

Автоматизация научных исследований морей и океанов

УДК 681.3.06

П.В. Гайский*, В.В. Трусевич**, В.И. Забурдаев*

Автоматический биоэлектронный комплекс, предназначенный для раннего обнаружения отравляющих загрязнений пресных и морских вод

Описан опытный образец комплекса автоматического биомониторинга водных сред, предназначенного для раннего обнаружения отравляющих загрязнений пресных и морских вод, жизненно опасных для живых организмов, от источников природного, техногенного и антропогенного происхождения.

Ключевые слова: биомониторинг, «Биостраж», биоэлектронный комплекс, отравляющие загрязнения, экологический контроль, биомаркеры, биоиндикаторы, загрязнение окружающей среды.

В современных условиях резко возрастающей интенсивности загрязнения водной среды настоятельной необходимостью становится разработка научно обоснованных методов и средств эффективного контроля состояния и защиты водных экосистем. Ежегодно синтезируются и сбрасываются в водную среду миллионы тонн загрязняющих веществ, в том числе с невыясненными токсикологическими характеристиками. По данным международных организаций охраны водной среды, в Европе из примерно 100 000 ежегодно синтезируемых в коммерческих целях продуктов, попадающих в водную среду, аналитически определяются только около 1% [1]. Наряду с этим особую опасность представляет возрастание количества техногенных аварий с быстрым распространением масштабных негативных воздействий на крупные регионы, которые могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций.

Вследствие этого, несмотря на довольно жесткое природоохранное законодательство, принятое в большинстве стран, возрастает интенсивность и неуклонно расширяются границы негативного антропогенного влияния на водные системы.

Многочисленные индексы ПДК, используемые в современной природоохранной практике, ориентированы в первую очередь на определенных водопользователей. Они не отражают степени опасности концентраций загрязнителей при хронических воздействиях для биоты и гидросистем в целом и применяются без учета их индивидуальных особенностей [2, 3].

В данной работе описывается техническая разработка, позволяющая осуществить оперативный комплексный контроль отравляющих загрязнений водной среды с помощью биологических организмов.

© П.В. Гайский, В.В. Трусевич, В.И. Забурдаев, 2014

В Украине, как и в большинстве стран СНГ, отсутствуют единые государственные сети непрерывного контроля водной среды. Контроль осуществляется на отдельных объектах, с достаточно редкой частотой измерений, различными ведомствами (МЧС, СЭС, водхозы, отраслевые лаборатории предприятий, рыбнадзор, рыбхозы и др.), при этом используется широкая сеть химических лабораторий. Следует отметить, что существующие системы контроля, основанные преимущественно на физико-химических методах, являются трудоемкими и дорогостоящими, дают фрагментарные сведения, охватывают традиционно узкий круг загрязняющих агентов, не обеспечивают непрерывного мониторинга и своевременного обнаружения внезапного выброса загрязнений. Несмотря на то что к настоящему времени разработано достаточно много автоматизированных методов мониторинга, большая часть загрязняющих веществ не определяется из-за отсутствия соответствующих методик и приборов. В результате водные системы оказываются незащищенными ни от постепенного накопления, ни от внезапных залповых выбросов загрязняющих веществ, что создает постоянную угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций.

Все это свидетельствует о несовершенстве существующих систем водопользования и требует пересмотра принципов организации мониторинга с учетом особенностей влияния современной цивилизации на водную среду.

Таким образом, учитывая интенсивное увеличение объемов сброса неочищенных сточных вод городов и промышленных предприятий, непредсказуемость возникновения и возрастание количества техногенных аварий, характеризующихся быстрым распространением масштабных негативных воздействий на крупные регионы, а также необходимость предотвращения возможных террористических актов, вопросом первостепенной важности следует назвать разработку методов и средств именно оперативного обнаружения загрязнений и оценок степени их опасности для водных систем и человека в том числе.

Современные системы мониторинга должны функционировать в непрерывном автоматическом режиме, в режиме реального времени обнаруживать и определять степень экологической опасности загрязнений, формировать сигналы тревоги и передавать их в соответствующие центры слежения. Это особенно важно для систем водоснабжения городов и крупных населенных пунктов, в зонах выпускных коллекторов городов и промышленных предприятий. Пункты автоматизированного контроля должны быть объединены в единые сети, охватывающие большие территории с единым центром слежения.

