

## Оперативный анализ створочной активности моллюсков в автоматизированных системах экологического биомониторинга

П. В. Гайский

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

Поступила 25.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Описаны особенности оперативного анализа створочной активности пресноводных (перловица *Unio pictorum*) и морских (черноморская мидия *Mytilus galloprovincialis*) двустворчатых моллюсков для созданных автоматизированных систем биоэлектронного экологического контроля. В исследованиях использованы измерительные данные долговременных натуральных и лабораторных экспериментов, полученные с помощью приборов, разработанных автором. Оценка общих поведенческих особенностей, выраженных в динамике и амплитуде групповой створочной активности моллюсков в ответ на различные воздействия, позволила определить типовые поведенческие модели реакций при токсическом воздействии в водной среде контроля. Для оперативного анализа определены основные статистические показатели, которые используются при создании программных алгоритмов автоматического принятия решений системы экологического биомониторинга. В качестве этих показателей прежде всего используются групповые скользящие во временном масштабе оценки синхронности реакций моллюсков, осредненные в различных интервалах времени данные створочной активности и уровень раскрытия створок (групповой и индивидуальный). Наличие установленных моделей, указанных расчетных численных показателей и их допустимых пределов обеспечит стандартизацию подхода к обнаружению факторов токсического воздействия и дальнейшее внедрение подобных систем биомониторинга в пунктах контроля.

**Ключевые слова:** биоэлектронный контроль, двустворчатый моллюск, биодатчик, биоиндикатор, перловица, черноморская мидия, алгоритмически-программное обеспечение, водные источники.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0004.

**Для цитирования:** Гайский П. В. Оперативный анализ створочной активности моллюсков в автоматизированных системах экологического биомониторинга // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 121–130. doi: 10.22449/2413-5577-2021-2-121-130

© 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

# Operational Analysis of Mollusc Valve Activity in Automated Ecological Biomonitoring Systems

P. V. Gaisky

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

Submitted 25.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The article describes features of the operational analysis of valve activity of freshwater (*Unio pictorum*) and marine (Black Sea mussel *Mytilus galloprovincialis*) bivalve molluscs for created automated systems of bioelectronic environmental control. The studies used measuring data obtained from long-term field and laboratory experiments using instruments developed by the author. The assessment of the mollusc general behavioral characteristics expressed in the dynamics and amplitude of group valve activity as a response to various effects made it possible to determine typical behavioral response models of toxic effects in the aquatic control environment. For the operational analysis, the main statistical indicators are identified, which are used to create software algorithms for automatic decision-making of the environmental biomonitoring system. As these indicators are used first of all the group time-sliding estimates of the synchronism of mollusc reactions, the data of valve activity averaged in different time intervals and the gape level (group and individual). The existence of established models, specified calculated numerical indicators and their permissible limits will ensure the standardization of the approach to detection of toxic factors and further implementation of such biomonitoring systems at control points.

**Keywords:** bioelectronic control, bivalve mollusk, biosensor, bioindicator, pearl, Black Sea mussel, algorithmic-software, water sources.

**Acknowledgements:** the work was performed under state order on topic no. 0555-2021-0004.

**For citation:** Gaisky, P.V., 2021. Operational Analysis of Mollusc Valve Activity in Automated Ecological Biomonitoring Systems. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 121–130. doi: 10.22449/2413-5577-2021-2-121-130 (in Russian).

## Введение

Разработанные в России [1–4] и за рубежом [5–7] биоэлектронные измерители с использованием двустворчатых моллюсков в качестве сенсорного элемента биодатчиков нашли широкое применение в экспериментальных и научных исследованиях (URL: [www.mosselmonitor.nl](http://www.mosselmonitor.nl)). Однако внедрение их в состав аттестованных систем и методов контроля на объектах государственного обеспечения и использования водных ресурсов осложнено требованиями стандартизации. Используемые живые организмы имеют свои индивидуальные физиологические особенности, а также региональные и сезонные. Попытка создать своего рода предварительный отбор или выращивание так называемых референтных групп <sup>1)</sup> моллюсков для установки

---

<sup>1)</sup> Патент № 2595867C2 Российская Федерация. Способ выявления и отбора организмов-биосенсоров для оперативной биоиндикации и биомониторинга морских и пресных вод, включая питьевую и сточные воды : 2014118194/15А : заявл. 05.05.2014 : опублик. 27.08.2016 / Гудимов А.В. 16 с.

