

## **Биоэлектронная автоматическая станция для контроля состояния водной среды в аквакультуре**

*В.А. Гайский<sup>1</sup>,  
П.В. Гайский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт природно-технических систем  
(ФГБНУ «ИПТС»), г. Севастополь

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН  
(ФГБУН «МГИ» РАН), г. Севастополь

E-mail: gaysky@inbox.ru

На основании опыта разработки и сопровождения океанографического измерительного оборудования сформулировано предложение по созданию комплекса автоматической прибрежной станции, обладающей высокой автономностью и надёжностью при длительном использовании в морских и пресноводных акваториях для оперативного экологического мониторинга прибрежных зон и на фермах аквакультуры. В предлагаемый состав оборудования станции входят биоэлектронный комплекс на базе аборигенных двустворчатых моллюсков и распределённый датчик температуры, измеряющий вертикальный профиль температуры и динамику его изменчивости. Особенностью такой компоновки системы являются высокая надёжность по функционированию погружных узлов и метрологическая стабильность измерительных каналов при длительной эксплуатации в натурных условиях без обслуживания на протяжении срока более года, что позволяет избежать постоянных затрат на сопровождение. Таким образом, могут быть обеспечены долговременный оперативный автоматический контроль значимых гидрологических параметров среды и обобщённая индикация экологического состояния акватории на основе анализа реакций двустворчатых моллюсков как биодатчиков.

**Ключевые слова:** аквакультура, двустворчатые моллюски, биомониторинг, термомонофилемер, мидия.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Создание гидролого-гидрохимических измерительных комплексов для береговой зоны с постановкой на заякоренных буйах, платформах, вежах и пирсах является актуальной задачей для организации телеметрических наблюдений как в сферах жизнедеятельности человека (экология, метеорология), так и в научно-исследовательских и промысловых целях. Однако многие вопросы длительного сопровождения и финансовой поддержки таких систем контроля не решены. Перечень измеряемых параметров является открытым, но большинство погружных химических и оптических датчиков подвержены естественному обрастанию и загрязнению чувствительных элементов, поэтому требуют постоянного обслуживания и периодической метрологической проверки. Измерительная информация на одном горизонте (глубине) — не достаточна для оценки физических процессов в водной среде, а сканирование (зондирование) по глубине требует сопровождения и дополнительной дорогостоящей механической аппаратуры, которая в свою оче-

редь имеет свой ресурс. В сложившихся условиях необходимо создание и использование надёжных и автономных при длительной эксплуатации средств контроля *in situ*, обеспечивающих комплексную оперативную оценку состояния среды. Такие системы, прежде всего, могут быть востребованы на прибрежных фермах аквакультуры двустворчатых моллюсков, поскольку кроме телеметрических экологических данных позволят одновременно изучать процессы жизнедеятельности выращиваемых организмов. Что в конечном итоге обеспечит увеличение продуктивности и развитие современного подхода к разведению мидий и устриц [Холодов, 2017].

### **МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ**

В 2008 году в рамках НИОКР с Гидрометслужбой были разработаны, изготовлены и аттестованы комплексы морской прибрежной гидрологической станции (МПГС) [Гайский, Забурдаев, 2011], предназначенной для контроля гидролого-гидрохимических (температура, солёность, растворённого кислорода, pH), оптических (прозрач-

ность) и гидрофизических (уровень, параметры поверхностного волнения) параметров. Пятилетний опыт сопровождения МПГС на океанографической платформе в пгт Кацивели (Южный берег Крыма) показал, что в зависимости от сезонных и погодных условий измерительные модули станции подвержены различному по интенсивности биологическому обрастанию (рис. 1). В результате – метрологические характеристики оптических и химических каналов ухудшаются в десятки раз. В среднем необслуживаемый срок службы модуля прозрачномера составил 2–3 недели, канала рН и растворенного в воде кислорода – 1 мес., датчика электрической проводимости и акустического измерителя – 2 мес. Химическая защита и механическая очистка сенсоров не даёт ощутимого результата, а в некоторых случаях, вообще не применима.

Требования к постоянному обслуживанию подобных измерителей специалистами делает их невостребованными в коммерческом плане при создании систем контроля параметров водной среды в полевых условиях.

В то же время существуют измерительные системы, надёжность и долговечность которых позволяют обеспечить часть автоматического контроля без сопровождения на срок более года.