В решении проблемы эффективного обнаружения опасных для биоты и человека загрязнений все большую роль играют методы биоиндикации и биотестирования, которые характеризуются высокой чувствительностью к загрязнениям и, в отличие от физико-химических методов, позволяют получать интегральную токсикологическую характеристику среды независимо от природы и состава загрязняющих веществ. К настоящему времени разработано множество оперативных высокочувствительных методов биотестирования с использованием биомаркеров различных видов живых организмов, начиная от бактерий и микроводорослей и заканчивая высшими животными. В приро-

доохранной практике наиболее развитых стран мира использование методов биоиндикации и биотестирования является обязательным. В Украине также приняты соответствующие постановления, которые предусматривают использование некоторых видов биоиндикации морских вод. Однако большинство методов биотестирования требуют наличия высокоспециализированных лабораторий, являются дорогостоящими и трудоемкими, не позволяют вести непрерывный мониторинг и плохо поддаются автоматизации. В частности, многие методы биоиндикации не только не поддаются автоматизации, но и вообще не могут использоваться при решении задач экспресс-оценки состояния поверхностных вод, так как они ограничены необходимостью проведения длительных процедур анализа или имеют слишком высокие уровни погрешностей в областях требуемых порогов чувствительности [4].

Вместе с тем, как показывает практика, только биомониторинг в реальном времени на основе автоматических станций непрерывного действия – самый надежный способ оценки динамики состояния водных систем, позволяющий своевременно обнаружить аварийные ситуации, опасные для биоты и человека, и обеспечить возможность принятия мер по предупреждению развития негативных последствий.

Во многих лабораториях мира интенсивно разрабатываются экспресс-методы биоиндикации и биотестирования и на их основе – биоэлектронные системы мониторинга поверхностных вод для оценки в реальном масштабе времени качества воды как среды обитания гидробионтов [5 – 8].

Наиболее перспективными для мониторинга водной среды являются методы биомониторинга с использованием поведенческих реакций аборигенных видов гидробионтов и в первую очередь – двустворчатых моллюсков. Такие методы позволяют осуществлять непрерывный автоматизированный биологический контроль с возможностью формирования сигнала тревоги. Высокая чувствительность к изменению параметров среды и особенности поведения моллюсков (схлопывание створок на продолжительное время или изменение ритмики движений в условиях стресса) легли в основу разработки метода регистрации изменений движения створок при воздействии различных факторов среды, позволяющего использовать его в качестве индикатора в мониторинговых наблюдениях.

В Карадагском природном заповеднике НАН Украины с 2003 г. проводятся исследования адаптивных поведенческих реакций представителя массового вида двустворчатых моллюсков – черноморской мидии в условиях колебания параметров абиогенных и биогенных факторов окружающей среды. Для проведения подобных исследований в лабораторных условиях Карадагским заповедником совместно с Морским гидрофизическим институтом НАН Украины в 2007 г. был разработан и изготовлен экспериментальный образец комплекса автоматической регистрации движений створок моллюсков [9]. Последующие модернизации этого прибора позволили разработать комплекс автоматизированного мониторинга, пригодный для проведения исследований поведенческих реакций моллюсков в натуральных условиях водоемов. Использование этого приборного комплекса дало возможность впервые провести долговременные регистрации движений створок черноморских мидий в натуральных условиях моря в различные сезоны года.

Поведение животного, изменение уровня его активности – интегрированная реакция на изменения параметров окружающей среды. В естественной среде обитания все процессы жизнедеятельности живых организмов и уровень их активности в той или иной степени носят периодический характер, обусловленный суточными ритмами и сезонными колебаниями факторов среды [10]. Для прикрепленных моллюсков единственно возможным проявлением поведенческой реакции является движение створок. Величина раскрытия створок и особенности ритмики их движений характеризуют фильтрационную активность двустворчатых моллюсков, а следовательно, и уровень их жизнедеятельности в нормальной и токсичной средах. Изменение ритмики поведенческих реакций свидетельствует о снижении адаптивных возможностей и является важным показателем влияния окружающей среды на физиологическое состояние организма. Таким образом, поведенческие реакции мидий – чувствительный и надежный показатель общего уровня жизнедеятельности организма при проведении биотестирования. Результаты исследований особенностей движения створок черноморских мидий в естественных условиях обитания, полученные в предыдущие годы с использованием экспериментального образца комплекса автоматической регистрации движений створок моллюсков, легли в основу настоящей работы.