в биодатчик, а также увеличение численности с целью уменьшения влияния индивидуальных особенностей решают эту проблему только частично. Как показывает опыт, к биодатчикам не применимы четкие нормы контроля за превышением предельно допустимой концентрации (ПДК), т. е. СанПиН в отношении загрязнений химическими продуктами, и стандартные метрологические требования к измерительным каналам. Поэтому для каждого вида моллюсков с учетом экспериментального опыта разрабатывается и совершенствуется свой алгоритм анализа поведенческой активности, который должен повышать достоверность автоматического обнаружения токсичности водной среды. Основные требования при этом предъявляются к программному обеспечению создаваемых автономных биоэлектронных систем автоматического обнаружения токсических загрязнений и выработки сигнала тревоги. Поскольку главное назначение этих систем – первичная индикация и предотвращение возможных последствий, то анализ должен быть максимально оперативным и охватывающим большинство токсикантов в комплексе.

#### **Аппаратура и данные**

В исследованиях использовались авторские биоэлектронные экспериментальные и опытные образцы погружных («Биопост», «БиоG8», «Био-страж», «Биомонитор»<sup>2)</sup>) и лабораторных («Биомонитор-Л»<sup>3)</sup>, «Среда»<sup>4)</sup>) измерительных приборов с отдельными группами моллюсков по 4, 8, 12 и 16 биодатчиков. Оценивались массивы данных, полученные с 2008 г. для мидий в бухтах г. Севастополя и с 2014 г. для перловицы на Черноморском водозаборе. Опыты с токсикантами и воздействием значимых физических факторов среды (изменения температуры, освещенности в различных спектральных диапазонах, магнитного поля, солености, скорости обтекания, звука, кислородного голодания, вибрации, pH и др.) проводились в лабораторных условиях, в отдельных случаях с одновременным использованием аквариумов контроля и опыта. В качестве моллюсков использовались референтные группы разных возрастных категорий: для мидий в лабораторных условиях – группы размером 3–4 см и группы размером 6–7 см. Для мидий в натуральных экспериментах (бухты г. Севастополя – интервалы наблюдений по 2–3 месяца с 2008 г.) – группы размером 4–8 см. Для перловицы в лабораторных условиях – группы размером 5–6 см. Для перловицы в натуральных экспериментах на системе водозабора (р. Черная, г. Севастополь – более трех лет непрерывных наблюдений) – группы размером 5–7 см.

---

<sup>2)</sup> Гайский П. В. Опыт разработки экологических биоэлектронных комплексов на базе двустворчатых моллюсков // Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2019). Т. II. М. : ИД Академии Жуковского, 2019. С. 225–227.

<sup>3)</sup> Гайский П. В. Лабораторные автоматические измерители активности двустворчатых моллюсков // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : МГИ, 2013. Вып. 19. С. 55–59.

<sup>4)</sup> Гайский П. В. Модернизация электронного блока лабораторного стенда «Среда» // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 38. С. 5–10. doi:10.33075/2220-5861-2019-4-5-10

