

# *Автоматизация научных исследований морей и океанов*

УДК 551.46.08

В.В. Трусевич, П.В. Гайский, К.А. Кузьмин

## **Автоматический биомониторинг водной среды с использованием реакции двустворчатых моллюсков**

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований в области разработки и опытной эксплуатации автоматизированного комплекса биомониторинга водной среды, предназначенного для контроля содержания отравляющих веществ с использованием реакции двустворчатых моллюсков.

В связи с возрастающей угрозой возникновения техногенных катастроф в морской среде, а также в пресноводных водоемах и источниках, которые могут пагубно влиять на состояние окружающей среды и здоровье людей, все большее значение приобретают автоматизированные системы контроля загрязнений. Возможность осуществления террористических актов на системах водообеспечения населенных пунктов требует поиска новых методов оперативного обнаружения в воде отравляющих веществ.

Все чаще для такого контроля в мировой практике совместно с техническими средствами используются в качестве сенсоров биологические организмы, позволяющие получить интегральную токсикологическую характеристику среды обитания независимо от природы и состава загрязняющих веществ. Это связано с тем, что любые гидрохимические датчики реагируют на содержание тех или иных веществ очень избирательно. Увеличение числа измерительных каналов ведет к росту стоимости приборов и увеличению трудозатрат по обслуживанию. Использование знаний о поведенческой реакции на различные химические и отравляющие вещества тех или иных биологических существ в заданной среде обитания позволяет создать более универсальную систему наблюдения. Однако и в этом случае необходима автоматизация этих наблюдений. Реализация такого вида контроля получила название биомаркерного подхода.

Подобного рода комплексы уже разработаны и активно внедряются в системах контроля на узлах водоканалов крупных населенных пунктов и водозаборов, в местах антропогенной нагрузки и возможных техногенных аварий. В настоящее время значительное внимание уделяется развитию биомаркерного подхода к оценке состояния морских экосистем в районах добычи нефти и газа на морском шельфе. Особое место в данном направлении занимают исследования по выявлению и изучению физиологических биомаркеров, на основе которых принципиально возможно развивать автоматизированные системы контроля состояния и здоровья экосистем в реальном времени [1 – 3].

© В.В. Трусевич, П.В. Гайский, К.А. Кузьмин, 2010

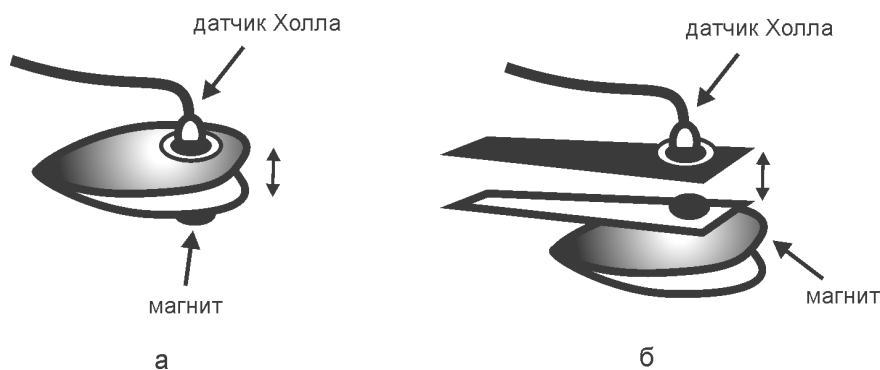
*ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2010, № 3*

