

**БИОМАРКЕРЫ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ МИДИЙ
В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО БИОМОНИТОРИНГА
В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ БУРОВЫМИ ШЛАМАМИ
И НЕФТЯНЫМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ**

В.В. Трусевич, В.Ю. Журавский, Е.В. Вышкваркова, К.А. Кузьмин, В.Ж. Мишуров

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: trusev@list.ru

Исследовано влияние загрязняющих веществ, поступающих в море при нефте- и газодобыче, на поведенческие реакции черноморской мидии с целью оценки возможности использования разработанного авторами комплекса автоматизированного биосенсорного мониторинга вод для раннего обнаружения загрязнений. В лабораторных экспериментах с концентрациями экстрактов бурового шлама (25, 50 и 500 мг/л) и дизельного топлива (0,01 и 0,021 мг/л) установлено, что черноморские мидии демонстрируют высокую чувствительность к появлению в среде обитания указанных токсикантов. Предложенный комплекс позволяет уверенно обнаруживать токсиканты уже в первые минуты появления их в водной среде в концентрациях, характерных для малотоксичных зон в районах нефте- и газодобычи.

Ключевые слова: черноморская мидия, поведенческие реакции, автоматизированный биомониторинг, экстракты бурового шлама, дизельное топливо.

Поступила в редакцию: 02.09.2020.

Введение. Интенсивное нарастание объемов нефтегазодобычи в мире все в большей степени достигается за счет расширения зон добычи на морских шельфах, резко увеличивая выбросы высокотоксичных веществ в экосистемы морей и океанов. На всех этапах разведки, добычи и транспортировки нефтепродуктов наряду с хроническим поступлением почти постоянно наблюдаются неконтролируемые массивные выбросы буровых растворов, буровых шламов, промывных вод и разливы нефтеуглеводородов, характеризующиеся быстрым распространением масштабных негативных воздействий на крупные регионы [1, 2]. Вследствие этого, развитие работ по нефтедобыче на шельфе морей должно сопровождаться особо тщательным экологическим контролем.

Используемые в настоящее время системы контроля водной среды, основанные преимущественно на физико-химических методах, трудоемки, дорогостоящи, не способны оперативно охватить весь спектр загрязняющих агентов, не обеспечивают своевременного обнаружения

внезапного выброса загрязнений и, в принципе, не могут оперативно определить степень опасности того или иного агента для экосистемы. По оценкам специалистов в настоящее время, контролируется всего около 0,3% поступающих в окружающую среду химических веществ [1, 2]. Объективная оценка состояния водных экосистем невозможна без использования биологических методов экологического мониторинга. Наиболее надежным способом получения объективной информации о динамике изменения экологических параметров состояния моря в зонах нефтедобычи на шельфе является оперативный биомониторинг на основе автоматических станций непрерывного действия. В мировой практике контроля экологического состояния водных систем, наряду с техническими средствами, все большую роль играют автоматизированные биоэлектронные комплексы непрерывного биомониторинга поверхностных вод, так называемые системы раннего обнаружения (BEWS), в которых животные в качестве сенсоров включены в электрон-

ную схему регистрации тех или иных физиологических, биохимических и поведенческих показателей. В отличие от физико-химических методов мониторинга, эти системы, позволяют в реальном времени непрерывно получать интегральную токсикологическую характеристику среды, независимо от природы и состава загрязняющих веществ, оценивать качество воды, как среды обитания гидробионтов и передавать информацию в on-line режиме [3, 4].

В настоящее время в РФ в районах интенсивной нефте- и газодобычи отсутствуют системы автоматизированного биомониторинга. В качестве такой системы, впервые в РФ, предложен разработанный нами в 2008 году комплекс биосенсорного мониторинга и раннего предупреждения на основе поведенческих реакций двустворчатых моллюсков, предназначенный для использования в природных условиях водоемов [5–7].

Необходимым условием организации правильного функционирования такой системы является исследование особенностей поведенческих реакций в норме, а также оценка чувствительности аборигенных моллюсков к воздействию компонентов буровых растворов и шламов, нефти и нефтепродуктов.

Цель работы – с использованием разработанного комплекса провести исследования поведенческих реакций и чувствительности черноморской мидии к воздействию дизельного топлива и бурового шлама, содержащего большое количество высокотоксичных компонентов.