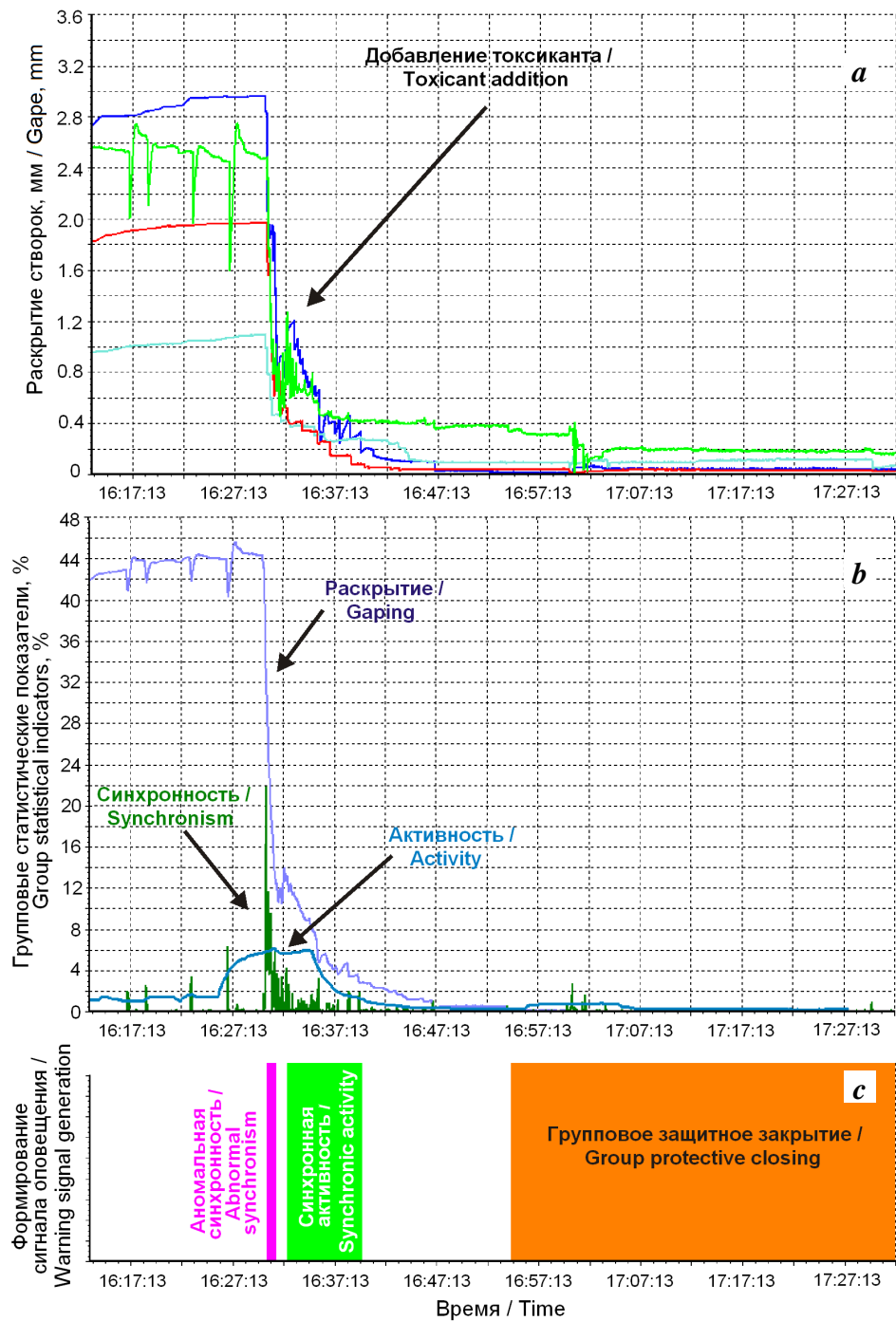
## Результаты

При использовании моллюсков в качестве элементов биодатчиков токсическое воздействие контролируемой водной среды условно можно разделить на хроническое и внезапное. При этом реальная классификация связана с искусственным техническим порогом чувствительности системы и алгоритмами анализа измерительных данных. То есть под хроническим воздействием зачастую понимается длительное воздействие, приводящее к уменьшению общей активности, сбою суточных и полусуточных циклов [8], а в конечном счете – к летальному исходу (максимальному раскрытию и обездвиживанию створок). В этом случае отсутствует выраженная (в течение нескольких секунд и минут) групповая синхронная реакция или летальный исход, а значимые (регистрируемые алгоритмом) статистические спектральные и корреляционные показатели изменяются в течение двух и более суток [9]. На достоверность этих показателей в необорудованных условиях контроля также могут одновременно оказывать влияние природные и внешние локальные антропогенные факторы.

