

Алгоритмически-программный анализ створочной активности моллюсков для обнаружения токсичных загрязнений водной среды

П. В. Гайский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: gaysky@inbox.ru

Поступила 7.10.2021 г.; принята к публикации 8.11.2021 г.; опубликована 24.12.2021 г.

Описаны разработанные и программно-реализованные математические алгоритмы оперативного анализа створочной активности морских (черноморская мидия *Mytilus galloprovincialis*) и пресноводных (перловица *Unio pictorum*) моллюсков в автоматизированных системах автономного биомониторинга общего экотоксикологического состояния контролируемых водных сред. Алгоритмы разработаны на основе анализа наблюдений, долговременных рядов измерительных данных, полученных в натуральных условиях на объектах пресноводного водозабора и прибрежной морской акватории г. Севастополя, и экспериментальных данных лабораторных испытаний по изучению воздействий распространенных водных токсикантов (производные нефтепродуктов, антисептические и моющие средства, аммиак, формалин, щелочи, кислоты, удобрения) и абиотических факторов (изменение солености, температуры, освещенности, растворенного кислорода, акустического и вибрационного воздействия, электромагнитного поля, pH, гидростатического давления, скорости обтекания, содержания органической и неорганической взвеси, концентрации морских альгровирусов и др). В основе алгоритмов используются показатели групповой активности и синхронности реакций моллюсков-биодатчиков, формирующие статистические оценки для принятия решения и автоматической выработки сигнала оповещения биоэлектронной системой контроля. Отработаны и запрограммированы поведенческие модели. Предложены граничные численные значения расчетных параметров анализа и статистической обработки. На основе этих значений может быть обеспечен автоматический токсикологический контроль на водных объектах при использовании разработанных биодатчиков и биоэлектронных комплексов.

Ключевые слова: программный алгоритм, биоэлектронный контроль, двустворчатый моллюск, биодатчик, биоиндикатор, перловица, мидия, алгоритмически-программное обеспечение, водный источник, токсическое загрязнение.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А19-119040590054-4.

© Гайский П. В., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Гайский П. В. Алгоритмически-программный анализ створочной активности моллюсков для обнаружения токсичных загрязнений водной среды // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 81–94. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-81-94

Algorithm-Program Analysis of Shellfish Gape Activity for Toxic Contaminant Detection in Aquatic Environment

P. V. Gaisky

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: gaysky@inbox.ru

Submitted 7.10.2021; revised 8.11.2021; published 24.12.2021

The paper describes the developed and programmed mathematical algorithms of operational analysis of gape activity of marine (Black Sea mussel *Mytilus galloprovincialis*) and freshwater (painter's mussel *Unio pictorum*) mollusks in automated systems of autonomous biomonitoring of general ecotoxicological state of controlled water environments. The algorithms have been developed based on analysis of observations, long-term series of measurement data obtained under field conditions at fresh water intake facilities and coastal marine waters of Sevastopol, and experimental data of laboratory tests for studying the effects of common water toxicants (petroleum derivatives, antiseptics and detergents, ammonia, formalin, alkalis, acids, fertilizers) and abiotic factors (changes in salinity, temperature, illumination, dissolved oxygen, acoustic and vibration effects, electromagnetic field, pH, hydrostatic pressure, flow rate, content of organic and inorganic suspended matter, concentration of marine algoviruses, etc.). The algorithms use indicators of group activity and synchronism of reactions of shellfish biosensors, which form statistical estimates allowing a bioelectronic control system to make a decision and automatically generate an alarm signal. Behavioral models have been developed and programmed. The paper proposes boundary numerical values of calculated parameters of analysis and statistical processing. These values can be based on to provide automatic toxicological control in water environment when using the developed biosensors and bioelectronic complexes.

Keywords: program algorithm, bioelectronic control, bivalve mollusk, biosensor, bioindicator, *Unio pictorum*, painter's mussel, mussel, algorithmic software, water source, toxic contamination.

Acknowledgements: the research was performed under state task on topic no. № AAAA-A19-119040590054-4.

For citation: Gaisky, P.V., 2021. Algorithm-Program Analysis of Shellfish Gape Activity for Toxic Contaminant Detection in Aquatic Environment. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 81–94. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-81-94 (in Russian).

Введение

Задача обработки измерительной информации биоэлектронных комплексов, как и любого современного прибора контроля, решается при использовании микроконтроллерной и компьютерной техники с помощью разработанного специализированного программного обеспечения (ПО). В основные

задачи ПО при этом входят: первичная регистрация данных, получение с помощью градуировочных характеристик измерительных каналов значений физических параметров и вторичная обработка информации [1–5].

