



ПОВЫШЕНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ БИОСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ РАННЕГО ОПОВЕЩЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ

А.Н. Греков, Н.А. Греков, К.А. Кузьмин, С.С. Пелюшенко

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

В работе представлены результаты исследования воздействия акустических и вибрационных сигналов на черноморские мидии, определены необходимые технические характеристики вибродатчиков. Разработан метод, основанный на анализе величины временного интервала, зарегистрированного датчиком движения створок в виде монотонно убывающей функции после реакции колонии мидий на воздействие виброакустического сигнала. Метод позволяет исключить градуировку величины раскрытия створок мидий на стадии изготовления и настройки биосенсорной системы, а также контролировать и определять ложные срабатывания или неполное открытие створок отдельных мидий при воздействии на них точечных раздражителей. Приведена структурно-функциональная схема разработанной экспериментальной установки.

Ключевые слова: контроль, частоты, реакция створок мидий, загрязнение, обработка сигналов, метод, градуировка, гистограмма, акселерометр.

Поступила в редакцию: 20.07.2023. После доработки: 18.09.2023.

Введение. При разработке морской автоматизированной биосенсорной системы раннего оповещения, сигнализирующей о загрязняющих веществах, и оценке возможной опасности этой воды для водных и других организмов были определены подходящие организмы, отвечающие таким критериям: быть типичным для данной местности, иметь высокую численность, обитать в данном месте в течение ряда лет, иметь возможность использоваться в естественных условиях и обладать ответной реакцией на химическое или физическое воздействие. Этим критериям отвечают черноморские мидии.

Однако мидии являются многосенсорными биологическими системами, которые активно реагируют не только на загрязнители, но и на другие факторы. Поэтому недостатками биологической системы оповещения, как и других известных «систем раннего предупреждения» (early warning systems), являются пороги срабатывания, вызванные воздействием различных внешних мешающих факторов, таких как изменение температуры, солености (электропроводно-

сти), освещенности, волнения, течения и шумов, влияющих на поведенческие и/или физиологические реакции водных организмов. В результате естественно-природные изменения факторов среды могут приводить к таким же изменениям параметров (вызывая стресс), как и антропогенные (токсические) воздействия, что неизбежно провоцирует генерацию сигналов ложной тревоги; система становится экологически неадекватной.

На практике установлено, что мидии (например, *P. Bernhardus* и *M. Edulis*) реагируют на вибрацию, и их спектральная чувствительность лежит в диапазоне от 5 до 410 Гц. Полная методология изложена в [1, 2]. В этот спектральный диапазон могут входить шумы проходящих кораблей, забивка свай в морское дно, удары волн о буй или береговые сооружения и ряд других воздействий. Обнаружено, что мидии способны реагировать даже на незначительные периодические колебания факторов среды: например, температуры – на 0,1°C (зимой), солености – на 0,2‰. Анализ работ [3–10], посвященных воздействию акустических вибраций на мидии и их реак-

цию, показал, что в них не отражены вопросы, касающиеся инфразвукового диапазона, а также не рассмотрена градуировка величины раскрытия створок мидий на стадии изготовления и настройки биосенсорной системы, не исследованы ложные срабатывания или неполное открытие створок отдельных мидий при воздействии на них точечных раздражителей, включая обрастание и влияние белковых нитей (биссуса). Необходимость разработки методики, учитывающей перечисленные факторы, и улучшение избирательности отклика мидий является целью данной работы.

Оперативное выявление воздействий внешних мешающих факторов, влияющих на поведенческие и/или физиологические реакции водных организмов, и недопущение генерации сигналов ложной тревоги является актуальной задачей при разработке автоматизированного биосенсорного комплекса раннего оповещения для экологического мониторинга водной среды и обеспечения непрерывного измерения текущих колебаний функциональной активности организмов-биосенсоров как в искусственных, так и в любых природных условиях с контролем и фильтрацией воздействий внешних мешающих факторов, таких как температура, соленость (электропроводность), освещенность, волнение, течение и шумы, влияющие на поведенческие и/или физиологические реакции водных организмов, и выявление степени их отклонений от нормы, в целях повышения точности и достоверности индикации экологически опасных изменений окружающей среды, в первую очередь, токсического загрязнения. Поэтому актуальной является задача по исследованию и оценке воздействия акустических и вибрационных сигналов на черноморские мидии.

Основная часть. Известно, что у двусторчатых моллюсков структура слуха представлена органом чувств брюшной полости, который является механосенсорным рецептором, высокочувствительным к механическим вибра-

циям. Определим воздействия акустических и вибрационных сигналов на черноморские мидии, что позволит определить технические характеристики акустических вибродатчиков, необходимых для установки в автоматизированную морскую биосистему раннего оповещения.