Материал и методы. Проведены испытания работоспособности системы и чувствительности моллюсков при краткосрочных (2 часа) ежедневных воздействиях возрастающих невысоких концентраций экстрактов буровых шламов и дизельного топлива, т.е. ситуации, которая постоянно присутствует при разведке и добыче нефтеуглеводородов. Для проведения работ использовали разработанный нами комплекс [5]. Комплекс обеспечивает получение цифровой информации о движении створок моллюсков, с использованием датчиков Холла и магнита [6]. Одновременно регистриру-

ются индивидуальные реакции 16 животных, температура воды, освещенность в месте проведения наблюдений. Латентный период реагирования системы на загрязнение, в зависимости от природы и концентрации, составляет от нескольких секунд до нескольких минут [6, 7]. Работа проведена в лабораторных условиях с использованием черноморской мидии (*Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819), размером 55–60 мм, добытых из зоны моря, из которой осуществлялась закачка воды для проточного аквариума. Отобранных моллюсков, которые в течение суток содержания не прикрепились биссусом к стенкам аквариума, отбраковывали как животных с неудовлетворительным физиологическим состоянием. Прибор с закрепленными моллюсками помещали в аквариум, объемом 100 литров с непрерывным протоком воды, закачиваемой из зоны моря на удалении 50 метров от берега, с глубины 2 метра, со скоростью 6 литров в минуту. Перемешивание раствора в аквариуме осуществлялось аквариумным микронасосом, при активной продувке воздуха. Перед экспериментами, для адаптации к аквариумному содержанию, прибор с закрепленными моллюсками выдерживали в аквариуме в течение недели. На время проведения эксперимента проток выключали. Исследовали чувствительность моллюсков к воздействию экстрактов бурового шлама, полученного с буровой платформы (скважина № 26 Черноморнефтегаза). Для исключения влияния минеральной взвеси, составляющей до 90% объема бурового шлама, оказывающей дополнительное сильное негативное воздействие на поведенческие реакции моллюсков [1], в экспериментах использовали водный экстракт рассчитанной навески шлама в 100 мл морской воды, т.е. только химическое воздействие водорастворимых компонентов бурового шлама. Навеску бурового шлама экстрагировали в течение суток при активном перемешивании раствора. Полученный раствор фильтровали на бумажном фильтре. Химический состав шлама не исследовали.

Ежедневно, в течение 2-х часов, на протяжении 3 дней, оценивалась реакция

моллюсков на воздействия одной из последовательно возрастающих концентраций экстрактов бурового шлама, соответствующих навескам шлама 25, 50 и 500 мг/литр воды в аквариуме. По истечении времени воздействия открывали проток воды и регистрировали скорость восстановления параметров поведенческих реакций.

В качестве модельного объекта нефтяного загрязнения использовали водную эмульсию дизельного топлива в соотношении 1:1. Согласно [8–11] дизельное топливо является наиболее агрессивным компонентом нефтяного загрязнения и наиболее часто используется в лабораторных исследованиях по выявлению влияния нефтяного загрязнения на гидробионты. В каждый из последующих 2-х дней после экспериментов с экстрактами исследовали воздействия в течение 2-х часов одного из объемов водной эмульсии дизельного топлива – 0,0125 и 0,025 мл/л. Эти величины эквивалентны содержанию 0,01 и 0,021 мг/л дизтоплива и соответствует концентрациям 0,25 и 0,5 ПДК, установленных Гигиеническими нормативами РФ для морских вод по нефтяному загрязнению для гидробионтов. Результаты экспериментов оценивали с использованием общепринятых методов статистической обработки данных.

Результаты исследования. Как показали наши исследования, моллюски остро реагируют на присутствие в водной среде экстрактов бурового шлама (рис. 1). Уже в первые 2–3 минуты появления экстрактов в экспериментальном аквариуме моллюски резко, практически синхронно, снижают амплитуду раскрытия створок на 30% при концентрации 25 мг/л и на 40 и 50% при возрастающих концентрациях соответственно. После резкого снижения амплитуды в первые минуты эксперимента средняя величина раскрытия створок на протяжении 2-х часового эксперимента продолжает снижаться с меньшей скоростью до уровня 20–25% при концентрации 25 мг/л и до 10% при концентрации 50 мг/л к концу эксперимента. При воздействии концентрации 500 мг/л амплитуда раскрытия створок снижается сразу до 10% и колеблется на этом уровне до конца эксперимента. На протяжении всего периода