75

Известно, что ежегодно в связи с деятельностью современных производств синтезируются и попадают в окружающую среду тысячи тонн новых химических соединений с невыясненными токсикологическими характеристиками. Большие объемы грузоперевозок водным транспортом, интенсивное развитие добычи полезных ископаемых на шельфе, прокладка трубопроводов по транспортировке нефти и газа увеличивают вероятность аварий и выбросов загрязняющих веществ, часто носящих характер чрезвычайных ситуаций и катастроф. Учитывая непредсказуемость и неожиданность возникновения чрезвычайных ситуаций, а также при этом высокую скорость развития негативных процессов, современные системы мониторинга должны функционировать в непрерывном и автоматическом режиме, в режиме реального времени обнаруживать загрязнения, определять степень опасности, формировать сигналы тревоги и передавать их в центры слежения. Реализация биосенсорной системы может быть осуществлена при выполнении следующих обязательных условий: наличие организмов данной среды обитания, поведение которых имеет предсказуемый и систематический характер; наличие комплексных экспериментальных статистических данных наблюдений за такими поведенческими реакциями, которые позволят создать достоверные алгоритмически-программные методы автоматической обработки и сигнализации; возможность создания технических средств, способных с заданной точностью регистрировать эти реакции.

Наиболее перспективными для мониторинга водной среды, позволяющими осуществлять непрерывный автоматизированный биологический контроль с возможностью автоматического формирования сигнала тревоги, по нашему мнению, являются методы биомониторинга с использованием поведенческих реакций аборигенных видов гидробионтов, и в первую очередь двустворчатых моллюсков. В ряде стран Европы с 90-х годов прошлого века успешно и широко используются системы раннего оповещения *Musselmonitor* и *Dreissenamonitor* о появлении в водной среде угрожающих концентраций загрязняющих веществ. Их действие основано на способности двустворчатых моллюсков закрывать створки на продолжительное время при воздействии неблагоприятных факторов. Живые организмы являются необходимой составной частью обязательного комплексного мониторинга, выполняя функцию систем раннего оповещения о неблагоприятных изменениях водной среды [1]. На водозаборах питьевой воды Санкт-Петербурга с 2005 г. в качестве сенсорной системы используется кардиоактивность речных раков [2].

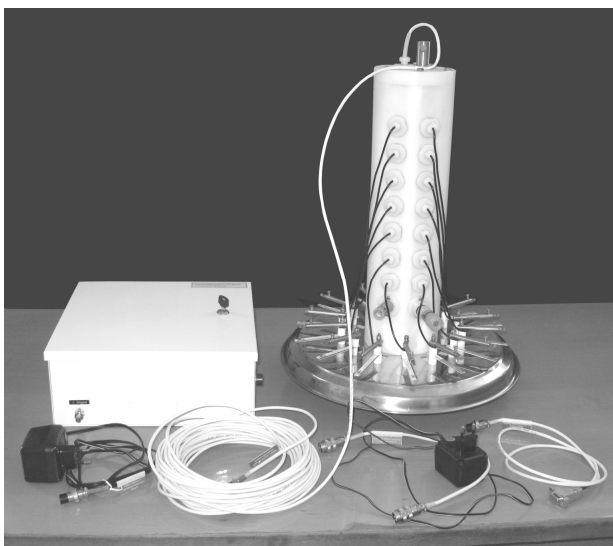
В данной работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований по созданию комплекса автоматического биомониторинга водной среды с использованием в качестве биосенсорной системы двустворчатых морских и пресноводных моллюсков. Основной информационной составляющей наблюдений в данном случае является меняющаяся во времени величина раскрытия створок (рис. 1, а, б). Дополнительно требуется контроль естественных параметров среды, способных воздействовать на состояние моллюсков, который осуществляется с помощью разработанных технических средств и заданных измерительных каналов.