При внезапном токсическом воздействии как у перловицы, так и у мидий возникает четкая синхронная защитная реакция в виде схлопывания створок, и возвращение к нормальному состоянию происходит через первичные пробные и далее необходимые для поддержки жизнедеятельности (питания и выброса продуктов метаболизма) индивидуальные несинхронные раскрытия – схлопывания. При этом если среда очищается и отсутствуют необратимые последствия для организмов, то обычная жизнедеятельность (створочная активность моллюсков) постепенно восстанавливается. В противном случае наступает отравление, сопровождающееся снижением общей активности, с дальнейшим летальным исходом. Примеры воздействия токсикантов представлены на рис. 1–3.

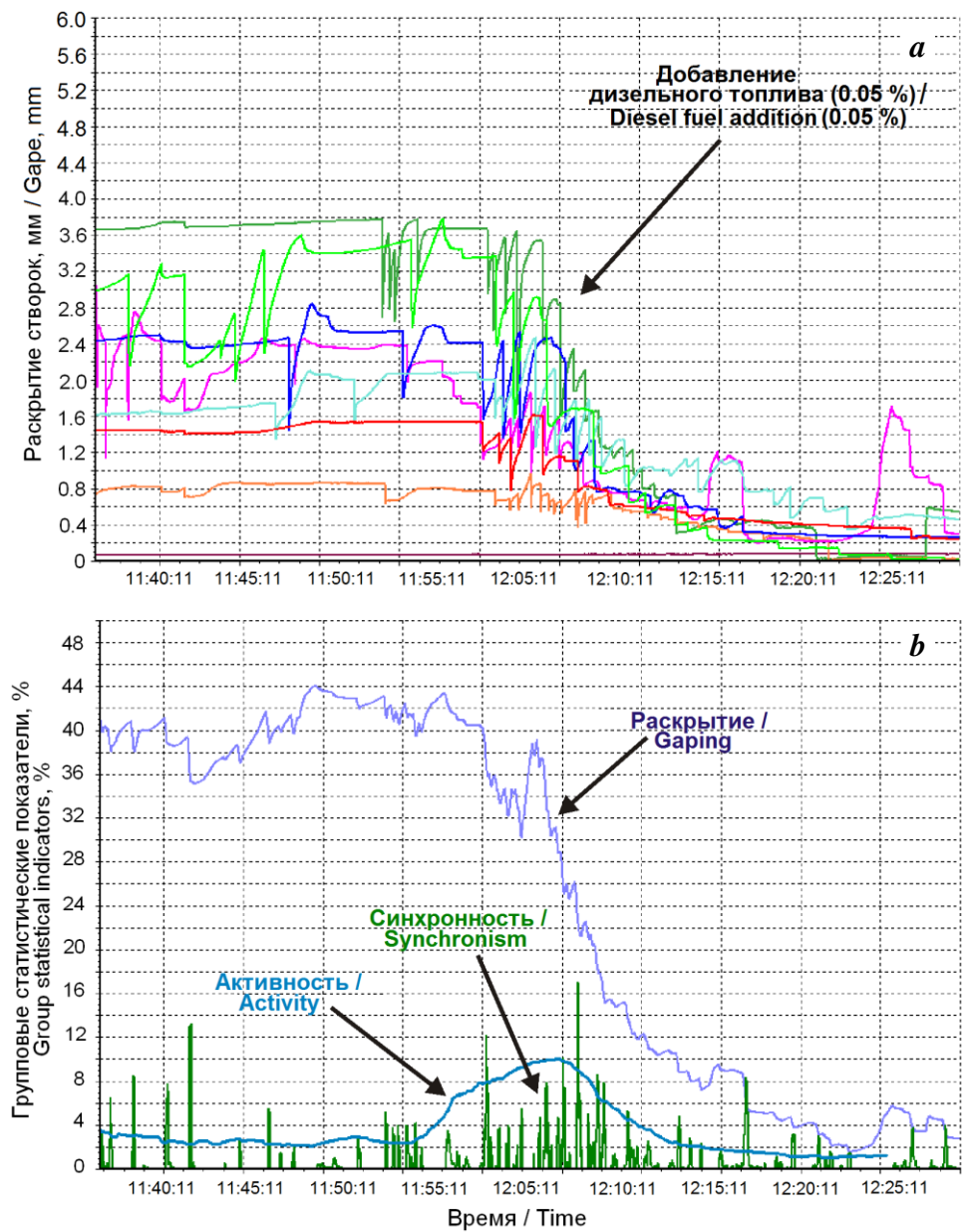
Задержка в оперативном обнаружении токсиканта, которая классифицируется системой как длительное хроническое отравление и приводит к постепенному снижению групповой активности или смерти с фактическим обнаружением в течение 1–2 суток, может привести к значительному распространению загрязнения. В частности, на системе водозабора достаточно нескольких часов для поступления отравляющих веществ в инженерные сети водохозяйственных организаций, что недопустимо.