присутствия токсикантов, после резкого синхронного снижения амплитуды раскрытия створок в первые минуты эксперимента, в дальнейшем, поведение моллюсков, при сниженной амплитуде раскрытия створок, представляет собой несинхронное бессистемное хлопанье створок, чередующееся с частыми периодами закрывания створок до уровня 2–3% на непродолжительное время (3–5 минут). При этом, с увеличением концентрации и длительности воздействия токсикантов продолжительность периодов пребывания моллюсков с полностью закрытыми створками увеличивается (рис. 1, табл. 1). После снятия воздействия токсикантов у моллюсков еще до момента полной смены воды в аквариуме отмечается быстрое восстановление амплитуды раскрытия створок. Полное восстановление амплитуды раскрытия створок отмечается через 2–4 часа после снятия воздействия в зависимости от концентрации использованного в эксперименте экстракта бурового шлама. Скорость восстановления снижается при воздействиях более высоких концентраций экстрактов (рис. 1в).

На рис. 2 представлены результаты экспериментов по воздействию дизельного топлива на моллюсков. Как видно из представленных графиков, моллюски более остро реагируют на воздействие дизельного топлива в исследованных концентрациях, составляющих 0,0125 и 0,025 мл/л, чем на экстракты бурового шлама. Амплитуда раскрытия створок в течение нескольких минут после внесения топлива снижается до 28 и 17% соответственно и варьирует на этих уровнях на всем протяжении эксперимента (рис. 2, табл. 1). Как и при воздействиях экстрактов бурового шлама поведение моллюсков на протяжении эксперимента, при сниженной амплитуде раскрытия, представляет собой череду бессистемных несинхронных схлопываний с четким проявлением дозозависимого эффекта. Повторяющиеся воздействия на моллюсков экстрактов бурового шлама и дизельного топлива в наших экспериментах вызвали общее снижение амплитуды раскрытия створок, примерно на 20%. Полное восстановление амплитуды раскрытия створок для части моллюсков наблюдается только через сутки.

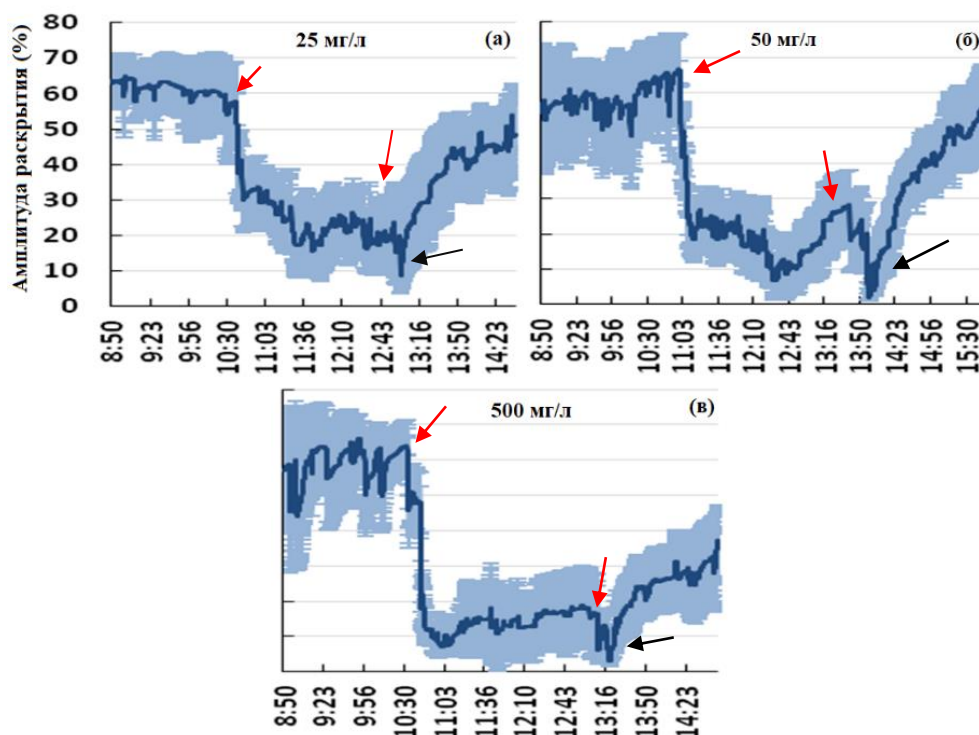


Рис. 1. Амплитуда раскрытия створок осредненная для 16 мидий (% от максимально раскрытия) при воздействии растворов бурового шлама разной концентрации (синяя линия). Голубой фон – среднеквадратическое отклонение. Красными стрелками показаны моменты начала и конца воздействия, черными – моменты выключения света

Fig. 1. Valve opening amplitude averaged for 16 mussels (% of the maximum possible opening) under the influence of drill cuttings solutions of different concentrations (blue line).