**Р и с. 1.** Схемы креплений датчиков на створках моллюсков: *а* – непосредственно на створках, *б* – на направляющих

В 2003 г. в Карадагском природном заповеднике совместно с Институтом биологии южных морей и Морским гидрофизическим институтом НАН Украины был разработан и испытан в течение 4 лет первый автоматизированный экспериментальный образец комплекса мониторинга водной среды, основанный на поведенческих реакциях черноморских двустворчатых моллюсков – мидий, являющийся аналогом системы *Musselmonitor* [3 – 5]. Работа прибора заключается в получении в автоматическом режиме цифровой информации о движении створок моллюсков с помощью закрепленных на них датчиков Холла и магнита, регистрирующих изменения расстояния между створками. Одновременно регистрируются индивидуальные реакции 16 животных. Синхронная реакция группы моллюсков (не менее 70% от общего числа) является сигналом тревоги. Специализированное программное обеспечение позволяет в режиме реального времени наблюдать за динамикой движений створок моллюсков в виде графиков в миллиметрах или процентах от величины максимального раскрытия и обнаруживать синхронные реакции моллюсков на воздействия окружающей среды. Латентный период реагирования системы на загрязнение, в зависимости от его природы и концентрации, от нескольких секунд до нескольких минут. Продолжительность автономной работы прибора составляет 23 сут. Такая система работает в автоматическом режиме 24 ч в сутки на протяжении нескольких лет. Проведенные в течение 4 лет исследования показали высокую чувствительность разработанного комплекса к воздействию ряда ксенобиотиков (медного купороса, гидрохинона, аммиака, некоторых видов синтетических поверхностно-активных веществ), а также физических факторов (освещенности, солености, температуры, вибрации).

На основе опыта проведенных испытаний на новой элементной базе и с добавлением новых измерительных каналов в 2008 г. был создан усовершенствованный экспериментальный комплекс автоматического биомониторинга водной среды [6]. В состав аппаратной части этого комплекса входят бортовой (БМ) и погружной (ПМ) модули, кабели связи и питания с преобразователями напряжения и зарядным устройством (рис. 2).



Р и с. 2. Общий вид модулей комплекса

Вторичная обработка измерительной информации осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения ПК. Работа прибора может осуществляться в автономном режиме ПМ ↔ БМ с записью первичной измерительной информации в память и питанием от аккумуляторов БМ или в телеметрическом режиме ПМ ↔ ПК. Основные технические характеристики комплекса приведены в таблице.

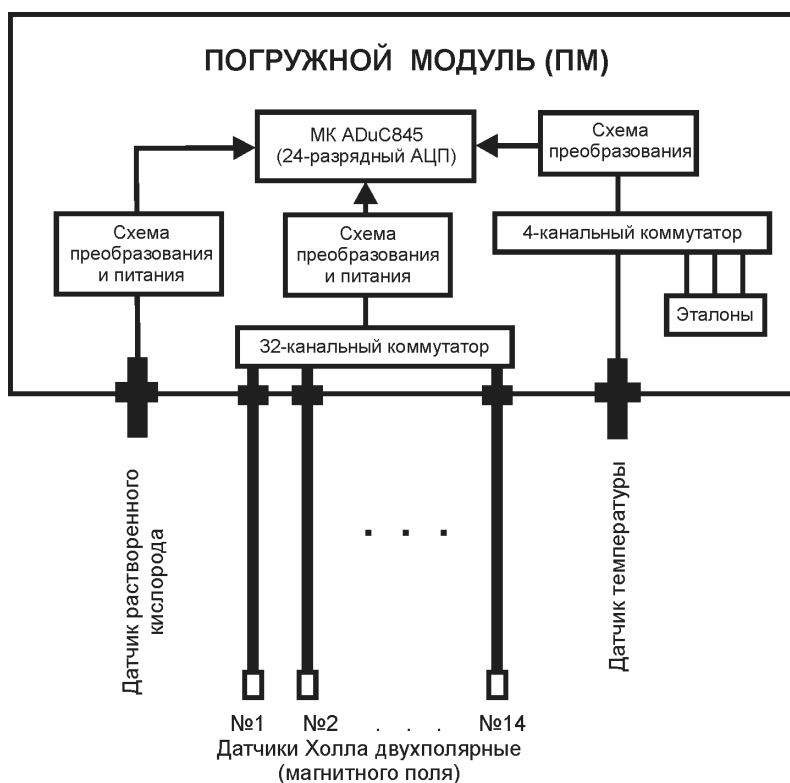
### Основные технические характеристики прибора