Для биоэлектронных систем контроля вторичная обработка данных, кроме численно-графического вывода результатов, включает анализ статистических характеристик измерительной информации и на основе заданных граничных значений и моделей принятия решения о выработке сигнала о превышении тех или иных показателей, отражающих общее экотоксикологическое состояние среды. Сложность анализа данных реакций биологических организмов состоит в неоднозначности оценок, отсутствии прямой метрологической связи и математического аппарата расчета конечных показателей. Поэтому для увеличения достоверности оценок в системах одновременно используют групповые показатели биодатчиков с дальнейшей выборкой и условным осреднением, а на условия функционирования накладывается ряд ограничений, максимально исключающих внешние искажающие факторы.

В автоматическом режиме работы биосенсорных систем функции такой вторичной обработки полностью возлагаются на встроенное алгоритмически-программное обеспечение.

При использовании в качестве оперативных биосенсоров двустворчатых моллюсков традиционно регистрируется их створочная активность [6–10] или кардиоактивность [11]. Поскольку динамика раскрытия створок напрямую связана с жизнедеятельностью (питание, выброс продуктов метаболизма, размножение, закрепление и перемещение) и поведенческой активностью моллюска и, в частности для перловицы и мидии, хорошо моделируется, то для ее анализа возможна разработка автоматизированных алгоритмов.

Аппаратура и данные

В рамках создания и сопровождения экспериментальных и опытных образцов автоматизированных биоэлектронных комплексов («Биопост», «БиоG8», «Биостраж», «Биомонитор», «Биомонитор-Л»), использующих в качестве живых организмов-биодатчиков пресноводных и морских двустворчатых моллюсков (перловица и мидия), был разработан пакет программ¹⁾ для автономной и телеметрической регистрации и обработки измерительных данных. Алгоритмы анализа групповой створочной активности, которые были созданы в рамках выполнения этой работы и проведения натурных и лабораторных экспериментов, легли в основу создаваемой автоматизированной биосенсорной системы обнаружения токсических загрязнений водной среды. В составе референтных групп моллюсков (от 8 до 16 шт.), установленных на погружных модулях приборов, использовались

¹⁾ Гайский П. В. Программа для первичной регистрации и обработки измерительных данных биоэлектронных комплексов экологического мониторинга на базе двустворчатых моллюсков «BIOMON» [Электронный ресурс]. Электрон. дан. и прогр. Севастополь : ИПТС, 2020. № гос. регистрации RU2020661537.

образцы размером от 4 до 8 см. При разработке поведенческих моделей анализировались данные, полученные с 2008 г. при постановке погружных биоэлектронных комплексов в прибрежных морских бухтах г. Севастополя и на системе пресного водозабора (р. Черная, 2013–2019 гг.). Реакции на токсические воздействия анализировались на основе результатов лабораторных экспериментов в аквариумных и проточных системах. За исключением различающихся реакций на звук, освещенность и соленость [12], поведенческие особенности мидии и перловицы на токсические воздействия и значимые абиотические воздействия по своему характеру в основном совпадали. Присутствовали суточные сезонные циклы активности. Физическое значение раскрытия (расстояния в мм) створок (РС) рассчитывалось исходя из индивидуальных градуировочных метрологических характеристик каждого биодатчика²⁾ измерителя по формуле

$$PC = a_4 - \frac{1}{a_0 + N_X \cdot (a_1 + N_X \cdot (a_2 + N_X \cdot a_3))},$$

где N_X – код соответствующего биодатчика; a_0, a_1, a_2, a_3 – градуировочные коэффициенты, полученные из полинома зависимости $f(N_X) = \frac{1}{\text{РДМ}}$, РДМ – расстояние между датчиком и магнитом, мм; a_4 – первоначальное (максимальное) расстояние между датчиком и магнитом, мм, после непосредственной установки каждой мидии в закрытом состоянии.

Результаты

В процессе исследований для алгоритмически-программного анализа были выделены три основные групповые характеристики створочной активности: амплитуда раскрытия створок, синхронность схлопывания створок и динамика (частота) во времени.

Расчет показателя групповой створочной активности:

$$A_{j-N_A/2} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_A} |X_{i,j} - X_{i,j-K_A}|}{M \cdot N_A \cdot A_{\max}} \cdot 100\%,$$

где $X_{i,j}$ – величина раскрытия створок i -го моллюска в единицу времени j ; K_A – временной интервал между отсчетами в ряде в секундах; M – количество работоспособных моллюсков (биодатчиков) в данный момент времени; N_A – длина скользящего интервала-ряда в отсчетах (при опросе датчиков один раз в секунду соответствует количеству секунд); A_{\max} – максимально заданная амплитуда.