Проводимые нами с 2008 года на морских и пресноводных объектах исследования с использованием разработанных биоэлектронных измерительных комплексов на базе двустворчатых моллюсков [Гайский, Трусевич, 2014] показали их эффективность и целесообразность для использования в качестве оперативных индикаторных средств контроля внезапных и хронических отравляющих загрязнений. Наиболее длительные

непрерывные автономные наблюдения без обслуживания с одной референтной группой [Холодкович, 2010; Гудимов, 2016] на приборе в морской воде и в речке проводились нами 6 и 22 месяца (рис. 2) соответственно. Многолетние исследования позволили изучить на базе створочной активности особенности жизнедеятельности таких моллюсков как средиземноморская мидия *Mytilus galloprovincialis*, Lamarck, 1819, перловица *Unio pictorum* (L., 1758) и беззубки *Anodonta*, а также провести эксперименты с устрицами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Использование в качестве биоиндикаторов, близких по своим поведенческим реакциям и свойствам мидий и перловицы, позволили сформулировать основные положения таких наблюдений:

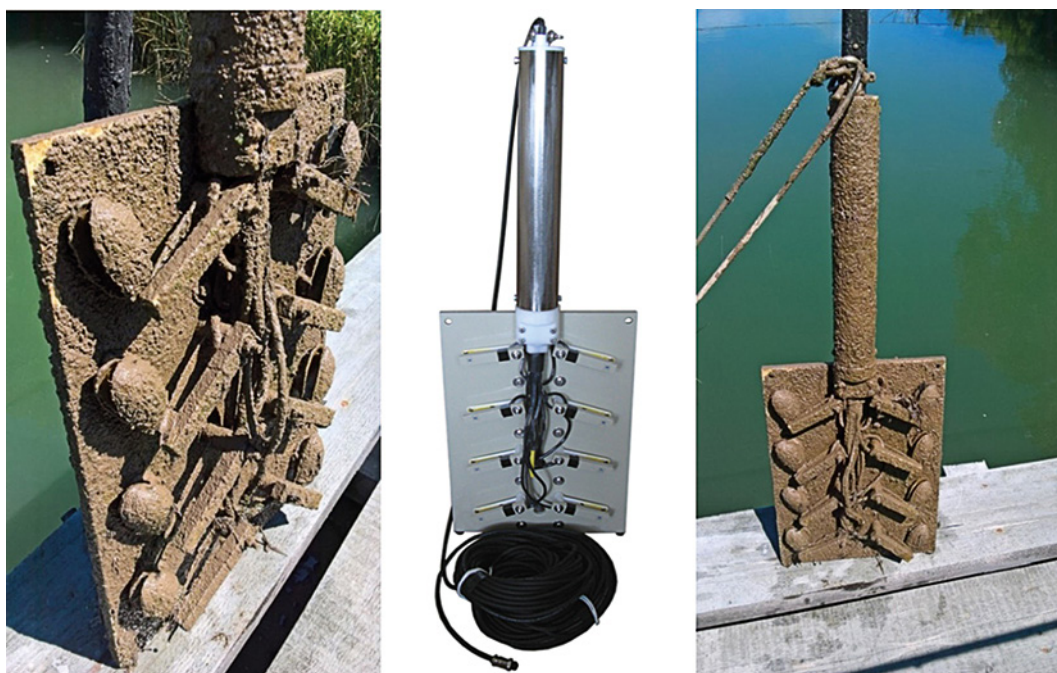
- динамика створочной активности, имеющая в естественных условиях систематичность (прежде всего, суточную) (рис. 3), и постоянство ряда статистических характеристик могут служить интегральным критерием состояния водной среды с биохимической точки зрения (внезапные и хронические загрязнения) при соответствующем анализе и реализованной алгоритмически-программной обработке;

- существует ряд естественных кратковременных абиотических факторов, которые вызывают значимую реакцию (чаще всего защитную – групповое одновременное схлопывание створок в течение нескольких секунд с оперативным возвращением к норме) моллюсков, которые могут быть автоматически распознаны или исключены из анализа (прежде всего – прямое