Наименование	Единица измерения	Диапазон, значение	Погрешность	Периодичность поверки, сут
Измерительные каналы температуры:				
- датчик ПМ	°С	-5...+40	±0,05	не менее 100
- цифровой датчик БМ (без индивидуальной градуировки)	°С	-25...+50	±0,5	–
Измерительные каналы расстояния между створками мидий	мм	1...15	±0,1	не менее 100
Измерительный канал растворенного кислорода	мл/л	0,1...10	3%	30 – 100
Период опроса измерительных каналов	с	2; 10; 60	–	–
Емкость модуля энергонезависимой памяти БМ в автономном варианте	Мбайт	8	–	–
Возможная глубина погружения	м	до 30	–	–
Напряжение питания модулей ПМ и БМ	В	7 – 15	–	–
Средняя длительность автономной работы прибора от аккумуляторов БМ	сут	21	–	–

В погружном модуле для определения расстояния между створками мидий совместно с магнитами используются 14 датчиков магнитного поля (датчики Холла), датчик температуры и датчик растворенного в воде кислорода. Схема измерительных каналов ПМ включает в себя прецизионные усилители и стабилизаторы напряжения, а также 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь с коммутацией на все датчики и внутрисхемные эталоны.

В бортовом модуле комплекса размещены две однотипные электронные платы, включающие таймер реального времени и даты, энергонезависимую флэш-память и цифровой датчик температуры под управлением микроконтроллера. Питание этих плат осуществляется от внутренних аккумуляторов БМ или внешнего источника постоянного напряжения 12 В. Необходимость наличия двух электронных плат вызвана требованиями к непрерывной записи измерительной информации во время сброса содержимого флэш-памяти на ПК. Электроника ПМ питается также от напряжения 12 В/0,5 А через кабель связи: в телеметрическом режиме – от блока питания, а автономном режиме – от аккумуляторов БМ. Зарядка аккумуляторов БМ осуществляется с помощью зарядного устройства мощностью 12 Вт от стандартной сети ~220 В.

Опрос измерительных каналов ПМ осуществляется с заданным периодом по команде от программного обеспечения ПК или микроконтроллера БМ. Структурная схема ПМ представлена на рис. 3.



Р и с. 3. Структурная схема погружного модуля

Стандартная частота приема – передачи команд и измерительной информации через последовательный порт между модулями прибора и ПК равна 9600 бод. Частота настройки последовательного порта при чтении и форматировании флэш-памяти БМ составляет 115200 бод.

В качестве чувствительного элемента датчика температуры ПМ используется платиновый датчик фирмы *Honeywell HEL705* (1кОм). Для дополнительного контроля температуры внешней среды при автономной работе в БМ используются цифровые датчики температуры *DS1624* фирмы *Dallas Semiconductor* (паспортное разрешение 0,03125°C в диапазоне –55°C ... +125°C). Градуировка и поверка датчиков температуры осуществляются для заданного диапазона и требуемой точности в соответствии с действующей методикой по поверке точечных контактных термометров сопротивления по полиному.

При измерении содержания в воде растворенного кислорода используется амперометрический датчик на серебряных электродах.

В качестве датчиков, определяющих расстояние между створками мидий, используются двухполярные датчики Холла *SS496A1* фирмы *Honeywell*. Они реагируют на изменения внешнего магнитного поля, создаваемого магнитом, закрепленным на гибкой направляющей над раскрывающейся створкой мидии.

Градуировка датчиков Холла может осуществляться непосредственно с использованием рабочего каркаса, креплений ПМ, прецизионного штангенциркуля (разрешение 0,02 мм) в диапазоне от 0 до 15 мм. Градуировочная характеристика для каждого из 14 датчиков может быть описана гиперболической зависимостью с полиномом третьей степени:

$$\text{Расстояние между створками (мм)} = a_4 - \frac{1}{a_0 + N_x [a_1 + N_x (a_2 + N_x a_3)]}, \quad (1)$$