Исследования проводились в лабораторных условиях с использованием разработанной экспериментальной установки, состоящей из аквариума, в котором размещена система жизнеобеспечения, создающая циркуляцию воды и обогащающая ее кислородом, формирователя интервалов времени, который выдает сгенерированный электрический сигнал с определенной скважностью, источника виброакустического сигнала, двухканального генератора напряжения и частоты, усилителя мощности низкой частоты, блока колонии мидий, соединенного с многоканальным измерителем активности мидий, имеющим узлы крепления мидий и датчики фиксации с преобразователем раскрытия створок мидий в код, блока телеметрии, имеющего контроллер формирователя измерительного кадра и узлы передачи данных.

Работает разработанная экспериментальная установка следующим образом. Формирователь интервалов времени один раз в 30 мин создает ворота для включения источника виброакустического сигнала длительностью на 2 мин. В источнике виброакустического сигнала генерируется электрический сигнал определенной частоты, который через усилитель мощности подается на электроакустический преобразователь. Сформированный виброакустический сигнал с электроакустического преобразователя через стенку аквариума распространяется в воде, воздействует на колонию мидий и первичный преобразователь виброускорений, в котором оцифровывается.

Структурно-функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

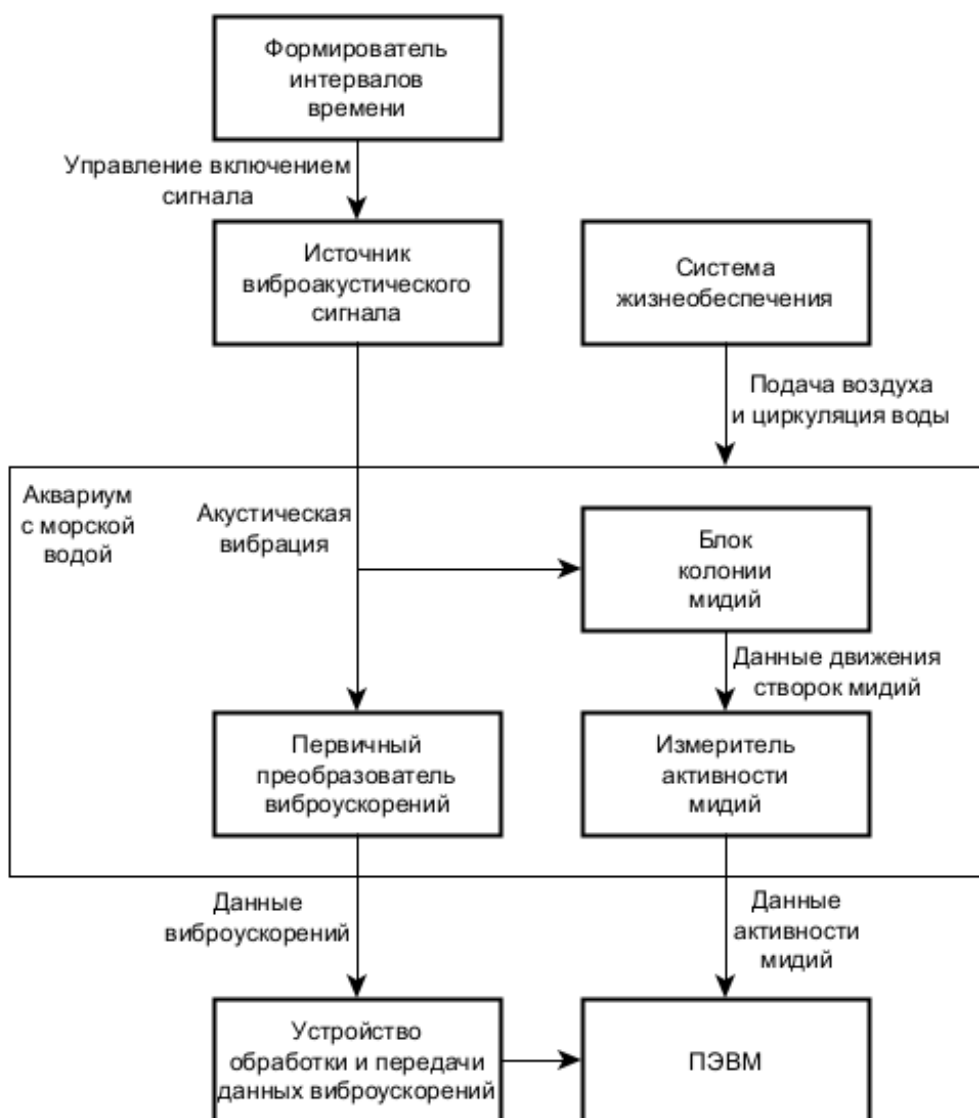


Рис. 1. Структурно-функциональная схема экспериментальной установки
Fig. 1. Structural and functional scheme of the experimental setup

На рис. 2 представлена фотография экспериментальной установки. Экспериментальная установка состоит из аквариума с морской водой, в котором расположена колония мидий, закрепленная на измерителе двигательной активности створок мидий и гидроакустического измерительного канала. В состав гидроакустического измерительного канала входит трехосевой акселерометр MPU-9250, установленный на створке мидии и цифровой измерительный преобразователь STM32 Nucleo.