Эксперименты показывают, что воздействие ряда распространенных токсикантов значимо не отражается на изменении створочной активности моллюсков даже при превышении установленных норм ПДК в несколько раз. Результат их воздействия будет проявляться в реакциях постепенно и классифицироваться алгоритмами анализа как хроническое загрязнение. Оперативная эффективность данной биоэлектронной системы в этих случаях будет низкой. С другой стороны, обнаружение данных токсикантов с помощью существующего стандартного набора средств систематического контроля водных источников также сомнительно и произойдет уже после появления вторичных эффектов через несколько суток.



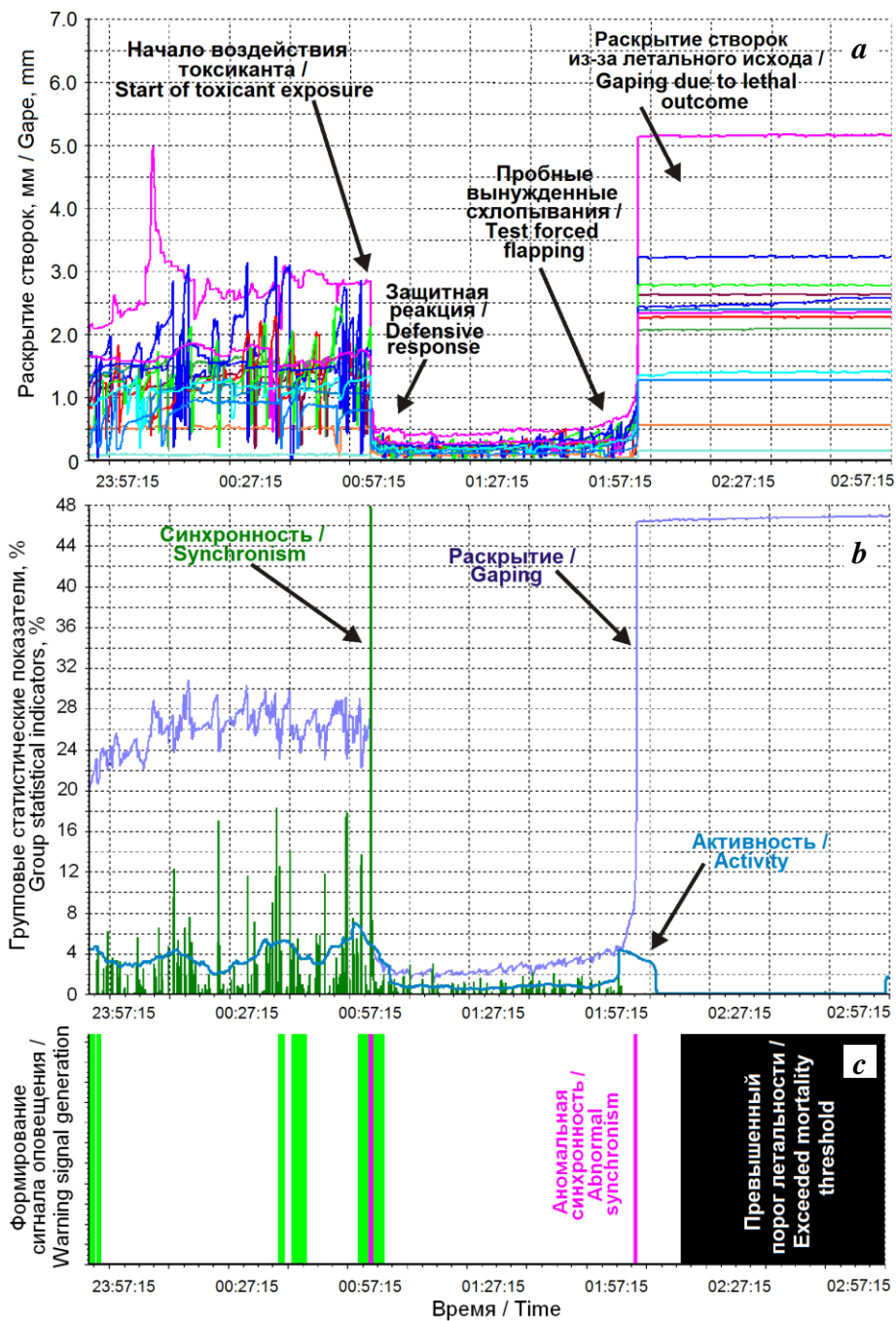
Р и с . 1 . Пример воздействия выраженного токсиканта: динамика створочной активности моллюсков (a), графики основных статистических показателей (b), хронология срабатывания сигналов оповещения (c)