Расчет показателя групповой синхронности закрытия/раскрытия створок:

²⁾ Устройство для измерения двигательной активности створок моллюсков : пат. 2625673 Рос. Федерация : МПК⁷ А 01 К 61/00 G 01 N 33/18 / Гайский П. В. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Морской гидрофизический институт РАН». № 2014152780 ; заявл. 12.24.2014 ; опубл. 07.18.2017, Бюл. № 20. 9 с.

$$S_{j-N_S/2} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_S} (X_{i,j-K_S} - X_{i,j}) \cdot N_-}{M^2 \cdot N_S \cdot S_{\max}} \cdot 100\%,$$

где $X_{i,j}$ – величина раскрытия створок i -го моллюска в единицу времени j ; K_S – временной интервал между отсчетами в ряде в секундах; N_- – количество разниц в подсумме с положительным знаком (направленных на закрытие створок); M – количество работоспособных моллюсков (биодатчиков) в данный момент времени; N_S – длина скользящего интервала-ряда в отсчетах (при опросе датчиков один раз в секунду соответствует количеству секунд); S_{\max} – максимально заданная амплитуда.

Расчет показателя уровня групповой раскрытости створок:

$$R_{j-N_R/2} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_R} X_{i,j}}{M \cdot N_R \cdot R_{\max}} \cdot 100\%,$$

где $X_{i,j}$ – величина раскрытия створок i -го моллюска в единицу времени j ; M – количество работоспособных моллюсков (биодатчиков) в данный момент времени; N_R – длина скользящего интервала-ряда в отсчетах (при опросе датчиков один раз в секунду соответствует количеству секунд); R_{\max} – максимально заданная амплитуда.

Для формирования поведенческих моделей использовалось сочетание указанных характеристик по последовательности, амплитуде и временному масштабу.

Для обнаружения внезапного токсического загрязнения были определены следующие функциональные состояния (рис. 1):

- синхронное уменьшение раскрытия створок до минимальных значений (проявление защитной реакции – схлопывание);
- нахождение моллюсков в состоянии относительного закрытия створок и пониженной створочной активности;
- вынужденные для жизнедеятельности кратковременные схлопывания створок с отсутствием синхронности, сопровождающиеся пониженными показателями створочной активности и раскрытости.

Для отмерших моллюсков характерны нулевые показатели створочной активности и максимум раскрытости створок в течение заданного периода времени.

При формировании модели хронического токсического загрязнения учитываются:

- снижение общей активности (уменьшение амплитуды и количества схлопываний створок) в течение периода от нескольких часов до нескольких суток;
- нарушение установленных сезонных суточных и полусуточных циклов активности (анализируется наличие/отсутствие и приведенное значение амплитуды экстремумов (гармоник 12 и 24 ч) в периодограмме спектра скользящего среднечасового показателя створочной активности) (рис. 2, 3);
- повышение летальности (относительно заданного уровня).