Источник звуковых сигналов включает в себя генератор JD6600, усилитель мощности и электроакустический преобразователь JBL Stadium 122SSI. Генератор управляется согласно выбранному режиму с помощью формирователя интервалов времени. Система жизнеобеспечения обеспечивает циркуляцию воды и обогащение ее кислородом. Параметры движения створок мидий и реальных акустических сигналов, зафиксированных в аквариуме, синхронно поступают на рабочую станцию для обработки и анализа.



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки: 1 – пластина с магнитом, 2 – мидия, 3 – блок электроники

Fig. 2. General view of the experimental setup: 1 – plate with a magnet, 2 – mussel, 3 – electronics unit

Основные условия экспериментов.

Морские моллюски (черноморская мидия) размером от 3 до 5 см собраны в районе г. Севастополя на глубине 3-5 м; черноморская вода в объеме 20 л заливалась в аквариум, где размещалась колония мидий.

Общие физические параметры окружающей среды во время опытов с мидиями:

- температура воздуха: $24 \pm 27^\circ\text{C}$;
- температура воды в емкостях: $22,9 \pm 24,3^\circ\text{C}$;
- освещенность в воздухе (дневное /ночное время): $800 \pm 2000/0 \pm 8$ лк;
- рН воды: $7,44 \pm 7,95$ отн. ед.;
- дата: 01.08.2022–21.08.2022.

Каждый эксперимент с различными воздействующими на мидии частотами длился двое суток. Первый день: забор воды и моллюсков, установка моллюсков в узлы крепления и настройка аппаратуры. Ночная и дневная записи велись непрерывно в течение двух дней.

В ходе проведения испытаний использовались частоты, приведенные в

табл. 1. Виброакустический сигнал воздействовал на колонию мидий с интервалом 30 мин и длительностью 2 мин. Дополнительно звуковое давление, измеряемое гидрофоном, варьировалось от 95 дБ и ниже.

Таблица 1. Дата проведения эксперимента и частоты виброакустических сигналов воздействия

Дата	Частота, Гц
03.08.2022	100
05.08.2022	200
09.08.2022	300
12.08.2022	33
16.08.2022	400
19.08.2022	166
21.08.2022	20

Результаты первичной обработки данных измерений при воздействии сигналов различной частоты и реакция створок мидий представлены на рис. 3 а, б, в (а – частота 100 Гц, б – 20 Гц, в – 300 Гц).

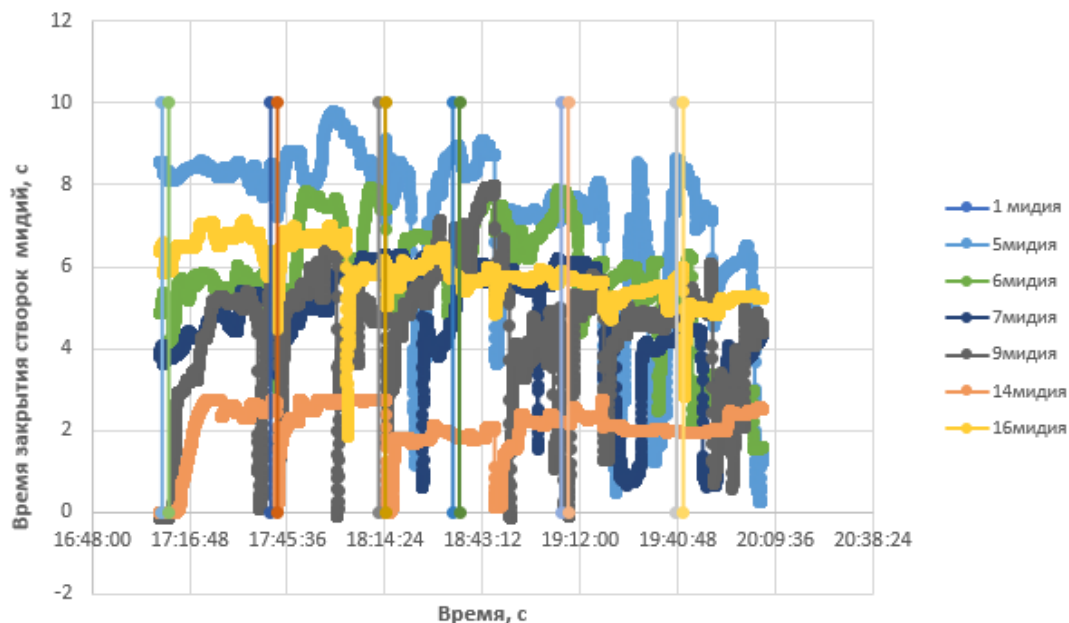


Рис. 3 а. Результаты первичной обработки данных измерений при воздействии сигналом частотой 100 Гц и реакция створок мидий

Fig. 3 a. The results of the primary processing of measurement data when exposed to a signal with a frequency of 100 Hz and the response of mussel valves

На рис. 3 а представлены реакции мидий при частоте воздействия 100 Гц. Вертикальные линии указывают на включение источника виброакустического сигнала длительностью 2 мин, запуск которого осуществляется каждые 30 мин. После воздействия вибросигнала

мидии по-разному реагируют на него, изменяется с различным диапазоном амплитуда и длительность закрытия створок.