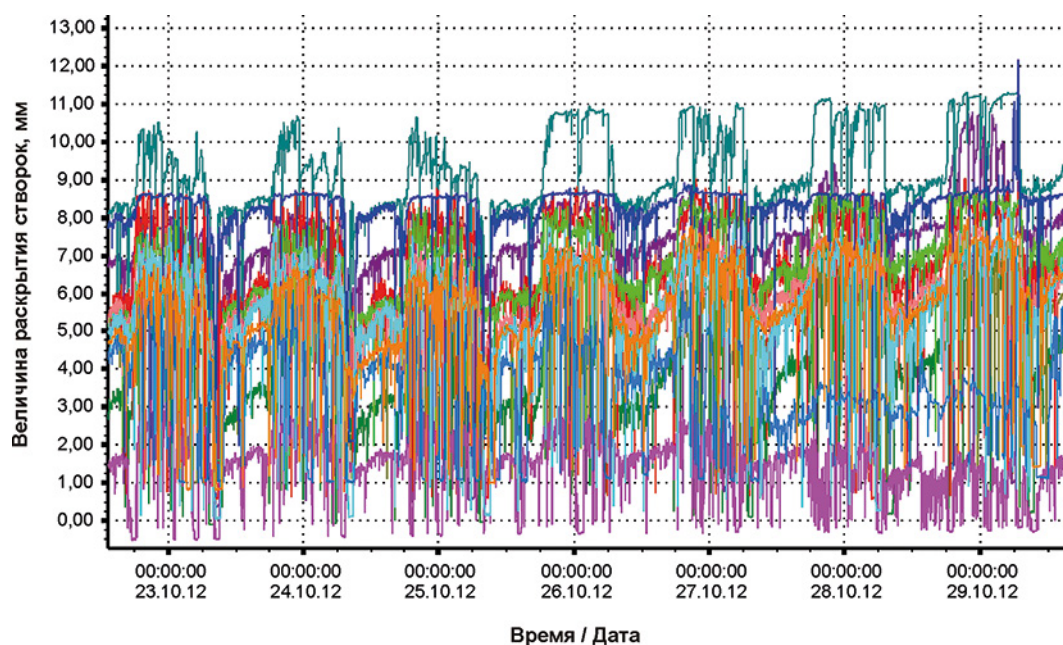


Рис. 1. Обрастание химических, оптических и акустических датчиков морской прибрежной станции





**Рис. 2.** Вид биосенсоров погружного модуля после 22-месячной успешной эксплуатации на речном пункте водозабора г. Севастополь



**Рис. 3.** Графики индивидуальной створочной активности группы моллюсков (мидии) с характерным суточным циклом

механическое воздействие, резкое изменение освещённости, температуры, давления или скорости обтекания);

- оперативная реакция на токсиканты выражена защитным схлопыванием створок (рис. 4);
- длительное одновременное пребывание моллюсков в закрытом состоянии говорит о крайней неблагоприятности среды;

— отсутствие створочной активности моллюска при открытой створке в течение нескольких часов говорит о его смерти (рис. 5).

Эти положения легли в основу программных алгоритмов автоматического обнаружения как внезапных, так и хронических факторов, регистрируемых как угрозу жизнедеятельности моллюсков в телеметрическом режиме.