Fig . 1 . Example of exposure to a pronounced toxicant: dynamics of mollusc valve activity (a), graphs of main statistical indicators (b), chronology of warning signals actuation (c)



Р и с . 2 . Пример первичного воздействия токсиканта постепенного действия: динамика створочной активности моллюсков (а), графики основных статистических показателей (b)

Fi g . 2 . Example of the primary effect of a gradual toxicant dynamics of mollusc valve activity (a), graphs of the main statistical indicators (b)



Р и с . 3 . Пример работы типовой модели токсического воздействия с групповым летальным исходом: динамика створочной активности моллюсков (a), графики основных статистических показателей (b), хронология срабатывания сигналов оповещения (c)

Fig . 3 . Example of work of a typical model of toxic exposure with group lethal outcomes: dynamics of mollusc valve activity (a), graphs of main statistical indicators (b), chronology of warning signals actuation (c)

Для разработки основного алгоритма оперативного анализа створочной активности моллюсков рассматриваются прежде всего синхронные кратковременные групповые выраженные реакции. К ним можно отнести:

– синхронное схлопывание в течение минуты и нахождение в закрытом состоянии в течение 5 мин и более (рис. 1, *a*);

– постепенное (длительностью до часа) групповое закрытие створок, сопровождающееся относительным увеличением активности в виде учащенных хаотических индивидуальных схлопываний (рис. 2, *a*);

– сохраняющийся низкий уровень (длительностью до часа) скользящего среднего показателя групповой активности при сохраняющемся минимальном раскрытии створок (защита) или, наоборот, при максимальном раскрытии (летальный исход) (рис. 3, *a*).

Синхронные графики расчетных численных показателей (синхронность, активность, раскрытие) для представленных примеров изображены на рис. 1, *b*; 2, *b*; 3, *b* соответственно. На основе их значений и пороговых границ, установленных по амплитуде и времени, формируется соответствующий сигнал оповещения (тревоги) (рис. 1, *c*; 3, *c*).

Пороговые значения задаются в системе<sup>5)</sup> в зависимости от состава референтной группы установленных моллюсков-биосенсоров (размеров, численности) и особенностей конкретного места размещения, в которые, в частности для мидий, могут входить фоновые неустранимые звуковые и световые воздействия. В процессе работы в случае долговременных автономных измерений вышедшие из строя конструктивы, или электроника биодатчиков, или умершие моллюски автоматически исключаются из оперативного анализа. Алгоритмически это отслеживается, соответственно, индивидуальным выходом показаний за градуировочные пределы и долговременным (около 4 ч) отсутствием активности при максимальной раскрытости створок.