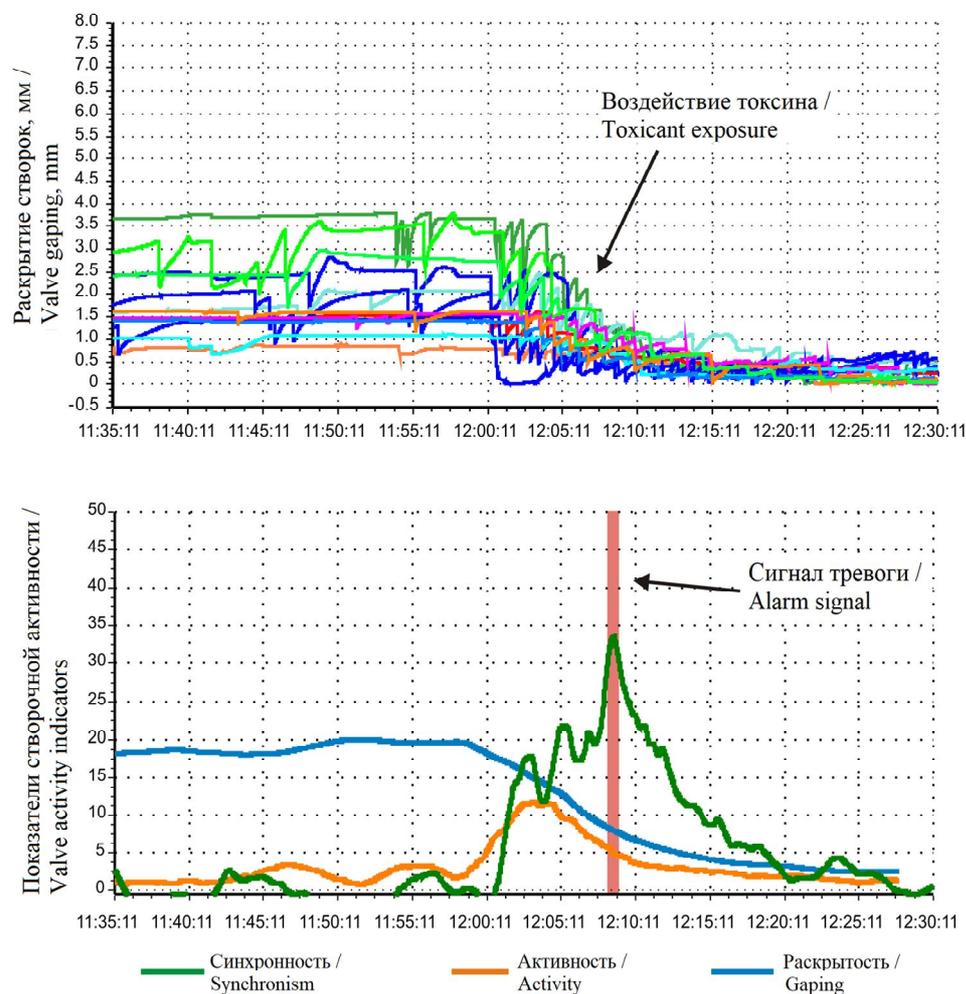
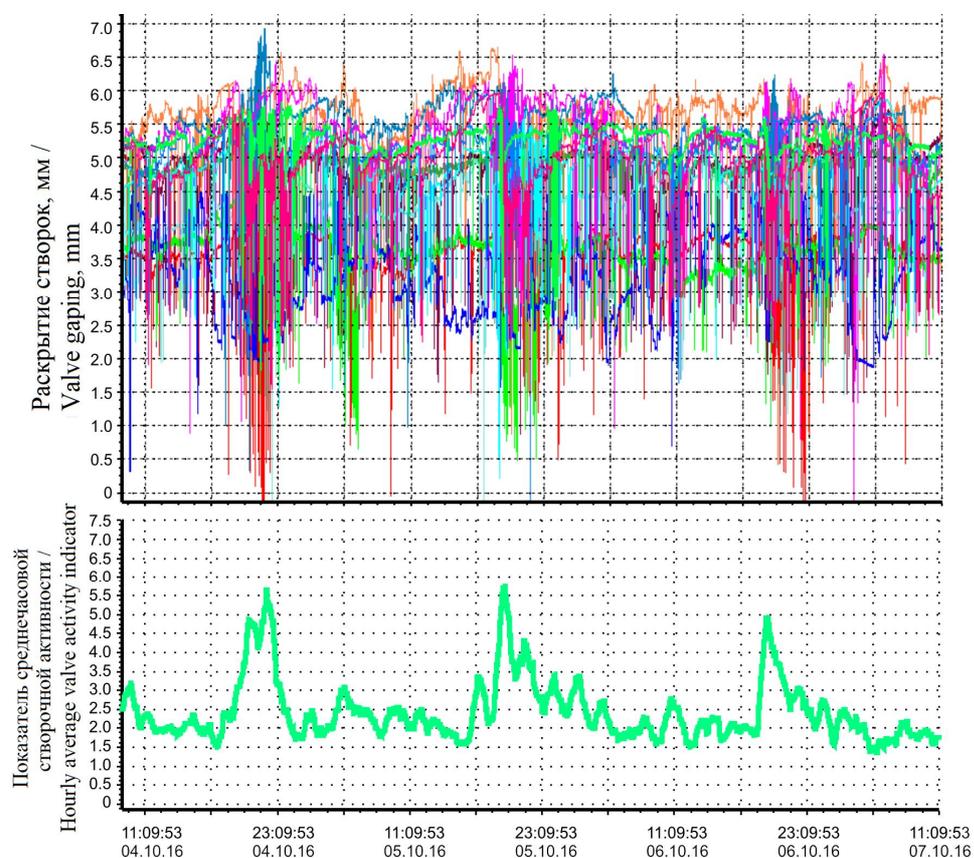


Рис. 1. Пример оперативного обнаружения токсического воздействия с помощью расчетных показателей

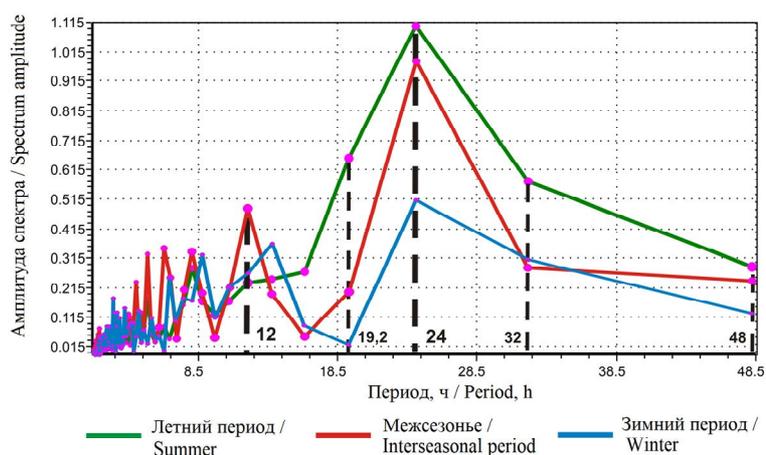
Fig. 1. Example of prompt detection of toxic effects using calculation indicators

Основные численные параметры для разработанных алгоритмов представлены в табл. 1–3. Предложенные граничные значения и временные интервалы получены эмпирическим путем при обработке статистических и экспериментальных данных и могут корректироваться в зависимости от состава референтной группы (размеров и количества) моллюсков. Выход за пределы заданных граничных стандартных значений является основанием для системы сигнализировать и обработать внештатную ситуацию. Параллельный анализ индивидуальных показателей (каждого биодатчика) раскрытости створок необходим для автоматического исключения из расчетов отмерших моллюсков (за год непрерывных наблюдений в естественных условиях – до 25 % от состава референтной группы), а также биодатчиков, вышедших за пределы рабочего диапазона.