Основные направления экспериментов следующие:

- исследование структуры двигательных актов и суточной динамики движения створок мидий в естественных условиях обитания моллюсков в районах, наименее подверженных антропогенному воздействию (условно чистая вода), на протяжении годового цикла;
- исследование динамики движения створок мидий при изменении физических параметров водной среды (температура, соленость);
- исследование динамики движения створок мидий под влиянием химических агентов.

Долговременные непрерывные регистрации движений створок черноморских мидий в естественных условиях обитания позволили охарактеризовать структуру двигательных актов моллюсков в норме. Было установлено наличие строгой суточной ритмики в движении створок моллюсков в естественных условиях обитания с максимумом активности в ночное время и минимумом – в дневное. Переход от ночного периода к дневному и обратно точно совпадает с моментами восхода и захода солнца.

Характеристики суточных двигательных актов определяются сочетанным влиянием колебаний параметров водной среды в зоне обитания моллюсков. Установлено, что механизм негативного антропогенного воздействия на водную среду проявляется у моллюсков в первую очередь на поведенческом уровне. Показано, что при загрязнении водной среды происходит уменьшение активной фазы суточного цикла жизнедеятельности моллюсков и резкое снижение их фильтрующей способности. Хроническое воздействие загрязняющих веществ вызывает резкое возрастание продолжительности периодов пребывания моллюсков в состоянии с закрытыми створками, уменьшение амплитуды раскрытия, изменение характера и частоты схлопываний. Эти показатели являются основными для оценки состояния водной среды в условиях хронического загрязнения бытовыми стоками.

В лабораторных экспериментах установлено, что ответной реакцией моллюсков на острые химические воздействия является быстрое закрывание створок (в течение двух-трех секунд) на время присутствия загрязняющего агента в водной среде [11]. Время возвращения моллюсков к нормальному ритму определяется природой, концентрацией и продолжительностью воздействия загрязняющего агента, т. е. степенью поражения тканей моллюска, и составляет от нескольких минут до нескольких суток. Была показана важность стабильного проявления циркадного ритма в движении створок как существенного показателя нормального физиологического состояния (здоровья) организмов-биоиндикаторов. Этот показатель может активно использоваться при настройке системы предупреждения об изменении состояния среды в биомониторинговых исследованиях и в экотоксикологических экспериментах. Также были разработаны методы отбора референтных групп тест-организмов для использования в системах биомониторинга, основанные на применении стандартизированных тест-стимулов, которые вызывают у организмов физиологические реакции, в той или иной степени отражающие их адаптивные способности.

Вследствие того что на реакции мидий и их циркадную активность влияют параметры окружающей среды, было установлено, что для большей достоверности выводов и снижения вероятности ложной тревоги измерительным комплексом по возможности параллельно должен осуществляться контроль сопутствующих параметров: температуры, давления, освещенности, скорости обтекания, солености, pH, содержания кислорода и др.



Р и с. 1. Общий вид комплекса «Биоохрана» при использовании в автономном режиме

В результате на базе анализа предыдущих экспериментальных разработок и заданных технических требований был создан опытный образец автоматического биоэлектронного комплекса «Биоохрана» (рис. 1), который прошел государственную метрологическую аттестацию. Метрологические и технические характеристики комплекса представлены в табл. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1

Метрологические характеристики комплекса «Биоохрана»

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Случайная погрешность	Погрешность
Гидростатическое давление, кПа	0 – 200	0,1	±3%
Температура воды, °С	-2 – +35	0,005	±0,05
Освещенность, люкс	0 – 10 000	3%	10%
Изменение расстояния между створками мидий, мм	1 – 12	0,015	±0,1

Т а б л и ц а 2

Технические характеристики комплекса «Биоохрана»

Параметр	Значение
Количество биодатчиков	Стандартно 16 шт.
Глубина постановки	Стандартно до 20 м
Длина кабеля связи и питания	Стандартно 100 м
Период опроса	Стандартно 1 с
Внешнее питание	~100 – 220В / 50 – 60 Гц или 19 В
Энергопотребление модуля погружного	Стандартно 19 В, не более 3 Вт
Энергопотребление модуля берегового	Стандартно 19 В, не более 15 Вт
Габариты модуля погружного	Высота 90 см, максимальный внешний диаметр 31 см
Связь/сигнализация	<i>TCP-IP/GSM</i>
Вес модуля погружного	Не более 30 кг

В зависимости от режима эксплуатации измерительный комплекс может быть подготовлен и использоваться в автономном, автономно-телеметрическом и телеметрическом режимах измерений. В автономном режиме регистрация и первичная обработка данных осуществляется промышленным компьютером.