### **Заключение**

На основе сформулированных моделей поведенческой створочной активности моллюсков-биодатчиков и пороговых значений разрабатываются стандартизированные программные алгоритмы систем автоматического оперативного обнаружения токсических загрязнений. В качестве главных первичных статистических групповых показателей используются синхронность, раскрытие и разнопериодная скользящая по времени активность. Результатом работы системы является выработка соответствующего сигнала оповещения для проведения оперативных мер согласно установленному протоколу.

---

<sup>5)</sup> Программа для первичной регистрации и обработки измерительных данных биоэлектронных комплексов экологического мониторинга на базе двустворчатых моллюсков «BIOMON» / П. В. Гайский ; ИПТС. Севастополь, 2020. № гос. регистрации 2020661537.



#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка качества пресноводных экосистем по функциональному состоянию двустворчатых моллюсков / С. В. Холодкевич [и др.] // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 2. С. 214–224. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596462214-224>
2. Биоэлектронный мониторинг поверхностных вод / С. В. Холодкевич [и др.] // Мир измерений. 2011. № 10. С. 6–13.
3. 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>
4. 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.
5. The mussel watch / E. D. Goldberg [et al.] // Environmental Conservation. 1978. Vol. 5, iss. 2. P. 101–125. doi:10.1017/S0376892900005555
6. The conceptual basis of the biomarker approach / M. N. Depledge [et al.] // Biomarkers. Berlin ; Heidelberg : Springer, 1993. P. 15–29. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1_2)
7. 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. <https://doi.org/10.1002/tox.2530100403>
8. Гайский П. В. Возможности анализа хронических загрязнений водных источников с помощью биоэлектронных систем с двустворчатыми моллюсками // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 1. С. 43–53. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-1-43-53>
9. Гайский П. В., Шлык А. В. Результаты опытной эксплуатации экспериментального биоэлектронного комплекса «Биопост» // Системы контроля окружающей среды. 2018. Вып. 4. С. 6–16. doi:10.33075/2220-5861-2018-4-6-16

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](mailto:gaysky@inbox.ru)

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

#### REFERENCES

1. Kholodkevich, S.V., Sharov, A.N., Kuznetsova, T.V., Chuiko, G.M., 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>
2. 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 (in Russian).
3. 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>

4. Trusevich, V.V., Gaiskii, P.V. and Kuzmin, 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>
5. Goldberg, E.D., Bowen, V.T., Farrington, J.W., Harvey, G., Marin, J.H., Parker, P.L., Risebrough, R.W., Robertson, W., Schneider, E. and Gamble, E., 1978. The Mussel Watch. *Environmental Conservation*, 5(2), pp. 101–126. doi:10.1017/S0376892900005555
6. Depledge, M.H., Amaral-Mendes, J.J., Daniel, B., Halbrook, R.S., Klopper-Sams, P., Moore, M.N. and Peakall, D.B., 1993. The Conceptual Basis of the Biomarker Approach. In: D. B. Peakall and L. R. Shugart, eds., 1993. *Biomarkers*. NATO ASI Series, vol. 68. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 15–29. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1_2)
7. 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. <https://doi.org/10.1002/tox.2530100403>
8. Gaisky, P.V., 2021. Possibilities of Analysis of Chronic Contamination of Water Sources using Bioelectronic Systems with Bivalve Mollusks. *Monitoring Systems of Environment*, (1), pp. 43–53 <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-1-43-53> (in Russian).
9. Gaisky, P.V. and Shlik, A.V., 2018. Results of Trial Operation of the Experimental Bioelectronic Complex “Biopost”. *Monitoring Systems of Environment*, (4), pp. 6–16. doi:10.33075/2220-5861-2018-4-6-16 (in Russian).

*About the author:*

**Pavel V. Gaisky**, Leading Research Associate, Head of Innovation Marine Instrument Engineering Laboratory of SCU, 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](mailto:gaysky@inbox.ru)

*The author has read and approved the final manuscript.*