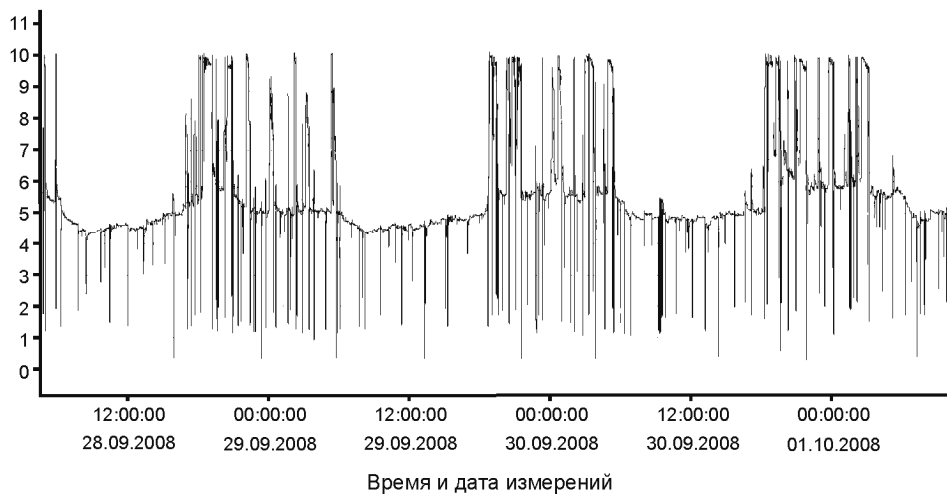
где  $N_x$  – код соответствующего датчика Холла;  $a_4$  – первоначальное (максимальное) расстояние (мм) между датчиком и магнитом после непосредственной установки каждой мидии;  $a_1 - a_3$  – градуировочные коэффициенты, полученные из полинома зависимости

$$\frac{1}{\text{Данное выражение}} = f(N_x). \quad (2)$$

Созданная аппаратура комплекса автоматического биомониторинга позволяет регистрировать с привязкой ко времени и обрабатывать в автономном и телеметрическом режимах измерительную информацию ПМ о величине раскрытия створок двустворчатых моллюсков, контролировать температуру и содержание растворенного кислорода в водной среде на глубинах до 20 м.

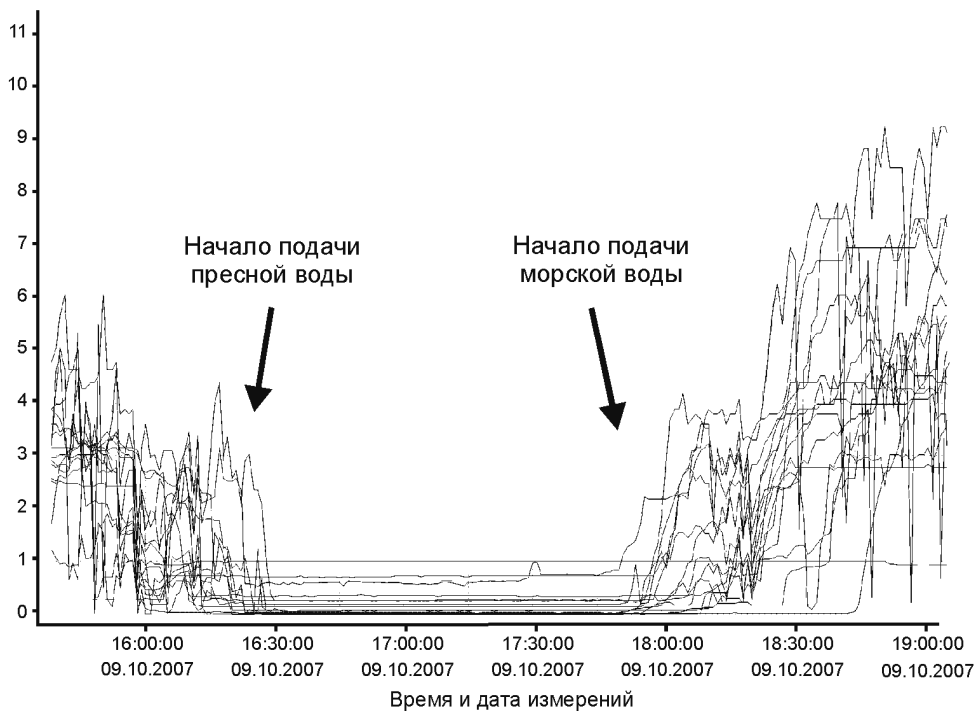
Из результатов лабораторных и натурных испытаний, а также экспериментальных исследований видно, что синхронная реакция моллюсков может быть вызвана как естественными факторами изменения параметров окружающей среды (рис. 4 и 5), так и наличием примесей различного рода химических или отравляющих веществ (рис. 6 и 7), которые могут служить поводом для сигнализации об аварийной ситуации.