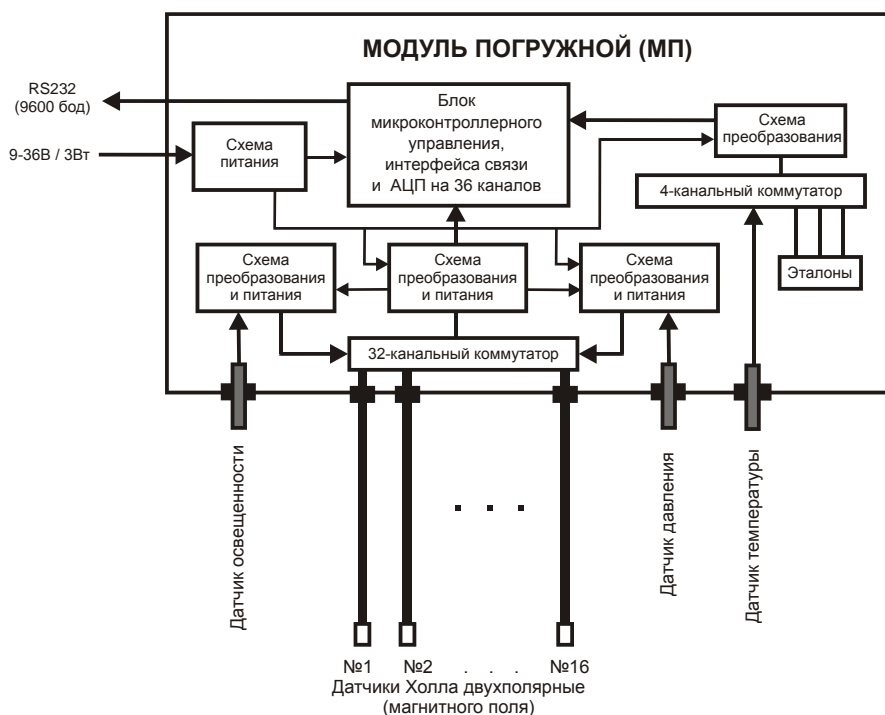
Для обеспечения стойкости модуля погружного (МП) к биологическому обрастанию, механическим и коррозионным воздействиям агрессивной водной среды его конструктивные элементы были выполнены из пластиков: сополимера ПОМ *Zellamid 900* и полипропилена *Polystone P*.

Измеритель изменения величины раскрытия створок моллюсков регистрирует расстояние между неодимовым магнитом и датчиком Холла по величине магнитного поля. В качестве сенсора выбран датчик фирмы *Honeywell* серии *SS490*.

При реализации измерительного канала давления предпочтение было отдано жидкостным датчикам фирмы *Jumo* (Германия).

Измерительный канал температуры комплекса построен с использованием схемы токового усилителя и дифференциальной коммутации платинового датчика *HEL705-U* фирмы *Honeywell* и трех эталонных резисторов.

В качестве чувствительного элемента канала освещенности были выбраны миниатюрные датчики *APDS-9007* фирмы *Avago Technologies*.



Р и с. 2. Общая структурная схема электронной аппаратуры МП

Электроника МП обеспечивается связью и энергопитанием по трехжильному экранированному кабелю. Связь является однонаправленной, частота передачи измерительных кадров в бортовой модуль определяется первоначальными внутренними программными установками микроконтроллера (рис. 2).