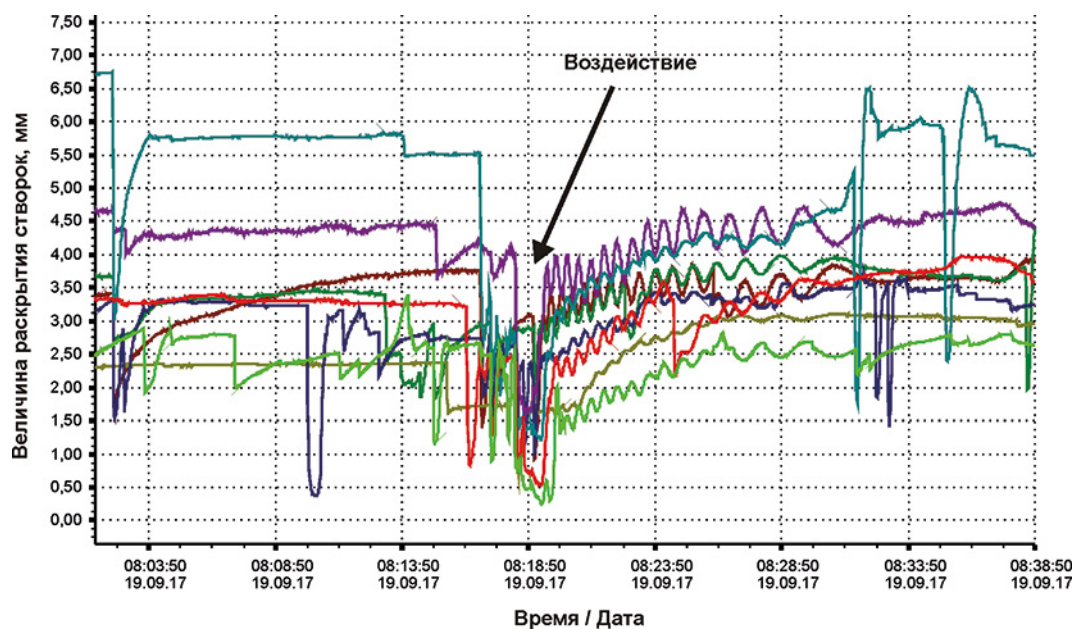


Рис. 4. Пример групповой реакции моллюсков на появление токсиканта

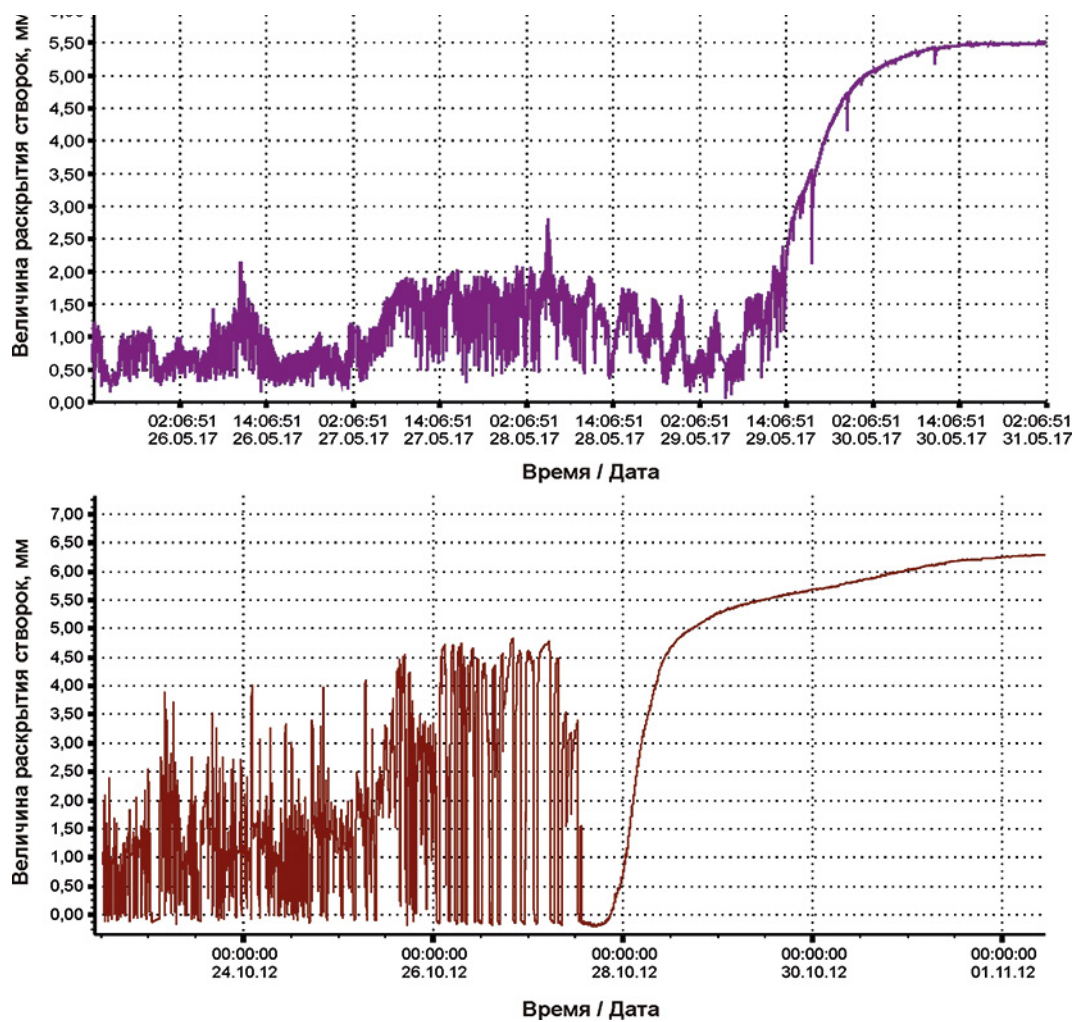
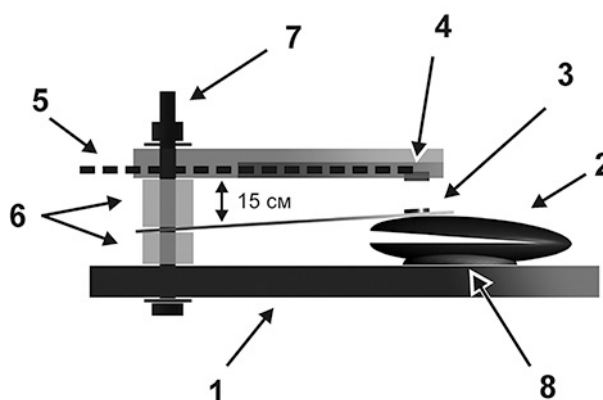


Рис. 5. Примеры графиков индивидуальной створочной активности моллюсков в случае летального исхода

Одновременно на приборе в качестве биосенсоров устанавливается стандартно до 16 моллюсков. Разработанное и используемое в лабораторных и погружных автономных приборах устройство контроля величины раскрытия створок моллюска (рис. 6) [Гайский, 2014] доказало свою эффективность и преимущество по сравнению с известными прототипами, использующими пружинные, шарнирные и осевые составные подвижные механизмы, которые подвержены обрастанию и коррозии; с нестабильными по точности креплениями датчиков непосредственно на створках моллюска; с оптоволоконными датчиками кардиоактивности, которые в основном применимы в лабораторных условиях [Холодкович, 2011]. При анализе состояния среды используются оценки групповой створочной активности [Гайский, 2011], в которой необходимо максимально уменьшить вклад «нестандартных» индивидуальных особенностей, а также своевременно исключить из расчётов умерших моллюсков.