Р и с . 2 . Пример стандартного суточного цикла групповой активности моллюсков

F i g . 2 . Example of a standard daily cycle of mollusk group activity



Р и с . 3 . Примеры сезонных периодограмм створочной активности моллюсков (мидии и перловицы), включая суточный цикл

F i g . 3 . Examples of seasonal periodograms of mollusks (mussels and painter's mussels) gape activity including the daily cycle

Таблица 1. Параметры учета показателей хронического загрязнения
 Table 1. Parameters of record of indicators of chronic toxicol pollution

Показатель / Indicator	Период регистрации, с / Registration period, s	Период анализа / Analysis period	Длина ряда по времени / Series duration	Стандартный диапазон / Standard range
Среднеминутная скользящая относительная групповая активность / One minute average moving relative group activity	1	1 с / 1 s	60 с / 60 s	0.3÷12
Среднедесятиминутная скользящая относительная групповая активность / Ten minute average moving relative group activity	1	1 с / 1 s	600 с / 600 s	0.5÷9
Среднечасовая скользящая относительная групповая активность / Hourly average moving relative group activity	1	1 ч / 1 s	1 ч / 1 h	0.7÷6
Спектральный показатель амплитуды суточной гармоник по данным среднечасовой активности / Spectral indicator of daily harmonic curve amplitude as per hourly average activity data	600	1 ч / 1 h	96 ч / 96 h	Максимальный экстремум: 0.5÷0.8 (зимний сезон), 0.8÷2 (летний сезон) / Maximum extremum: 0.5÷0.8 (winter), 0.8÷2 (summer)

Таблица 2. Параметры учета показателей внезапного токсического загрязнения
 Table 2. Parameters of record of indicators of sporadic toxic pollution

Показатель / Indicator	Период регистрации, с / Registration period, s	Период анализа, с / Analysis period, s	Значения параметров / Parameter values	Стандартный диапазон / Standard range
Оперативная групповая активность створок / Prompt group valve activity	1	1	$N_A = 300$ с $K_A = 10$ $A_{\max} = 1$	$0.5 < A_j < 20$
Групповая синхронность закрытия створок / Group synchronism of valve closing	1	1	$N_S = 300$ с $K_S = 60$ $S_{\max} = 10$	$-20 < S_j < 20$
Уровень групповой раскрытости створок / Level of group garing	1	1	$N_R = 300$ с $R_{\max} = 10$	$10 < R_j < 3$

Таблица 3. Параметры учета показателей для исключения биодатчика из анализа
 Table 3. Parameters of record of indicators to exclude a biosensor from analysis

Показатель / Indicator	Период расчета/ регистрации, с / Calculation/ registration period, s	Период анализа, с / Analysis period, s	Длина ряда по времени, ч / Series duration, h	Стандартный диапазон / Standard range
Среднечасовая скользящая относительная индивидуальная активность / Hourly average moving relative individual activity	1	1	1	$A_{ij} < 0.2$
Уровень индивидуальной раскрытости створок / Individual garing level	1	1	1	$R_{ij} > 4$

Работа алгоритмов основана на последовательном постоянном анализе указанных расчетных показателей. В случае превышения заданных граничных значений формируется предусмотренный системой сигнал оповещения. К примеру, при внезапном воздействии токсина (рис. 1) анализируется одновременная совокупность значений показателей ($A_j < 5$, $S_j > 20$, $R_j < 10$). Значимые абиотические факторы (в первую очередь прямое непрерывное механическое воздействие, которое сходно с действием острого токсиканта), приводящие к ложной тревоге, в условиях автоматизированного контроля должны быть исключены.

Так называемая тонкая настройка анализа может быть осуществлена только после предварительных испытаний на объекте в новых условиях, поскольку первоначальные граничные значения базируются на среднестатистических показателях известных экспериментальных данных. Несмотря на это, быстрая адаптация используемых моллюсков к относительно новым условиям водной среды позволяет использовать предложенные алгоритмы и для предварительного оперативного интегрального анализа токсичности в кратковременном 1–2-дневном мониторинге с помощью мобильных погружных биоэлектронных комплексов [13] с постоянно установленными моллюсками без предварительной настройки. Адаптация моллюсков после 1–2-часовой транспортировки из базовой лабораторной проточной аквариумной системы или постоянного места дислоцирования в бухте или водоеме на объекте контроля составляет менее 5 ч (рис. 4, 5).