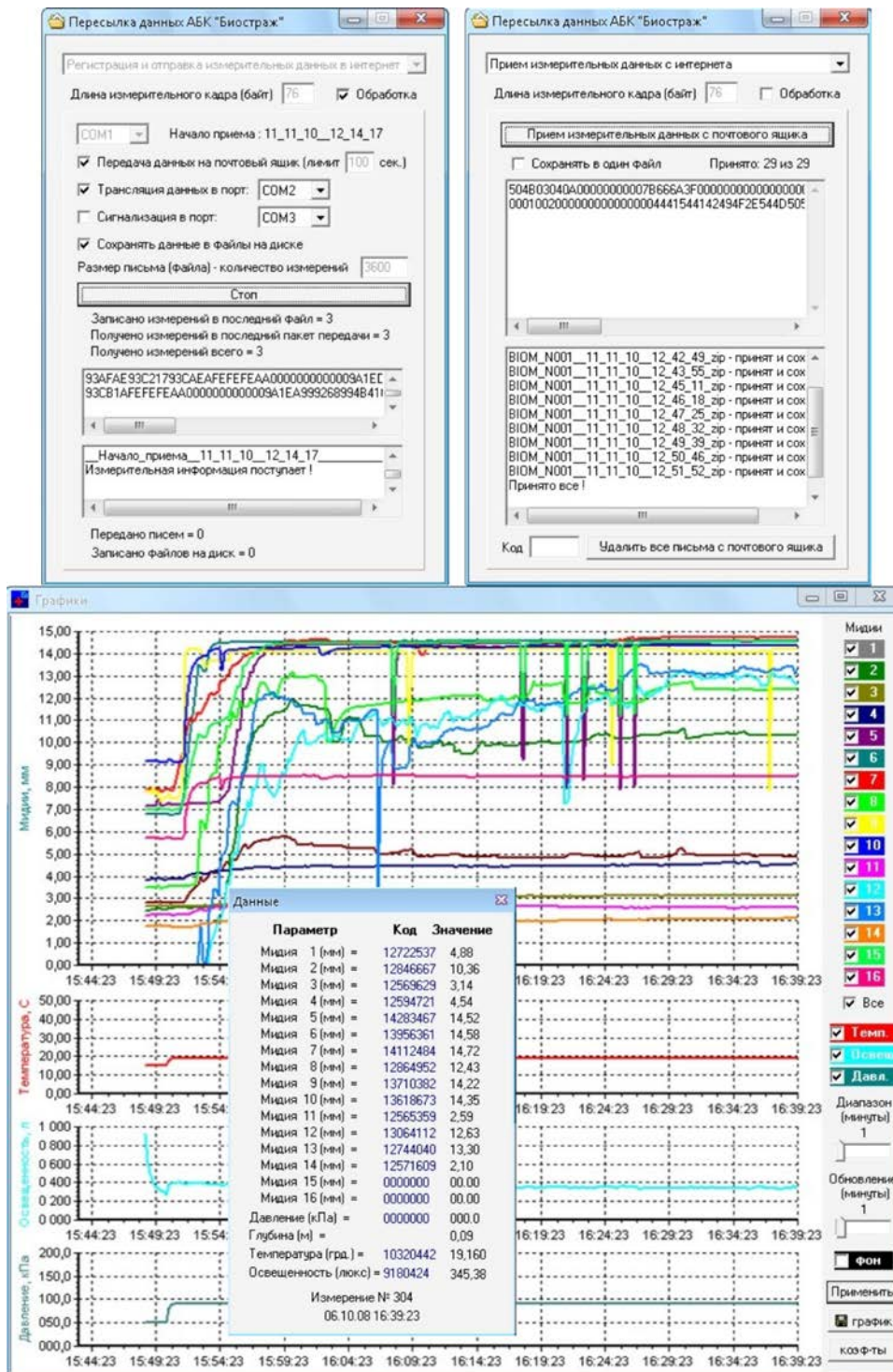
Алгоритмически-программное обеспечение комплекса выполняет следующие функции:

- регистрацию данных с возможностью считывания их на внешние носители без выключения рабочего режима измерений;
- численно-графическое отображение измерительной информации;
- возможность прямой ретрансляции данных в телеметрическом режиме;
- возможность передачи пакетов данных через средства связи (Интернет);
- формирование сигнала тревоги при превышении пороговых показателей загрязненности и биомаркеров, а также его оперативная передача контролирующим органам через систему *GSM*-связи.

В результате выполнения проекта был разработан и прошел авторскую регистрацию пакет программ для работы с автоматизированным измерительным комплексом, состоящий из программы первичной регистрации и обработки данных в автономном и телеметрическом режимах (*DATABIOM*) (рис. 3), программы регистрации и вторичной обработки данных в телеметрическом режиме (*BIOMON*) и программы подготовки и расчета градуировочных коэффициентов измерительных каналов комплекса (*GRADUATE*).