Распределённые датчики температуры (термопрофилеры) [Гайский, 2018] конструктивно представляют из себя измерительный кабель-датчик длиной от нескольких см до десятков м с уложенными внутри защитной трубки проводниками. Вся механическая нагрузка ложится на внешнюю трубку. Датчик измеряет с погрешностью менее  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  непрерывный профиль температуры по всей траектории укладки. При вертикальной постановке в море обеспечивается контроль теплообмена воздух-вода, сгонно-нагонных явлений, течений, параметров внутренних волн, вертикальных и горизонтальных скоростей, теплозапаса и границ раздела сред [Гайский, 2018]. Обрастание и габариты защитной оболочки (трубки) влияют только на изменение инерционности измерений температуры, которая в среднем составляет для данного исполнения 10–60 секунд. Показания мгновенного непрерывного профиля температуры и динамику его изменения во времени с дискретизацией менее 1 секунды могут обеспечить потребителя наглядной оперативной информацией для анализа практически всех термодинамических процессов в водной среде. Многолетний опыт разработки и эксплуатации морских экспериментальных образцов термопрофилеров на объектах показал их исключительную надёжность при длительных установках более 1 года. Прошли испытания измерителей длиной 3, 24, 32 и 50 метров. Создан-



**Рис. 6.** Устройство измерения величины раскрытия створок моллюска (1 — каркасная подложка; 2 — моллюск; 3 — гибкая пластиковая планка с неодимовым магнитом; 4 — аналоговый датчик Холла; 5 — трёхжильный кабель питания и передачи аналогового сигнала; 6 — полиамидные вставки; 7 — нержавеющий крепёж; 8 — водостойкий клей-герметик)

ное программное обеспечение позволяет в режиме реального времени в виде изолиний наблюдать тепловые процессы в среде, производить расчёт термодинамических характеристик (рис. 7).

На основании вышеизложенного предлагается биоэлектронная автоматическая прибрежная станция, которая структурно может быть представлена комплексом оборудования: погружное измерительное средство с 8/16-ю моллюсками и сопутствующими измерительными каналами (температура, давление); вертикальный распределённый датчик температуры заданной длины и пространственным разрешением; электронный модуль регистрации, первичного анализа и ретрансляции данных (рис. 8). Первичные электронные преобразователи измерителей должны быть закреплены на погружном каркасном устройстве. Кабельная связь и питание (12 В) погружных модулей может поддерживаться на расстоянии до 1 км.

Программное обеспечение станции позволит в численно-графическом виде наблюдать за динамикой створочной активности и статистическими характеристиками (рис. 9), а также мгновенные профили и поле температуры в изолиниях.

Размещение станции может осуществляться на платформах, вехах и буях (рис. 10). К основному фактору, отрицательно влияющему на качество и анализ измерений, можно отнести непосредственное механическое воздействие на биодатчики. Поэтому его необходимо свести к минимуму.