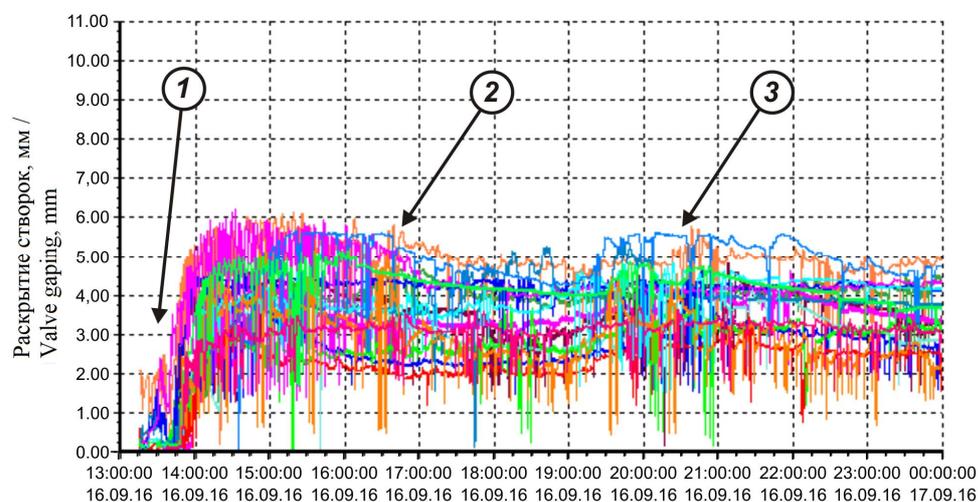


Рис. 4. Пример изменения створочной активности при адаптации моллюсков в новых условиях среды после транспортировки (1 – помещение прибора с моллюсками в воду; 2 – выход в стандартный режим; 3 – проявление суточной (вечерней) активности)

Fig. 4. Example of change of gape activity during adaptation of mollusks in new environment conditions after transportation (1 – device with mollusks is placed into water, 2 – standard mode is entered, 3 – display of daily (evening) activity)

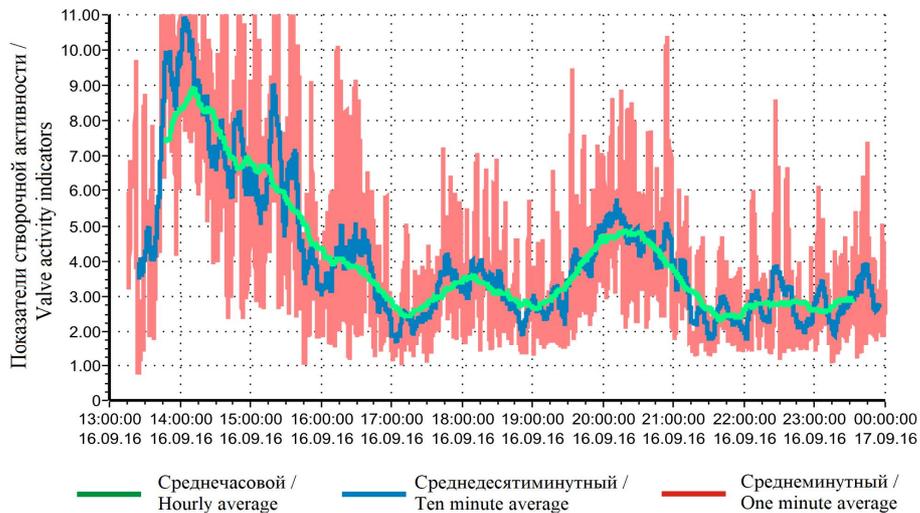


Рис. 5. Пример графиков показателей створочной активности при адаптации моллюсков в новых условиях среды после транспортировки
 Fig. 5. Example of plots of indicators of valve activity during adaptation of mollusks in new environment conditions after transportation

Для отладки работы программных алгоритмов были разработаны программные модели внезапных и хронических токсических воздействий, которые в режиме имитации в качестве первичных фоновых используют реальные экспериментальные данные измерений (рис. 6).