Полученные данные об особенностях поведенческих реакций моллюсков и результаты испытаний разработанных приборов являются достаточно полной базой для разработки и внедрения в нашей стране во всех сферах современного водопользования систем автоматизированного биомониторинга водной среды на основе поведенческих реакций моллюсков. Созданный комплекс автоматического биомониторинга водной среды на основе контроля поведения двустворчатых моллюсков и фоновых параметров окружающей среды может использоваться в автоматическом режиме реального времени для оперативного контроля качества пресных вод на водозаборах и водоемах и для контроля качества загрязненных вод. Контроль прибрежных морских вод может осуществляться на пляжах, фермах по выращиванию рыбы и моллюсков. На базе комплексов может быть создана измерительная сеть с единым центром сбора и анализа информации.

Результаты работ по проекту могут быть использованы Министерством по вопросам чрезвычайных ситуаций, Министерством транспорта и связи, Министерством охраны окружающей природной среды, а также научными организациями Украины.



Р и с. 3. Общий вид интерфейса программы DATABIOM

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Corina de Hoogh*. Musselmonitor. Zebra mussels detect spill and pollution. – <http://www.kwrwater.nl/publicaties>.
2. *Васенко О.Г., Верниченко-Цветков А.Ю., Ковальова О.М.* Щодо вдосконалення методики екологічної оцінки якості поверхневих вод // V Міжнародна науково-практична конференція – екологічна безпека; проблеми і шляхи вирішення. Т. 1. – Харків: Райдер, 2009. – С. 243 – 246.
3. *Холодкевич С.В.* Биоэлектронный мониторинг уровня токсичности природных и сточных вод в реальном времени // Экологическая химия. – 2007. – 16, № 4. – С. 223 – 232.
4. *Gunatilaka A., Diehl P.* A brief review of chemical and biological continuous monitoring of rivers in Europe and Asia // *Biomonitoring and Biomarkers as Indicators of Environmental Change: Volume II.* – New York: Plenum Publishing Corp., 2000. – P. 9 – 28.
5. *Kramer K.J.M., Botterweg J.* Aquatic biological early warning systems // *Bioindicators and Environmental Management.* – London: Academic Press, 1991. – P. 95 – 126.
6. *Kramer K.J.M., Foekema E.M.* The 'Musselmonitor (r)' as biological early warning system: The first decade // *Biomonitoring and Biomarkers as Indicators of Environmental Change: Volume II.* – New York: Plenum Publishing Corp., 2000. – P. 59 – 87.
7. *The BioWatch Program: Detection of Bioterrorism* Congressional Research Service // Report No. RL 32152. November 19, 2003. – <http://www.fas.org/sgp/crs/terror/RL32152.html>.
8. *Technologies and Techniques for Early Warning Systems to Monitor and Evaluate Drinking Water Quality: A State of the Art Review* // U.S. Environmental Protection Agency. – December, 2005. – 236 с.
9. *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.
10. *Ашофф Ю.* Биологические ритмы. – М.: Мир, 1984. – 414 с.
11. *Холодкевич С.В., Кузнецова Т.В., Трусевич В.В. и др.* Особенности кардиоактивности и движения створок *Mytilus galloprovincialis* Lam. в норме и при токсическом воздействии // Сборник научных трудов, посвященных 95-летию Карадагской биологической станции и 30-летию Карадагского природного заповедника. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. – С. 524 – 537.

*Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: gausky@inbox.ru

Материал поступил
в редакцию 03.10.12

**Карадагский природный заповедник НАН Украины,
пгт. Курортное
E-mail: trusev@list.ru

АНОТАЦІЯ Описаний дослідний зразок комплексу автоматичного біомоніторингу водних середовищ, який призначений для раннього виявлення отруйливих забруднень прісних і морських вод, життєво небезпечних для живих організмів, від джерел природного, техногенного та антропогенного походження.

Ключові слова: біомоніторинг, «Біоварта», біоелектронний комплекс, отруйливі забруднення, екологічний контроль, біомаркери, біоіндикатори, забруднення навколишнього середовища.

ABSTRACT Pre-production model of a complex of water environments' automatic bio-monitoring is described. It is intended for early detection of fresh- and seawater poisoning pollution (natural, industrial and anthropogenic origin) vitally dangerous for living organisms.

Keywords: bio-monitoring, "Bioguard", bio-electronic complex, poisoning pollution, ecological control, biomarkers, bio-indicators, environment pollution.