Аналогично построен график для реакции мидий при частоте 20 Гц (рис. 3 б).

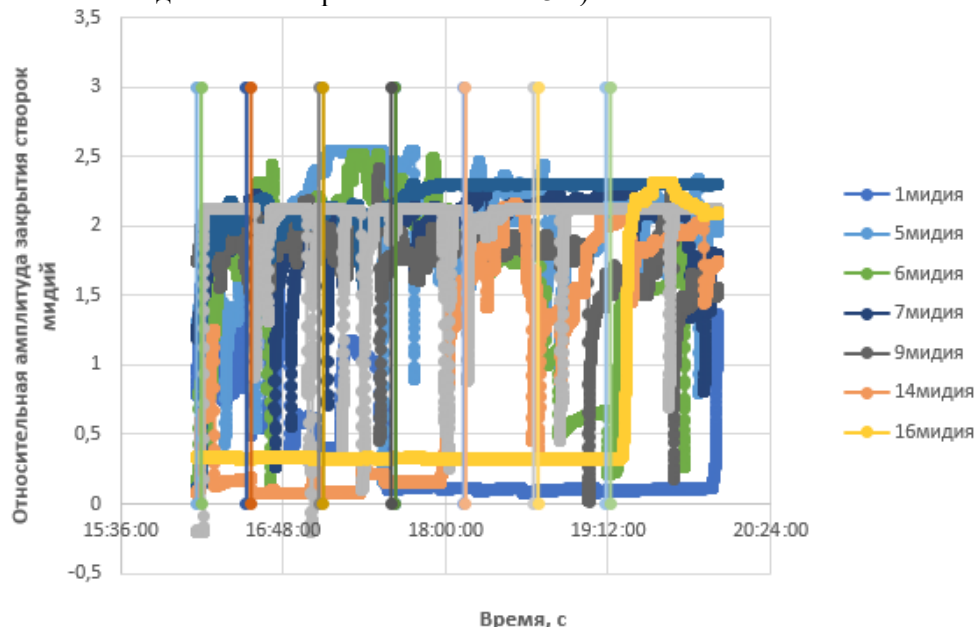


Рис. 3 б. Результаты первичной обработки данных измерений при воздействии сигналом частотой 20 Гц и реакция створок мидий

Fig. 3 b. The results of the primary processing of measurement data when exposed to a signal with a frequency of 20 Hz and the response of mussel valves

Для наглядности на рис. 3 в показан фрагмент с расширенной длительностью реакции мидий при частоте 300 Гц, где

видно, что амплитуда и время закрытия створок мидий значительно различаются.

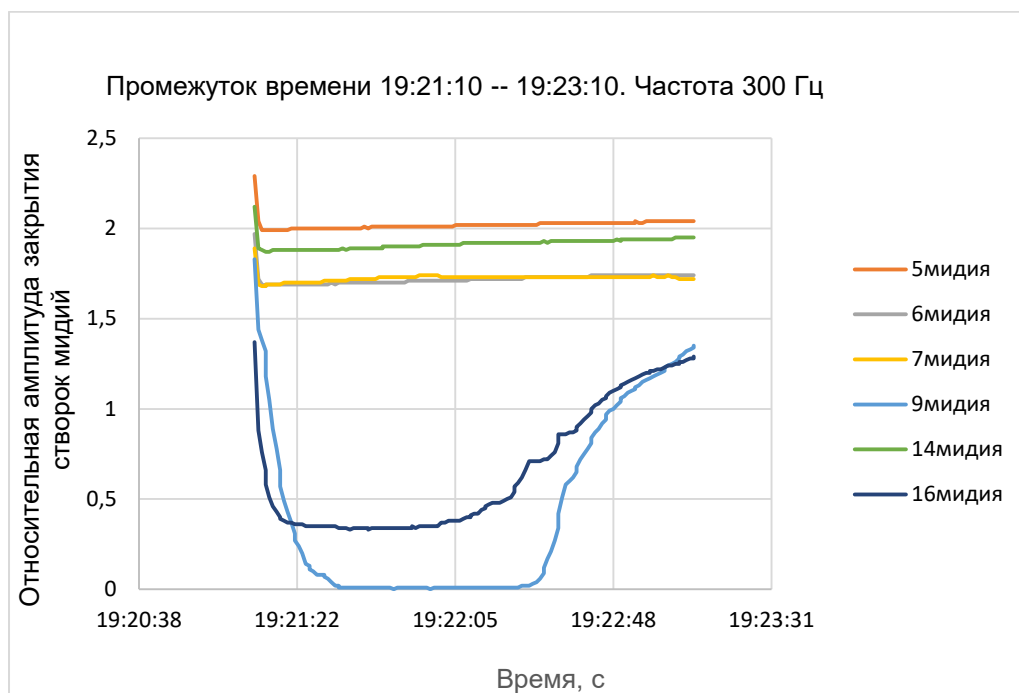


Рис. 3 в. Фрагмент графика с расширенной длительностью реакции мидий при воздействии сигналом частотой 300 Гц