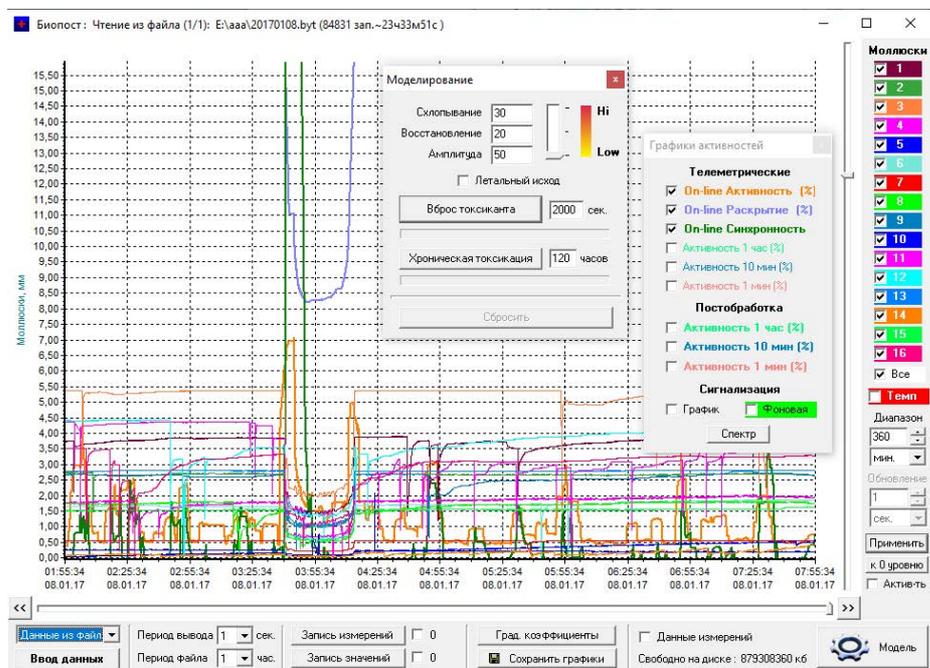


Рис. 6. Пример работы программной модели с использованием реальных данных
 Fig. 6. Example of how the software model works using real data

Заключение

Разработанные и запрограммированные алгоритмы оперативного анализа поведенческих реакций (мидии и перловицы), выраженных в показателях створочной активности, могут обеспечить автоматизированный контроль интегральной токсикологической обстановки на морском и пресноводном объекте с помощью биоэлектронных комплексов. Это позволяет создавать оперативные автономные системы экологического мониторинга с индикацией тревожных событий в дистанционном режиме, обеспечивающие функционирование без сопровождения до года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The conceptual basis of the biomarker approach / M. N. Depledge [et al.] // Biomarkers / D. B. Peakall, L. R. Shugart (eds.). Berlin ; Heidelberg : Springer, 1983. P. 15–29. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1_2
2. Kramer K. J. M., Jenner H. A., de Zwart D. The valve movement response of mussels: a tool in biological monitoring // Hydrobiologia. 1989. Vol. 188, iss. 1. P. 433–443. <https://doi.org/10.1007/BF00027811>
3. De Zwart D., Kramer K. J. M., Jenner H. A. Practical experiences with the biological early warning system “mosselmonitor” // Environmental Toxicology and Water Quality. 1995. Vol. 10, iss. 4. P. 237–247. doi:10.1002/TOX.2530100403
4. Quality assessment of freshwater ecosystems by the functional state of bivalved mollusks / S. V. Kholodkevich [et al.] // Water Resources. 2019. Vol. 46, iss. 2. P. 249–257. <https://doi.org/10.1134/S0097807819020064>
5. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations / S. V. Kholodkevich [et al.] // Environmental Bioindicators. 2008. Vol. 3, iss. 1. P. 23–34. <https://doi.org/10.1080/15555270701885747>
6. Трусевич В. В., Гайский П. В., Кузьмин К. А. Автоматический биомониторинг водной среды с использованием реакции двусторчатых моллюсков // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 3. С. 75–83.
7. Особенности кардиоактивности и движения створок *Mytilus galloprovincialis* Lam. в норме и при токсическом воздействии / С. В. Холодкевич [и др.] // Карадаг – 2009 : сборник научных трудов, посвященный 95-летию Карадагской научной станции и 30-летию Карадагского природного заповедника Национальной академии наук Украины / Ред. А. В. Гаевская, А. Л. Морозова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. С. 524–537. URL: https://repository.marine-research.org/bitstream/299011/513/1/48_Kholodkevich_524-537.pdf (дата обращения: 13.12.2021).
8. Биоэлектронный мониторинг поверхностных вод / С.В. Холодкевич [и др.] // Мир измерений. 2011. № 10. С. 6–13. URL: <https://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=53857> (дата обращения: 13.12.2021).
9. Трусевич В. В., Кузьмин К. А., Мишуков В. Ж. Мониторинг водной среды с использованием пресноводных двусторчатых моллюсков // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 7 (27). С. 83–93.
10. Гайский П. В. Программный алгоритм расчета активности двусторчатых моллюсков на примере перловицы *Unio crassus* // Системы контроля окружающей среды. 2016. Вып. 6 (26). С. 52–58.