Расстояние между створками, мм

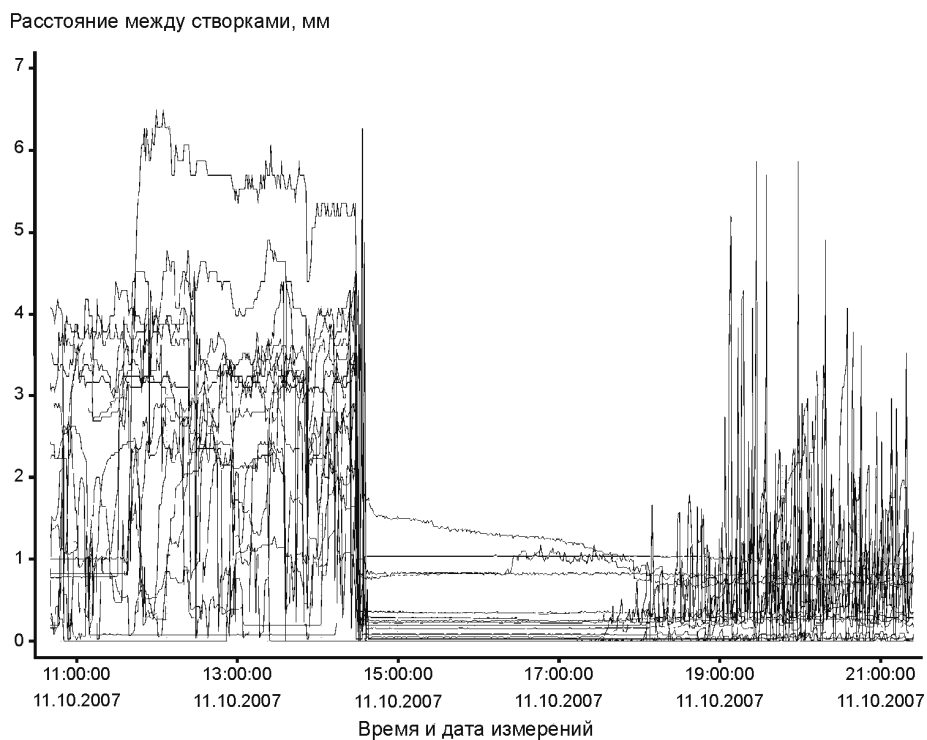


Р и с. 4. Суточные циклы активности черноморской мидии

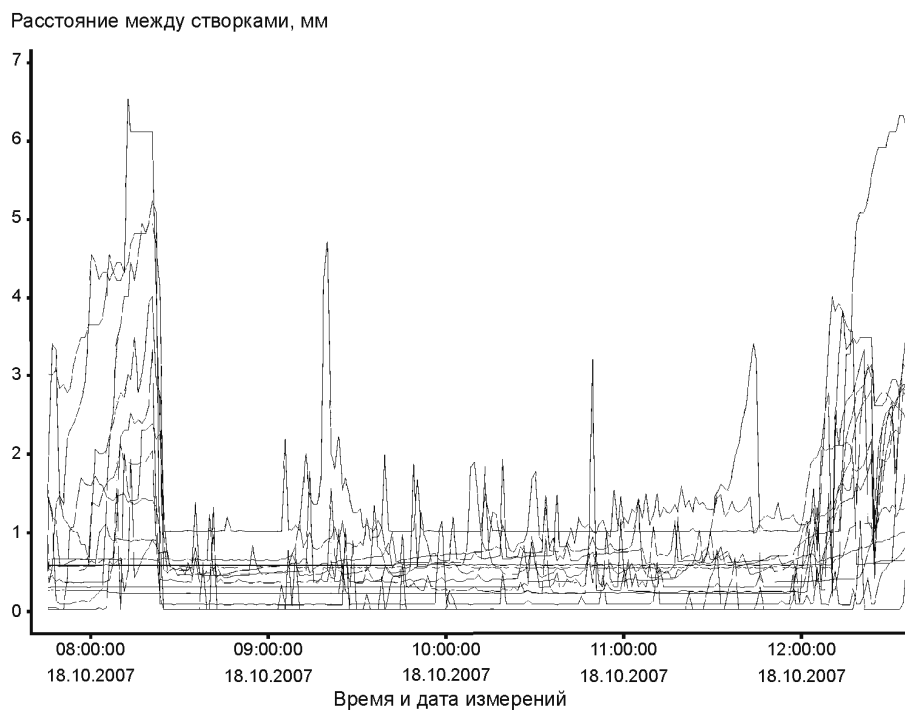
Расстояние между створками, мм



Р и с. 5. Реакция мидий на воздействие пресной воды



**Р и с. 6.** Реакция мидий на воздействие гидрохинона (концентрация 20 ПДК)



**Р и с. 7.** Реакция мидий на раствор аммиака (концентрация 5 ПДК)



Разработанные технические средства регистрации измерительных данных и алгоритмы их обработки позволяют в оперативном режиме проводить комплексную оценку целого ряда параметров. Поскольку на поведение моллюсков оказывают влияние естественные изменения в среде, то для обнаружения аномалий эти факторы должны контролироваться и при необходимости исключаться из рассмотрения. В связи с этим в состав измерительных каналов прибора могут быть включены каналы скорости потока, электрической проводимости и освещенности, а в программном обеспечении реализованы адаптированные для решения поставленных задач алгоритмы спектрального анализа и фильтрации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Allen H.J., Waller T.W., Kennedy J. et al.* Real-time whole organisms biomonitoring – deployment, status, and future // AWRA. Annual spring speciality conference proceedings. – Middleburg, 2001. – P.187 – 192.
2. *Холодkevич С.В.* Биозлектронный мониторинг уровня токсичности природных и сточных вод в реальном времени // Экологическая химия. – 2007. – 16, №4. – С. 223 – 232.