Fig. 3 в. A fragment of the graph with an extended duration of the mussel reaction when exposed to a signal with a frequency of 300 Hz

Анализ представленных сигналов на графиках (рис. 3 а, б, в) в таком виде затруднителен, а порой даже невозможен, так как анализируется амплитуда закрытия створок мидий, которая зависит от начальной градуировки, проводимой перед экспериментальным исследованием. Изменчивость амплитуды раскрытия створок мидий зависит от биологических особенностей самих особей, которые реагируют на кормовую базу, от содержания кислорода в воде, от обрастания и влияния белковых нитей (биссуса). Для исключения вышеперечисленных факторов понадобился новый подход к результатам обработки и анализа. Был разработан метод, позволяющий исключить градуировку величины раскрытия створок мидий на стадии изготовления и настройки биосенсорной системы, а также контролировать и определять ложные

срабатывания или неполное открытие створок отдельных мидий при воздействии на них точечных раздражителей. Суть разработанного метода заключается в том, что после воздействия на колонию мидий различных раздражителей анализу подвергается время одновременного закрытия створок всех мидий, зарегистрированное датчиком движения створок в виде монотонно убывающей функции, вернее величина временного интервала, которая определялась как разница между моментами начала движения створок мидий и его остановки или их полного закрытия.

В результате анализа с использованием методики определения временных интервалов были построены зависимости времени закрытия створок мидий при различных частотах, которые представлены на рис. 4. Вначале для анализа

и построения графиков (рис. 4) были взяты данные без их осреднения, полученные после воздействия первых импульсов вибросигналов на мидии и их отклик. Как следует из графиков, время закрытия всех мидий не превышает 10 с. Исключение составила мидия под номером № 5, хотя в дальнейшем время за-

крытия восстановилось до 10 с. Не вдаваясь в биологические аспекты, которые не являются целью исследования данной работы, можно только предположить, что мидия подверглась обрастанию или влиянию белковых нитей (биссуса), которые после воздействия нижних виброчастот оборвались.

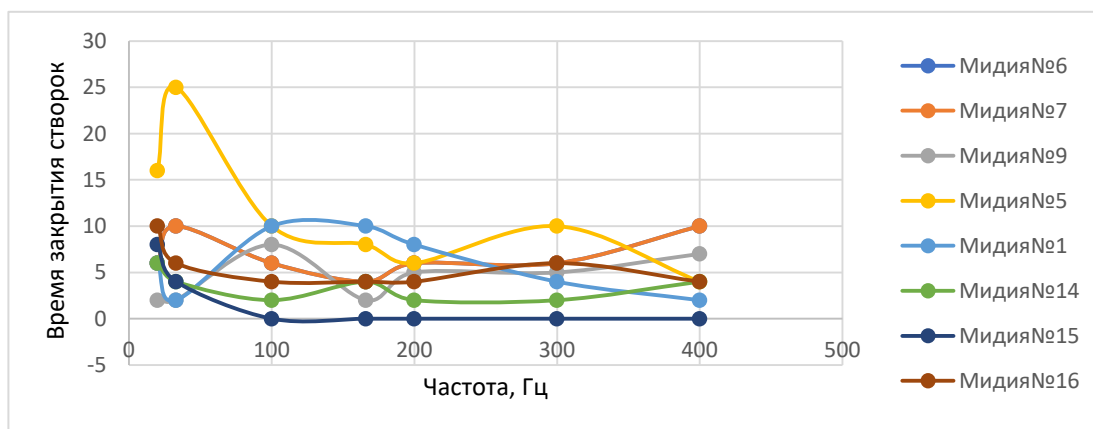


Рис. 4. Время закрытия створок отдельных мидий в зависимости от частоты воздействия вибросигнала

Fig. 4. Closing time of the valves of individual mussels depending on the frequency of exposure to the vibration signal

Используя полученные данные, представленные на рис. 4, выполним осреднение времени перехода створок всех мидий в закрытое состояние в каждом диапазоне частот

$$\bar{z} = \sum_{i=1}^N z_i,$$

где \bar{z} – среднее время перехода створок в закрытое состояние; N – количество закрытий створок.

Результаты осреднения представлены на графике (рис. 5 а), из которого следует, что в среднем для всех мидий в указанном диапазоне частот существует реакция закрытия створок и максимальное значение средней величины перехода в закрытое состояние не превышает 2,5 с. Для оценки степени влияния вибросигнала в области частот ниже 20 Гц выполним аппроксимацию ряда данных, представленного на графике (рис. 5 а), в интервале от 20 до 100 Гц полиномом второй степени, и экстрапо-

лируем значения для частот ниже 20 Гц. Найденная зависимость времени перехода в закрытое состояние от частоты вибросигнала имеет вид

$$z = 0,0001 f^2 + 0,0008 f + 1,4801,$$

где z – время перехода створок в закрытое состояние; f – частота вибросигнала.