The blue background is the standard deviation. The red arrows show the moments of the beginning and the end of the impact, black – the moments of switching off the light

После удаления токсикантов из аквариума отмечается резкий пик кратковременного снижения амплитуды раскрытия створок до нуля, что является проявлением защитной реакции моллюсков на выключение света (рис. 1–2). Такие кратковременные синхронные реакции

на неинвазивные воздействия практически не изменяют общей направленности адаптивных реакций и при настройке автоматизированных систем мониторинга водной среды должны учитываться управляющими компьютерными программами как ложные сигналы [6].

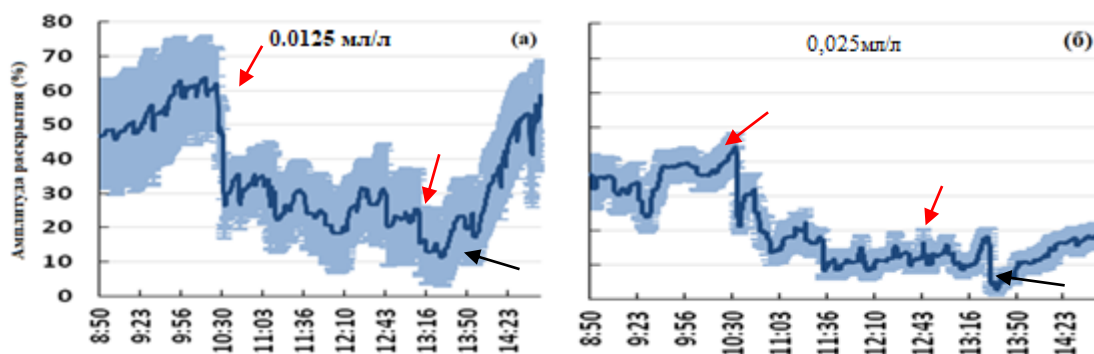


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, только при воздействии дизельного топлива

Fig.2. Same as in Fig. 1, only under the influence of diesel fuel

Таблица 1. Характеристики поведенческих реакций мидий до и в конце экспериментов

Токсикант / концентрация	Величина раскрытия створок (% от величины максимального раскрытия)		Продолжительность нахождения мидий в закрытом состоянии (% от общей продолжительности эксперимента)	
	до эксперимента	в конце эксперимента	до эксперимента	в конце эксперимента
Экстракты буровых шламов				
25 мг/л	58,58±8,93	34,82±8,71	3,67±3,77	31,43±7,24
50 мг/л	57,99±12,52	22,35±8,14	23,83±4,07	64,31±9,61
500 мг/л	55,9±10,61	13,41±8,83	28,52±4,65	67,79±11,87
Дизельное топливо				
0,0125 мл/л	50,58±12,91	26,5±10,24	25,63±3,22	64,54±12,01
0,025мл/л	34,38±10,56	13,5±6,46	37,73±6,86	52,55±9,97

Обсуждение результатов. Полученные в наших экспериментах результаты свидетельствуют о наличии высокотоксичных компонентов в буровых шламах, которые легко переходят в водную среду. Многочисленные исследования влияния бурового шлама на жизнедеятельность моллюсков, полученные, в основном, в условиях долговременных лабораторных экспериментов с использованием методов биоиндикации, характеризуют преимущественно особенности физиолого-биохимических механизмов адаптивных реакций гидробионтов. В работах [8, 9] установлены изменения сердечной активности мидии, в [10] – лизосомальной активности тканей, в [12, 13] – ферментных групп и компонентов антиоксидантного комплекса тканей в зависимости от концентрации и продолжительности воздействия буровых растворов и нефтепродуктов. При этом, сведения характеризующие особенности поведенческих реакций двустворчатых моллюсков при воздействиях нефти и нефтепродуктов в литературе немногочисленны [14]. Учитывая необходимость создания и развития систем автоматизированного биосенсорного контроля вод на основе поведенческих реакций моллюсков в районах морских шельфов, получение таких сведений является настоятельной необходимостью.