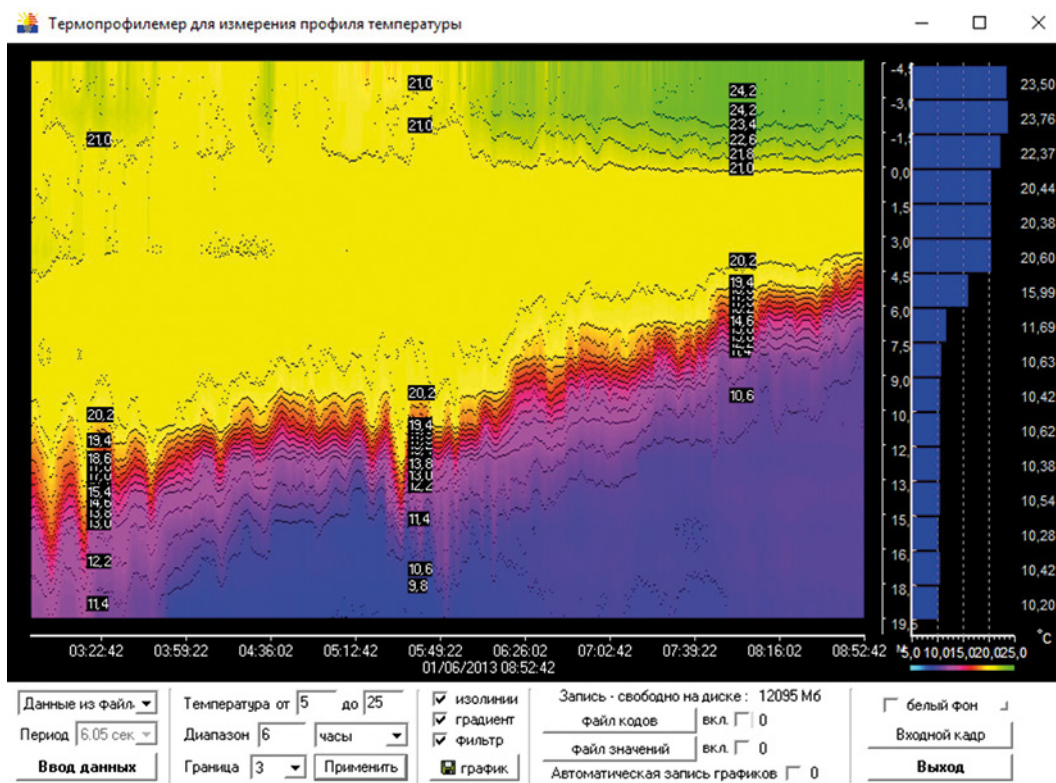


Рис. 7. Работа программного обеспечения регистрации и обработки данных термопрофилемеров

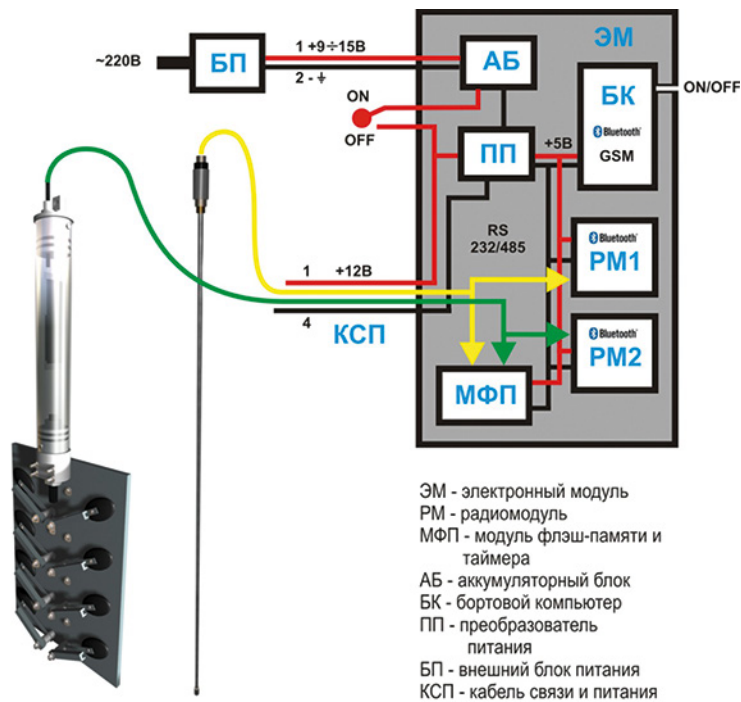


Рис. 8. Структура бортового электронного модуля системы



Рис. 9. Графики индивидуальной и показатели групповой створочной активности моллюсков

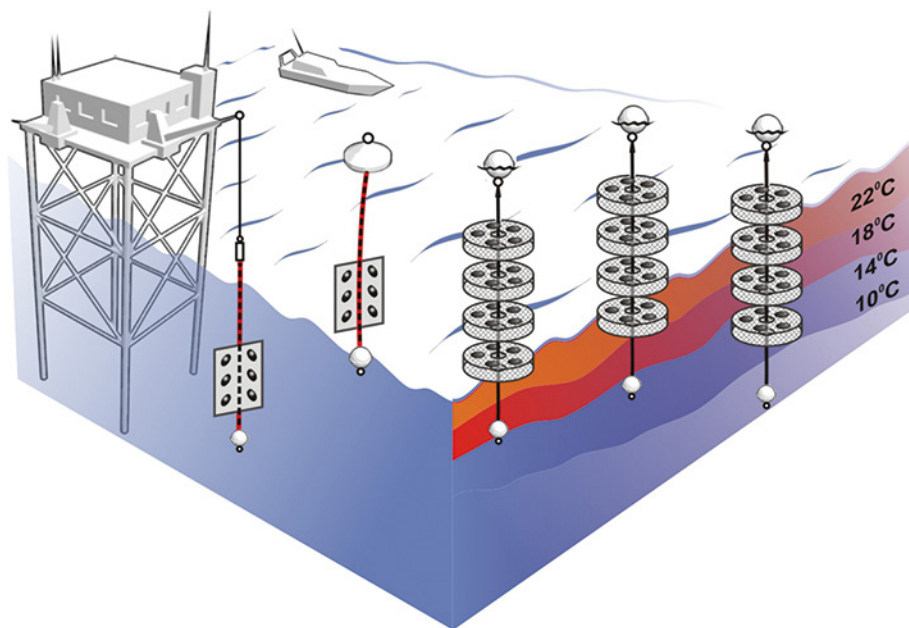


Рис. 10. Варианты постановки станции на объекте

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, автоматическая система на базе предлагаемой компоновки станции обеспечит контроль по состоянию моллюсков и их жизнедеятельности краткосрочных и хронических значимых химико-биологические факторы влияния

