влияние на изменения биохимических показателей моллюсков имеют ПАУ, которые являются наиболее токсичным компонентом нефти и НП, трансформированных в результате процессов деградации.

Следует отметить, что полученный характер степени накопления УВ в моллюсках, вероятно, связан с тем, что в стрессовых ситуациях (в данном случае высокое загрязнение) на фоне низкой фильтрационной активности происходит периодическая мобилизация адаптационных сил организма, что приводит к кратковременному ускорению физиологических процессов очистки организма и сбросу в виде фекалий и псевдофекалий попавших в организм аккумулялированных токсикантов.

Количество нефтяных УВ, выделяемых моллюсками с псевдофекалиями, напрямую зависит от содержания НП в ДО, использованных в эксперименте. Так, при загрязнении ДО ($C_{\text{НП}}=2,5$ г/кг сухой массы) в выделениях мидий (собранных за все время экспозиции) содержалось ~ 1 мг/кг НП. В аквариумах с более высоким уровнем загрязненности ДО ($C_{\text{НП}}=5,0$ г/кг) содержание НП в фекалиях и псевдофекалиях составило порядка 3,0 г/кг сухой массы. В контрольном эксперименте содержание НП в ДО и продуктах выделения *M. galloprovincialis* не превышало 0,03 г/кг сухой массы.

Возможно, это и является одной из причин отсутствия корреляции между степенью накопления УВ в тканях моллюсков и содержанием НП в ДО, которое было установлено при проведении исследований зависимости степени накопления УВ в образцах моллюсков Азовского моря от их содержания в донных отложениях и придонном горизонте водной толщи [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По сравнению с естественными процессами снижения концентрации нефтепродуктов за счет осаждения взвешенных мелкодисперсных частиц отмечена заметная роль мидий в ускорении процесса очищения воды.
2. Установлено, что в мягкой ткани мидий динамика накопления и последующего выведения УВ зависит от уровня загрязненности донных отложений и носит волнообразный характер. В контроле ($C_{\text{НП}}=0,03$ г/кг в ДО) и в эксперименте с ДО, содержащими 0,6 г/кг, в течение экспозиции концентрации УВ в моллюсках остались на уровне исходных концентраций. В аквариумах с ДО, содержащими 2,5 г/кг НП, максимальное накопление УВ в мягкой ткани отмечено на 7 сутки. В ходе дальнейшей экспозиции наблюдалось снижение концентрации УВ на 10 и на 14 сутки. На 21 сутки отмечено увеличение содержания УВ в мягкой ткани моллюсков. В аквариумах с ещё большим содержанием НП в ДО — 5,0 г/кг первый максимум концентрации УВ в мягкой ткани моллюсков обнаружен на 5 сутки, следующий максимум — на 14 сутки. В ходе дальнейшей экспозиции отмечено повторное снижение концентрации УВ.
3. Волнообразное накопление УВ в моллюсках, вероятнее всего, связано с тем, что в случае высокого загрязнения нефтепродуктами окружающей воды происходит кратковременное ускорение очистки организма за счет выведения токсикантов в виде фекалий и псевдофекалий.
4. Использование мидий в качестве индикаторов накопления загрязнения в водных объектах возможно с обязательным удалением пищеварительного тракта с целью исключения влияния на общее содержание токсикантов в тканях фекалий и псевдофекалий с высокой концентрацией частиц взвеси с абсорбированными нефтепродуктами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов О.Г., Миловидова Н.Ю., Щекатурина Т.Л. Биологические аспекты нефтяного загрязнения морской среды. К.: Наукова думка, 1988. 248 с.
2. Farrington J.W., Tripp B.W. Internatıonal mussel watch // Oceanus. 1993. Vol. 36, issue 2. Pp. 62–66.
3. Kelly L., Ashok D., Heather S. et al. Regional assessment of persistent organic pollutants in resident mussels from New Jersey and New York estuaries following Hurricane Sandy // Marine Pollution Bulletin. 2016. 107. Pp. 432–444. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.02.077. Epub 2016 Mar 7.
4. Bowen L., Miles K., Ballachey B. et al. Gene transcription patterns in response to low level petroleum contaminants in *Mytilus trossulus* from field sites and harbors in southcentral Alaska // Deep-Sea Research 2018. Vol. 147. Pp. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.08.007>.

5. Evariste L., David E., Clou er P. et al. Field biomonitoring using the zebra mussel *Dreissena polymorpha* and the quagga mussel *Dreissena bugensis* following immunotoxic reponses. Is there a need to separate the two species? // Environ Pollut. 2018. Vol. 238. Pp. 706–716. doi: 10.1016/j.envpol.2018.03.098. Epub 2018 Apr 3.
6. Beyer J, Green NW, Brooks S. et al. Blue mussels (*My lus edulis* spp.) as sen nel organisms in coastal pollu on monitoring: a review // Mar Environ Res. Vol. 130. Pp. 338–365. doi: 10.1016/j.marenvres.2017.07.024. Epub 2017 Aug 3.
7. Turja R., Sanni S., Stankevičiūtė M. et al. Biomarker responses and accumula on of polycyclic aroma c hydrocarbons in *My lus trossulus* and *Gammarus oceanicus* during exposure to crude oil // Environmental Science and Pollu on Research. 2020. Vol. 27. Pp. 15498–15514. h ps://doi.org/10.1007/s11356-020-07946-7.
8. Патин С.А. Экологические проблемы освоения нефтегазовых ресурсов морского шельфа. М.: Изд-во ВНИРО, 1997. 349 с.
9. Traina A., Ausili A., Bonsignore M. et al. Organochlorines and Polycyclic Aroma c Hydrocarbons as fingerprint of exposure pathways from marine sediments to biota // Marine Pollu on Bulle n. 2021. Vol. 170. Article number 112676. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112676.
10. Sun R., Sun Y., Li Q.X. et al. Polycyclic aroma c hydrocarbons in sediments and marine organisms: implica ons of anthropogenic effects on the coastal environment // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 640–641. Pp. 264–272. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.320. Epub 2018 May 30.
11. Кораблина И.В., Павленко Л.Ф., Клименко Т.Л. и др. Характеристика нефтяного загрязнения Азовского моря в период 2016–2020 гг. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2021. Т. 4, № 1. С. 19–27.
12. Практическое руководство по химическому анализу элементов водных экосистем. Приоритетные токсиканты в воде, донных отложениях, гидробионтах / под ред. Т.О. Барабашина. Ростов н/Д.: Мини Тайп, 2018. 436 с.
13. Ларин А.А. Особенности определения и оценка накопления углеводов в гидробионтах Азовского моря : автореф. дис... канд. хим. наук. Краснодар, 2010. 22 с.
14. Афанасьева Н.А., Бакум Т.А., Матвейчук И.Г. Изучение процессов обмена нефтяными углеводородами на границе раздела вода–донные отложения // Труды ГОИН. 1979. Вып. 149. С. 63–68.
15. Гейдаров Ф.А. Некоторые результаты моделирования процессов обмена нефтяными углеводородами на границе раздела морская вода–донные отложения // Труды ГОИН. 1979. Вып. 149. С. 69–71.
16. Воскресенский К.А. Пояс биофильтраторов как биогидрологическая система моря // Труды ГОИН. 1948. Вып. 6(18). С. 55–120.
17. Щекатурина Т.Л. Углеводороды автохтонного и аллохтонного происхождения их преобразование в морских организмах : автореф. дис... д-ра хим. наук. Ростов-н/Д.: ГХИ, 1992. 34 с.