Данная операция выполнялась в связи с тем, что электродинамический преобразователь не воспроизводит сигнал частотой ниже 20 Гц. Частоту ниже 20 Гц возбуждали движением водной поверхности в аквариуме, сигнал успешно фиксировался первичным преобразователем виброускорений.

Полученная реперная точка от возмущения воды не выходила за рамки интерполяционной кривой (рис. 5 б). Этот результат подтверждает, что мидии реагируют на инфразвуковые вибрации в диапазоне доли Герца.

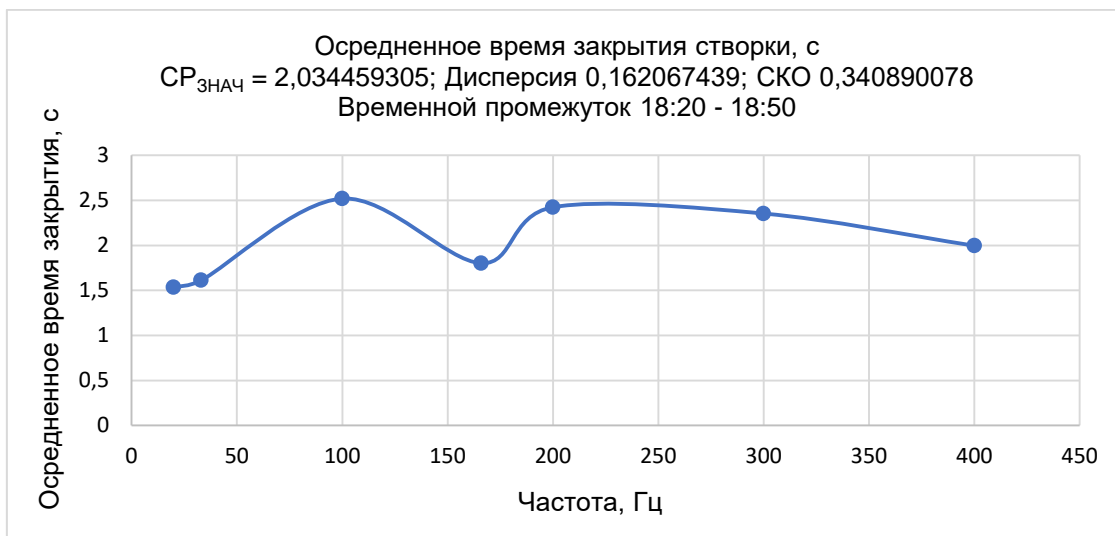


Рис. 5 а. Осредненное время закрытия всех мидий в зависимости от частоты воздействия вибросигнала

Fig. 5 a. The average closing time of all mussels, depending on the frequency of exposure to the vibration signal

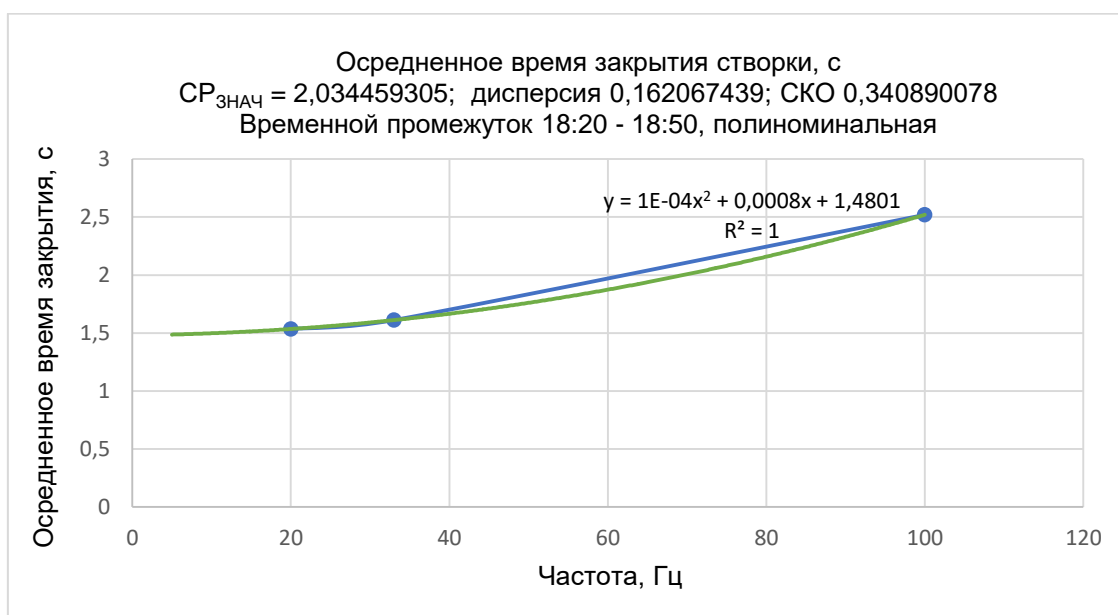


Рис. 5 б. Экстраполяционная кривая времени закрытия створок мидий в инфразвуковом диапазоне вибрации