3. *Трусевич В.В., Столбов А.Я.* Поведенческие реакции черноморских мидий в исследовании механизмов адаптации к условиям среды обитания // 4-й Гидробиологический съезд Украины. Наукові записки. Тернопільський нац. ун-т. Сер.біол. – 2005. – 4, №27. – С. 251 – 254.
4. *Трусевич В.В., Гнубкин В.Ф., Никольский В.Н. и др.* Автоматизированные системы в организации мониторинга водной среды // 2-я Междунар. конф. «Мониторинг окружающей среды: научно-методическое нормативное, техническое, программное обеспечение» (Крым, 24 – 28 сентября). – Коктебель, 2007. – С.93 – 95.
5. *Трусевич В.В., Мишуrow В.Ж., Кузьмин К.А.* Современные биотехнологии в организации мониторинга водной среды // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – С. 395 – 399.
6. *Гайский П.В., Клименко В.А.* Аппаратура измерительного комплекса автоматического биомониторинга водной среды (КАБМВС) // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – С. 67 – 71.

Карадагский природный заповедник НАН Украины  
E-mail: trusev@mail.ru  
Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: gausky@inbox.ru

Материал поступил  
в редакцию 23.01.09  
После доработки 05.03.09

АНОТАЦІЯ У статті наводяться результати експериментальних досліджень в області розробки і дослідної експлуатації автоматизованого комплексу біомоніторингу водного середовища, призначеного для контролю вмісту отруйних речовин з використанням реакції двостулкових моллюсків.

ABSTRACT Described are the results of experimental study including development and operational test of the automated complex of bio-monitoring of water environment intended to control the content of poison substances using bivalves.