среды [Холодкевич, 2018], а также наблюдение основных термодинамических процессов в месте постановки. Для ферм аквакультуры это позволит создать или выбрать благоприятные условия для полноценного роста и размножения выращиваемых организмов, а с точки зрения научных ис-

следований — одновременно контролировать экологические факторы и изучать жизнедеятельность моллюсков.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Гайский П.В., Забурдаев В.И., Клименко А.В., Дмитриев О.Ф.* 2011. Методические, программно-алгоритмические и технологические аспекты обеспечения работоспособности гидролого-химического модуля морской прибрежной станции «Бриз-1» // Системы контроля окружающей среды. Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. Севастополь. Вып. 15. С. 69–76.
- Гайский П.В.* 2011. Алгоритмически-программное обеспечение приема и первичной обработки измерительных данных биоэлектронного комплекса «Биостраж» // Системы контроля окружающей среды. Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. Севастополь. Вып. 16. С. 79–83.
- Гайский П.В.* 2014. Устройство для измерения двигательной активности створок моллюсков. ПАТЕНТ UA № 106661. 25.09.2014. Бюл. № 18.
- Гайский П.В., Трусевич В.В., Забурдаев В.И.* 2014. Автоматический биоэлектронный комплекс, предназначенный для раннего обнаружения отравляющих загрязнений пресных и морских вод // Морской гидрофизический журнал. № 2. С. 44–53.
- Гайский В.А., Гайский П.В.* 2018. Использование распределённых датчиков для температурных измерений в море. Севастополь: ИПТС. 175 с.
- Гудимов А.В.* 2016. Способ выявления и отбора организмов-биосенсоров для оперативной биоиндикации и биомониторинга морских и пресных вод, включая питьевую и сточные воды. Патент РФ № 2595867С2. 27.08.2016.
- Холодкевич С.В., Кузнецова Т.В., Сладкова С.В., Удалова Г.П., Любимцев В.А.* 2010. Методические подходы к формированию референтных групп бентосных беспозвоночных на основе комплекса оценок их функционального состояния // Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов. Экологическая физиология и биохимия водных организмов. Сборник научных статей. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2010, т. 1. С. 297–303.
- Холодкевич С.В., Иванов А.В., Корниченко Е.Л., Куракин А.С., Любимцев В.А.* 2011. Биоэлектронный мониторинг поверхностных вод // Мир измерений. 2011. № 10. С. 6–13.
- Холодкевич С.В., Кузнецова Т.В., Куракин А.С., Солдатов А.А., Гостюхина О.Л., Головина И.В., Андреев Т.И., Кирилин М.П.* 2018. Новый методологический подход к оперативной оценке экологического состояния прибрежных морских акваторий. Известия ТИНРО. 2018. С. 215–238.
- Холодов В.И., Пиркова А.В., Ладыгина Л.В.* 2017. Выращивание мидий и устриц в Чёрном море. Практическое руководство. Воронеж: ООО ИЗДАТПРИНТ, 508 с.

Поступила в редакцию 28.06.2019 г.  
Принята после рецензии 13.11.2019 г.



## Bioelectronic automatic aquaculture monitoring station

V.A. Gaisky<sup>1</sup>,P.V. Gaisky<sup>2</sup><sup>1</sup> Institute of Natural and Technical Systems («INTS»), Sevastopol, Russia<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS («MHI RAS»), Sevastopol, Russia

Based on the experience of the development and maintenance of oceanographic measuring equipment the proposal to create a complex of automatic coastal station having high autonomy and reliability with long-term use in marine and freshwater areas for expeditious of environmental monitoring of coastal zones and on aquaculture farms is formulated. The bioelectronic complex on basis of native clams and the distributed temperature sensing device measuring vertical profile of temperature and dynamics of its variability is the proposed equipment of the station. The feature of such configuration of the system is high reliability on functioning of submersible clusters and metrological stability of measuring channels during long-term operation in natural conditions without maintenance for a period of more than a year that allows to avoid of constant maintenance costs. Thus, a long-term operating automatic control of significant hydrological parameters of the environment and the generalized indication of ecological conditions of water area can be provided on the basis of the analysis of reactions of clams as biosensors.