Fig. 5 б. Extrapolation curve of the closing time of mussel valves in the infrasonic vibration range

Для дальнейшего анализа результатов измерений были рассчитаны и построены гистограммы для всех мидий, но для каждой частоты в отдельности, и обобщенная гистограмма для всех мидий и частот. Расчетные значения для построения гистограммы были получены после проведения сортировки числовой

выборки и получения минимального и максимального значений времени закрытия створок мидий. Определен размах вариации и найдено оптимальное количество интервалов закрытия створок мидий, и длина интервалов

$$R = \chi_{\max} - \chi_{\min},$$

где χ_{\max} – максимальное значение времени закрытия створки; χ_{\min} – минимальное значение времени закрытия створки; R – размах вариации.

Оптимальное количество интервалов

$$k = 1 + 3,22 \cdot \log(n)_{10} - \text{ф-ла Стерджесса}$$

где n – длина выборки.

Длина интервала

$$h = \frac{R}{k},$$

где k – количество интервалов.

По расчетным значениям всех перечисленных выше параметров строим гистограмму, которая представлена на рис. 6.



Рис. 6. Столбчатая гистограмма

Fig. 6. Bar chart

Представленная столбчатая гистограмма выборки (рис. 6) является распределением с перекосом вправо и длинным правым хвостом. Правостороннее распределение имеет большую концентрацию значений данных о времени закрытия створок мидий с левой стороны и меньшую концентрацию с правой стороны, при этом, среднее значение выше, чем медиана набора данных. Такая гистограмма подтверждает, что обработаны все данные измерений, а биологическая природа процесса закрытия мидий не может быть меньше 0,8 с.

Полученные результаты исследований частотно-временных распределений времени закрытия створок мидий позволят использовать, для учета воздействия акустических и вибрационных сигналов на черноморские двустворчатые мидии в качестве акустических вибродатчиков, трехосевой акселерометр ADXL335 со следующими техническими характеристиками:

- напряжение питания: 3–5 В;
- потребляемый ток: 350 мкА;
- диапазон измерений: -3,6 g...+3,6 g;
- чувствительность: 300 мВ/g;
- температура эксплуатации: -40 ...+85°C;
- размеры: 20,3 мм x 15,7 мм;
- вес: 5 г;
- диапазон воспринимаемых частот: 0,5 ...1600 Гц.

Представленные данные акселерометра как по чувствительности, так и по частотным характеристикам вполне удовлетворяют требованиям к измерительным каналам с акустическими вибродатчиками для автоматизированной морской биосистемы раннего оповещения, это позволит учитывать воздействие внешних вибросигналов на колонию мидий, повысит избирательность отклика на загрязнители и исключит генерацию сигналов ложной тревоги.

Заключение. В результате проведенных исследований сделаны оценки воздействия акустических и вибрационных сигналов различной частоты, скважности и амплитуды на черноморские мидии, что позволило определить технические характеристики акустических вибродатчиков, необходимых для установки в автоматизированную морскую биосенсорную систему раннего оповещения, и использовать разработанную методику при обработке сигналов для повышения избирательности отклика на загрязнители.

Разработан метод, позволяющий исключить градуировку величины раскрытия створок мидий на стадии изготовления и регулировку биосенсорной системы, а также контролировать и определять ложные срабатывания при неполном открытии или закрытии створок отдельных мидий при воздействии на них точечных раздражителей, включая обрастание и влияние белковых нитей (биссуса).

Биоиндикация, обладая простотой, позволяет получить информацию о биологических изменениях среды и делать косвенные выводы об особенностях самого фактора. Таким образом, при оценке состояния среды желательна селективно дополнить биологическую систему каналами, измеряющими физико-химические параметры, и каналами для исключения сигналов ложной тревоги, что позволит получать качественные и количественные характеристики морской среды.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПТС по теме «Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод» № госрегистрации 121122300070-9.

Авторы выражают благодарность за помощь в создании лабораторного стенда и участии в проведении измерений вед. инженеру-исследователю Трусевичу В.В., главному специалисту Рязанову В.А., вед. инженеру Пасынкову М.А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roberts L. et al. Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise // Marine Ecology Progress Series. 2015. Vol. 538. P. 185–195.

2. Roberts L. et al. Sensitivity of *Pagurus bernhardus* (L.) to substrate-borne vibration and anthropogenic noise // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2016. Vol. 474. P. 185–194.

3. Vazzana M., Celi M., Maricchiolo G., Genovese L., Corrias V., Quinci E.M., de Vincenzi G., Maccarrone V., Cammilleri G., Mazzola S., Buscaino G., Filiciotto F. Are mussels able to distinguish underwater sounds? Assessment of the reactions of *Mytilus galloprovincialis* after exposure to lab-generated acoustic signals // Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol. 2016. Vol. 201. P. 61–70.