В норме движение створок черноморской мидии, не подвергающейся воздействию приливов и отливов, как показали наши многолетние исследования, подчинены четкому солнечному суточному ритму с максимальным раскрыти-

ем створок в ночное время и уменьшенной амплитудой раскрытия (60–70% от максимальной) в дневное [6, 15]. Створки мидий в нормальных условиях обитания открыты 95–98% времени суток [6]. Отклонения от нормального ритма указывают на неблагоприятное состояние моллюсков, вызванных изменением параметров среды обитания [6, 16–18].

При воздействиях высоких концентраций поллютантов двустворчатые моллюски используют стратегию изоляции путем закрывания створок на весь период присутствия токсикантов в среде обитания [6], при этом отмечается резкое снижение кардиоактивности [9, 18], функционирования ресничного эпителия, снижение уровня обменных процессов [19, 20]. Установлена полная синхронность в захлопывании створок и резком снижении пульса в течение всего периода присутствия токсикантов высокой концентрации в воде [18]. Эти физиологические и поведенческие реакции моллюсков обеспечивают им существенную экономию энергетических ресурсов путем быстрого снижения уровня обменных процессов, до 10% от нормы, что позволяет им сравнительно легко, без особого ущерба, сохранять жизнеспособность при закрытых створках даже в условиях достаточно длительного воздействия высокотоксичных веществ [19, 20].

В наших экспериментах по краткосрочному воздействию исследованных токсикантов, после резкого синхронного снижения амплитуды раскрытия створок в первые минуты воздействия экстрактов

буровых шламов и дизельного топлива на протяжении всего периода присутствия токсикантов в воде моллюски несинхронно совершали частые хлопания створками с невысокой амплитудой раскрытия (1–5 мм), перемежающиеся с кратковременным полным закрыванием створок от нескольких минут до часа. Аналогичный характер поведения моллюсков отмечался нами в более ранних исследованиях поведенческих реакций черноморской мидии [6]. Было установлено, что продолжительное хроническое воздействие загрязняющих веществ невысокой интенсивности различной природы и продолжительности, приводит к быстрому снижению амплитуды раскрытия створок, разрушению суточного ритма за счет несинхронно увеличивающейся частоты и нарастающей продолжительности периодов пребывания моллюсков в закрытом состоянии. Эти периоды сменяются укорачивающимися периодами частых бессистемных хлопываний с уменьшающейся амплитудой раскрытия створок. При воздействиях более высоких концентраций токсикантов эти изменения проявляются в возрастающей степени (рис. 1в), что является показателем развития стрессовой ситуации [6, 7, 17]. Установленные в наших экспериментах закономерности изменений поведенческих реакций моллюсков в полной мере согласуются с выводами исследователей о том, что при воздействиях нефтяного загрязнения невысокой интенсивности отмечается наиболее выраженная в разной степени перестройка ферментных систем, направленная на снижение повреждающего воздействия токсикантов: лизосомальной активности [10], антиоксидантного комплекса [21, 22], ферментов гликолитического фосфорилирования, белкового синтеза [9].

Повторяющиеся воздействия на моллюсков буровых растворов и дизельного топлива в наших экспериментах в течение нескольких дней, вызвали общее снижение величины раскрытия створок, примерно на 20% (рис. 2), что вероятно является «эффектом накопления воздействия» [9; 10]. Это может быть свидетельством начала адаптивных физиоло-

го-биохимических перестроек метаболизма как при хронических воздействиях невысокой интенсивности, так и начала глубоких адаптивных физиолого-биохимических изменений метаболизма в результате длительного воздействия токсиканта [9, 10]. Наиболее значительные повреждающие изменения метаболизма моллюсков происходят при повторяющихся частых разливах нефти невысокой концентрации [10, 21–23]. Очевидно, что именно эти изменения метаболизма находят свое отражение в глубоких изменениях поведенческих реакций у моллюсков, сопровождающихся разрушением суточного ритма, нарушением процессов фильтрации и питания, гаметогенеза [14, 21]. Таким образом, продолжительное хроническое воздействие токсикантов приводит к быстрой деградации популяций моллюсков. Такие исследования требуют продолжения.