11. Куракин А. С., Холодкевич С. В., Иванов А. В. Программно-алгоритмическое обеспечение диагностики качества вод с использованием биоэлектронной системы регистрации и анализа в реальном времени кардиоритма беспозвоночных с экзоскелетом // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 4 (30). С. 38–47.
12. Гайский П. В. Влияние освещенности и звука на поведенческие реакции мидии и перловицы // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 4 (42). С. 40–49. doi:10.33075/2220-5861-2020-4-40-49
13. Гайский П. В., Гайский В. В. Мобильные биоэлектронные комплексы // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : ИПТС, 2015. Вып. 1 (21). С. 19–23.

Об авторе:

Гайский Павел Витальевич, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией инновационного морского приборостроения, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-код: 7789-0658**, gaysky@inbox.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Depledge, M.N., Amaral-Mendes, J.J., Daniel, B., Halbrook, R.S., Cloepper-Sams, P., Moore, M.N. and Peaccall, D.P., 1983. The Conceptual Basis of the Biomarker Approach. In: D. B. Peakall and L. R. Shugart, eds., 1983. *Biomarker*. Berlin; Heidelberg: Springer, pp. 15–29. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1_2
2. Kramer, K.J.M., Jenner, H.A. and de Zwart, D., 1989. The Valve Movement Response of Mussels: A Tool in Biological Monitoring. *Hydrobiologia*, 188(1), pp. 433–443. <https://doi.org/10.1007/BF00027811>
3. De Zwart, D., Kramer, K.J.M. and Jenner, H.A., 1995. Practical Experiences with the Biological Early Warning System “Mosselmonitor”. *Environmental Toxicology and Water Quality*, 10(4), pp. 237–247. doi:10.1002/TOX.2530100403
4. Kholodkevich, S.V., Sharov, A.N., Chuiko, G.M., Kuznetsova, T.V., Gapeeva, M.V. and Lozhkina, R.A., 2019. Quality Assessment of Freshwater Ecosystems by the Functional State of Bivalved Mollusks. *Water Resources*, 46(2), pp. 249–257. <https://doi.org/10.1134/S0097807819020064>
5. Kholodkevich, S.V., Ivanov, A.V., Kurakin, A.S., Kornienko, E.L. and Fedotov, V.P., 2008. Real Time Biomonitoring of Surface Water Toxicity Level at Water Supply Stations. *Environmental Bioindicators*, 3(1), pp. 23–34. <https://doi.org/10.1080/15555270701885747>
6. Trusevich, V.V., Gaiskii, P.V. and Kuz'min, K.A., 2010. Automatic Biomonitoring of Aqueous Media Based on the Response of Bivalves. *Physical Oceanography*, 20(3), pp. 231–238. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9080-4>
7. Kholodkevich, S.V., Kuznetsova, T.V., Trusevich, V.V. and Kurakin, A.S., 2009. Peculiarities of Cardiac Activity and Valve Movements of *Mytilus galloprovincialis* Lam. in Norma and during Toxic Treatment. In: A. V. Gaevskaya and A. L. Morozova, eds., 2009. *Karadag – 2009*. Sevastopol, pp. 524–537 (in Russian).

8. Kholodkevich, S.V., Ivanov, A.V., Kornienko, E.L., Kurakin, A.S. and Lyubimtsev, V.A., 2011. [Bioelectronic Monitoring of Surface Waters]. *Measurements World*, (10), pp. 6–13. Available at: <https://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=53857> [Accessed: 13 December 2021] (in Russian).
9. Trusevich, V.V., Kuzmin, K.A. and Mishurov, V.J., 2017. Biomonitoring of the Surface Water Quality with Use of Fresh-Water Bivalvia Molluscs. *Monitoring Systems of Environment*, (7), pp. 83–93 (in Russian).
10. Gaysky, P.V. and Kazankova, I.I., 2016. Program Algorithm of Calculation of Clams Activity on the Example of a Thick Shelled River Mussel *Unio Crassus*. *Monitoring Systems of Environment*, (6), pp. 52–58 (in Russian).
11. Kurakin, A.S., Kholodkevich, S.V. and Ivanov, A.V., 2017. Software and Algorithmic Aspects of the Real-Time Bioelectronic Systems for Heart Rhythm Analysis in Exoskeleton Invertebrates Applied to the Surface Water Quality Assessment. *Monitoring Systems of Environment*, (4), pp. 38–47 (in Russian).
12. Gaysky, P.V., 2020. The Influence of Light and Sound on the Behavioral Responses of Sea and Fresh Water Mussels. *Monitoring Systems of Environment*, (4), pp. 40–49 (in Russian).
13. Gaysky, P.V. and Gaysky V.V., 2015. Mobile Bioelectronic Complexes. *Monitoring Systems of Environment*, (1), pp. 19–23 (in Russian).

About the author:

Pavel V. Gaisky, Leading Research Associate, Head of Innovation Marine Instrument Engineering Laboratory of SCU of Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-code: 7789-0658**, gaysky@inbox.ru

The author has read and approved the final manuscript.