4. Roberts L., Cheesman S., Breithaupt Th., Elliott M. Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise // Marine Ecology Progress Series. 2015. Vol. 538. P. 185–195.

5. Кастелеин П.А. Влияние вибраций на поведение моллюсков (двустворчатых моллюсков) // Биоакустика. 2008. Vol. 17. P. 74–75.

6. Hubert Jeroen, Booms Emily, Witbaard Rob, Slabbekoorn Hans. Responsiveness and habituation to repeated sound exposures and pulsetrains in blue mussels // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2022. Vol. 547. P. 151–161.

7. Hubert Jeroen, Moens Rosalie, Witbaard Rob, Slabbekoorn Hans. Acoustic disturbance in blue mussels: sound-induced valve closure varies with pulse train speed but does not affect phytoplankton clearance rate // ICES Journal of Marine Science. 2022. Vol. 79(9). P. 1–12.

8. Hubert Jeroen, Booms Emily, Witbaard Rob, Slabbekoorn Hans. Responsiveness and habituation to repeated sound exposures and pulse trains in blue mussels // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2022. Vol. 547. P. 1–10.

9. Grekov A.N., Kabanov A.A., Vyshkvarkova E.V., Trusevich V.V. Anoma-

ly Detection in Biological Early Warning Systems Using Unsupervised Machine Learning // *Sensors*. 2023. Vol. 5. P. 26–87.

10. Grekov A.N., Kuzmin K.A., Mishurov V.Z. Automated Early Warning

System for Water Environment Based on Behavioral Reactions of Bivalves // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2019. P. 1–5.

IMPROVING THE SELECTIVITY OF THE BIOSENSOR EARLY WARNING SYSTEM EXPOSED TO ACOUSTIC VIBRATIONS

A.N. Grekov, N.A. Grekov, K.A. Kuzmin, S.S. Peliushenko

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

E-mail: *i@angrekov.ru*

In the paper, the results of a study of the impact of acoustic and vibration signals on the Black Sea mussels are presented, the necessary technical characteristics of vibration sensors are determined. A method based on the analysis of the value of the time interval recorded by the valve movement sensor in the form of a monotonically decreasing function after the response of a mussel colony to the impact of a vibroacoustic signal is developed. The method makes it possible to eliminate the calibration of the opening value of mussel valves at the stage of manufacturing and setting up the biosensor system, as well as to control and determine false alarms or incomplete opening of the valves of individual mussels when exposed to point stimuli. The structural-functional scheme of the developed experimental setup is given.

Keywords: control, frequencies, response of mussel valves, pollution, signal processing, method, calibration, histogram, accelerometer

REFERENCES

1. Roberts L. et al. Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, Vol. 538, pp. 185–195.
2. Roberts L. et al. Sensitivity of *Pagurus bernhardus* (L.) to substrate-borne vibration and anthropogenic noise. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2016, Vol. 474, pp. 185–194.
3. Vazzana M., Celi M., Maricchiolo G., Genovese L., Corrias V., Quinci E.M., de Vincenzi G., Mac-carrone V., Cammilleri G., Mazzola S., Buscaino G., and Filiciotto F. Are mussels able to distinguish underwater sounds? Assessment of the reactions of *Mytilus galloprovincialis* after exposure to lab-generated acoustic signals. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 2016, Vol. 201, pp. 61–70.
4. Roberts L., Cheesman S., Breithaupt Th., and Elliott M. Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, Vol. 538, pp. 185–195.
5. Kastelein R.A. Vliyanie vibracij na povedenie mollyuskov (dvustvorchatyh mollyuskov). (The influence of vibrations on the behavior of mollusks (bivalve molluscs)). *Bioakustika*, 2008, Vol. 17, pp. 74–75.
6. Hubert Jeroen, Booms Emily, Witbaard Rob, and Slabbekoorn Hans. Responsiveness and habituation to repeated sound exposures and pulsetrains in blue mussels. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2022, Vol. 547, pp. 151–161.
7. Hubert Jeroen, Moens Rosalie, Witbaard Rob, and Slabbekoorn Hans. Acoustic disturbance in blue mussels: sound-induced valve closure varies with pulse train speed but does not affect phytoplankton clearance rate. *ICES Journal of Marine Science*, 2022, Vol. 79 (9), pp. 1–12.
8. Hubert Jeroen, Booms Emily, Witbaard Rob, and Slabbekoorn Hans. Responsiveness and habituation to repeated sound exposures and pulse trains in blue mussels. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2022, Vol. 547, pp. 1–10.
9. Grekov A.N., Kabanov A.A., Vyshkvarkova E.V., and Trusevich V.V. Anomaly Detection in Biological Early Warning Systems Using Unsupervised Machine Learning. *Sensors*, 2023, Vol. 5, pp. 26–87.
10. Grekov A.N., Kuzmin K.A., and Mishurov V.Z. Automated Early Warning System for Water Environment Based on Behavioral Reactions of Bivalves. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2019, pp. 1–5.