Заключение. Оценивая характер поведенческих реакций моллюсков в наших экспериментах, можно сделать вывод, что использованные нами концентрации экстрактов бурового шлама и дизельного топлива по своему воздействию следует отнести к токсическим воздействиям невысокой интенсивности. Выбранные нами в экспериментах концентрации буровых растворов и дизельного топлива, а также продолжительность воздействия не вызывают глубоких, необратимых нарушений метаболизма, но позволяют четко обнаруживать защитную реакцию моллюсков, что и необходимо для оценки правильности функционирования разработанной нами системы биосенсорного мониторинга [14, 23, 24].

Черноморские мидии демонстрируют высокую чувствительность к появлению в среде обитания экстрактов буровых шламов и дизельного топлива, уже в концентрациях характерных для малотоксичных зон в районах нефте- и газодобычи, и проведения буровых работ. Моллюски остро реагируют на присутствие дизельного топлива в среде на уровне ниже величины 0,25 ПДК.

Полученные данные об особенностях поведенческих реакций черноморской мидии и результаты испытаний разрабо-

танных приборов являются достаточно полной базой для разработки и внедрения в нашей стране систем автоматизированного биомониторинга водной среды непрерывного действия, на основе поведенческих реакций моллюсков, в районах разведки и добычи углеводородов на шельфах морей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-45-920061.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Экологический мониторинг нефтегазовой отрасли* / М.Н. Саксонов, А.Д. Абалаков, Л.В. Данько [и др.] // Физико-химические и биологические методы: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во Иркутск. ун-та. 2005. 114 с.
2. *Патин С.А.* Нефть и экология континентального шельфа. Вт. изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во ВНИРО. 2017. 345 с.
3. *Kramer K.J.M., Botterweg M.* Aquatic biological early warning systems. Bioindicators and environmental management. D.W. Jeffrey, B. Madden (eds). London: Academic Press. 1991. P. 95–126.
4. *Borcherding J.* Ten years of practical experience with the Dreissena-Monitor, a biological early warning system for continuous water quality monitoring // *Hydrobiologia*. 2006. Vol. 556. P. 417–426.
5. *Трусевич В.В., Гайский П.В., Кузьмин К.А.* Автоматизированный биомониторинг водной среды с использованием реакций двустворчатых моллюсков // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 3. С. 75–83.
6. *Биомаркеры поведенческих реакций черноморской мидии для автоматизированного биомониторинга экологического состояния водной среды* / В.В. Трусевич, П.В. Гайский, К.А. Кузьмин [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2015. № 1 (21). С. 13–18.
7. *Трусевич В.В., Кузьмин К.А., Мишуков В.Ж.* Мониторинг водной среды с использованием пресноводных двустворчатых моллюсков // Системы кон-
- троля окружающей среды. 2017. № 7(27). С. 83–93.
8. *Бахмет И.Н.* Характерные особенности адаптации мидии съедобной *Mytilus edulis* L. к поллютантам // Ученые записки Петрозаводского гос. ун-та. Биология. 2013. № 8. С. 17–20.
9. *Мидия Mytilus edulis* L. Белого моря как индикатор при воздействии растворенных нефтепродуктов / И.Н. Бахмет, Н.Н. Фокина, З.А. Нефедова [и др.] // Труды Карельского науч. центра РАН. 2012. № 2. С. 38–46.
10. *Скидченко В.С., Высоцкая Р.У., Немова Н.Н.* Спектр изоформ кислой дезоксирибонуклеазы в тканях мидий *Mytilus edulis* в условиях модельной интоксикации нефтепродуктами // Труды Карельского науч. центра РАН. 2012. № 2. С. 131–138.
11. *Marigómez I., Garmendia L., Soto M., Orbea A., Izagirre U., Cajarville M.P.* Marine ecosystem health status assessment through integrative biomarker indices: a comparative study after the Prestige oil spill «Mussel Watch» // *Ecotoxicology*. 2013. Vol. 22. P. 486–505.
12. *Frantzen M., Regoli F., Nahrgang J., Ambrose W., Geraudie P., Benedetti M., Locke W., Camus L.* Biological effects of mechanically and chemically dispersed oil on the Icelandic Scallop (*Chlamys islandica*) // *Ecotoxicology and environmental safety*. 2016. Vol. 127. P. 95–107.
13. *Milinkovitch T., Geraudie P., Camus L., Hélène V.H., Guyon T.* Biomarker modulation associated with marine diesel contamination in the Iceland scallop (*Chlamys islandica*) // *Environmental Science Pollution Research*. 2015. Vol. 22. P. 19292–19296.
14. *Redmond K.J., Berry M., Pampanin D.M., Andersen O.K.* Valve gape behavior of mussels (*Mytilus edulis*) exposed to dispersed crude oil as an environmental monitoring end-point // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 117. P. 330–339.
15. *Анализ данных для автоматизации биомониторинга водной среды в Черноморском регионе* / В.Ю. Журавский, Е.Н. Воскресенская, В.В. Трусевич [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2019. № (4) 38. С. 66–71.