**Keyword:** aquaculture, clams, biomonitoring, thermoprofilemeter, mussel, oyster.

## REFERENCES

- Gaisky P.V., Zaburdaev V.I., Klimenko A.V., Dmitriev O.F. 2011. Metodicheskie, programmno-algoritmicheskie i tekhnologicheskie aspekty obespecheniya rabotosposobnosti gidrologo-khimicheskogo modulya morskoy pribrezhnoy stantsii «Briz-1» [Methodological, software-algorithmic and technological aspects of ensuring the operability of the hydro-chemical module of the sea coastal station "Briz-1"] // Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy. Sb. nauch. tr. MGI NANU. Sevastopol'. Vyp. 15. S. 69–76.
- Gaisky P.V. 2011. Algoritmicheski-programmnoe obespechenie priema i pervichnoj obrabotki izmeritel'nykh dannykh bioelektronnoy kompleksa «Biostrazh» [Algorithmically software for receiving and primary processing of measurement data of the bioelectronic complex "Biostrazh"] // Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy. Sb. nauch. tr., MGI NANU. Sevastopol'. Vyp. 16. S. 79–83.
- Gaisky P.V. 2014. Ustrojstvo dlya izmereniya dvigatel'noj aktivnosti stvorok mollyuskov [Construction device for measuring valves activity of the mollusc]. PATENT UA № 106661. 25.09.2014. Byul. № 18.
- Gaisky P.V., Trusevich V.V., Zaburdaev V.I. 2014. Avtomaticheskij bioelektronnyj kompleks, prednaznachennyj dlya rannego obnaruzheniya otravlyayushchikh zagryaznenij presnykh i morskikh vod [Automatic bioelectronic complex designed for early detection of toxic pollutants in the fresh and marine waters] // Morskoy gidrofizicheskij zhurnal. № 2. S. 44–53.
- Gaisky V.A., Gaisky P.V. 2018. Ispol'zovanie raspredelennykh datchikov dlya temperaturnykh izmerenij v more [Use of distributed sensors for temperature measurements in the sea]. Sevastopol': IPTS. 175 s.
- Gudimov A.V. 2016. Sposob vyyavleniya i otbora organizmov-biosensov dlya operativnoj bioindikacii i biomonitoringa morskikh i presnykh vod, vklyuchaya pit'evuyu i stochnye vody [Method for detecting and selecting biosensor organisms for operational bioindication and biomonitoring of marine and fresh water, including drinking and waste water]. Patent RF № 2595867C2. 27.08.2016.
- Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Sladkova S.V., Udalova G.P., Lyubimtsev V.A. 2010. Metodicheskie podhody k formirovaniyu referentnykh grupp bentosnykh bespozvonochnykh na osnove kompleksa ocenok ih funkcional'nogo sostoyaniya [Methodological approaches to the formation of reference groups of benthic invertebrates based on a set of assessments of their functional state] // Sovremennyye problemy fiziologii i biohimii vodnykh organizmov. Ekologicheskaya fiziologiya i biohimiya vodnykh organizmov. Sbornik nauchnykh statej. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN. 2010, t. 1, S. 297–303.
- Kholodkevich S.V., Ivanov A.V., Kornienko E.L., Kurakin A.S., Lyubimtsev V.A. 2011. Bioelektronnyj monitoring poverkhnostnykh vod [Bioelectronic monitoring of surface waters] // Mir izmerenij. № 10.
- Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Kurakin A.S., Soldatov A.A., Gostyukhina O.L., Golovina I.V., Andreenko T.I., Kirin M.P. 2018. Novyj metodologicheskij podhod k operativnoj ocenke ekologicheskogo sostoyaniya pribrezhnykh morskikh akvatorij [New methodological approach to the rapid assessment of the ecological state of coastal marine areas]. Izvestiya TINRO. 2018. S. 215–238.
- Kholodov V.I., Pirkova A.V., Ladygina L.V. 2017. Vyrashchivanie midij i ustrits v Chernom more. Prakticheskoe rukovodstvo [Growing mussels and oysters in the Black Sea]. Voronezh: OOO IZDATPRINT, 508 s.

### FIGURE CAPTIONS

- Fig. 1.** Fouling of chemical, optical and acoustic sensors of sea coastal station
- Fig. 2.** A view of biosensors of submersible module after 22-month successful experiments on a river point of Sevastopol water intake
- Fig. 3.** Diagrams of individual valve activity of group of mollusks (mussels) with a characteristic daily cycle
- Fig. 4.** Example of group reaction of mollusks to the appearance of toxicants
- Fig. 5.** Examples of diagrams of individual valve activity of mollusks in case of death
- Fig. 6.** Device for measuring the amount of opening of mollusk valves: 1 – frame substrate; 2 – mollusk; 3 – flexible plastic strip with neodymium magnet; 4 – analog Hall sensor; 5 – three-core power supply and analog signal transmission cable; 6 – polyamide inserts; 7 – stainless steel fasteners; 8 – water-resistant adhesive-sealant
- Fig. 7.** Interface of the software for collecting and processing of thermoprofilemeters data
- Fig. 8.** Structure of on-board electronic unit of the system
- Fig. 9.** Diagrams of individual and the indicators of group valve activity of mollusks
- Fig. 10.** Options of statement of the station on an object