16. Robson A.A., Garcia de Leaniz C., Wilson R.P., Halsey L.G. Behavioural adaptations of mussels to varying levels of food availability and predation risk // *Journal of Molluscan Studies*. 2010. Vol. 76(4). P. 348–353.
17. Curtis T.M., Williamson R., Depledge M.H. Simultaneous, long-term monitoring of valve and cardiac activity in the blue mussel *Mytilus edulis* exposed to copper // *Marine Biology*. 2000. Vol. 136. P. 837–846.
18. Особенности движения створок и кардиоактивности двустворчатых моллюсков при действии различных стрессоров / С.В. Холодкевич, Т.В. Кузнецова, В.В. Трусевич [и др.] // *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*. 2009. Т. 45. № 4. С. 432–434.
19. Ortmann C., Grieshaber M. Energy metabolism and valve closure behaviour in the Asian clam *Corbicula fluminea* // *Journal of Experimental Biology*. 2003. Vol. 206. P. 4167–4178.
20. De Zwaan A., Wijsman T.C.M. Review: Anaerobic metabolism in bivalvia (Mollusca) // *Characteristics of anaerobic metabolism*. 1976. Vol. 56B. P. 313–324.
21. Sandrini-Neto L., Pereira L. da Silva, Martins C.C., de Assis H.C.S., Camus L. Antioxidant responses in estuarine invertebrates exposed to repeated oil spills: Effects of frequency and dosage in a field manipulative experiment // *Aquatic Toxicology*. 2016. Vol. 177. P. 237–249.
22. Sukhareenko E.V., Nedzvetsky V.S., Kyrychenko S.V. Biomarkers of metabolism disturbance in bivalve molluscs induced by environmental pollution with processed by-products of oil // *Biosystems Diversity*. 2017. 25 (2). P. 113–118.
23. Geraudie P., Bakkemo R., Milinkovitch T., Thomas-Guyon H. First evidence of marine diesel effects on biomarker responses in the Icelandic scallops, *Chlamys islandica* // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 16504–16512.
24. Гудимов А.В. Биотестирование дизельного топлива для оперативной биоиндикации // Сб. ст. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященная 125-летию проф. В.В. Водяницкого «Загрязнение морской среды: экологический мониторинг, биоиндикация, нормирование». Севастополь. 2018. С. 78–82.

BIOMARKERS OF BEHAVIORAL REACTIONS OF MUSSELS IN AUTOMATED BIOMONITORING SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF AQUATIC ENVIRONMENT POLLUTION BY DRILL CUTTINGS AND OIL HYDROCARBONS

V.V. Trusevich, V.Yu. Zhuravskiy, E.V. Vyshkvarkova, K.A. Kuzmin, V.Zh. Mishurov

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The influence of pollutants entering the sea during oil and gas production on the behavioral responses of the Black Sea mussel was investigated in order to assess the possibility of using the automated environmental water monitoring complex developed by the authors for early detection of pollution. In laboratory experiments with concentrations of drill cuttings extracts (25, 50 and 500 mg/l) and diesel fuel (0.01 and 0.021 mg/l), it was found that the Black Sea mussels exhibit high sensitivity to the appearance of these toxicants in the habitat. The proposed complex makes it possible to confidently detect toxicants already in the first minutes of their appearance in the aquatic environment in concentrations characteristic of low-toxic zones in oil and gas production areas.

Keywords: Black Sea mussel, behavioral responses, automated biomonitoring, drill cuttings extracts, diesel fuel.