

УДК 574.24

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАННЕГО ОПОВЕЩЕНИЯ ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ВОДОЕМАХ И ЕЕ АПРОБАЦИЯ

А. А. Ипатов¹, И. Н. Бахмет², Д. А. Екимов¹, Н. А. Кулдин¹

¹ Петрозаводский государственный университет

² Институт биологии Карельского научного центра РАН

Автоматическая система раннего оповещения об экологической опасности на водоемах относится к средствам биомониторинга при помощи дистанционного контроля состояния двустворчатых моллюсков. Система включает в себя самих животных, инфракрасные оптико-электронные датчики, кабели, буй, сервер, ноутбук, мобильный телефон. Буй состоит из аккумуляторной батареи, блока обработки данных, приемно-передающего устройства. Благодаря такой конструкции обеспечивается автономное использование системы, снижение затрат на ее обслуживание, а также возможность использовать систему в полевых условиях. Апробация системы выполнена на пресноводных и морских двустворчатых моллюсках. Была показана высокая стабильность сердечной ритмики животных и возможность применения системы как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Ключевые слова: биомониторинг; экология; сердечный ритм; плетизмография; *M. edulis*; *Unio sp.*

A. A. Ipatov, I. N. Bakhmet, D. A. Yekimov, N. A. Kuldin. AUTOMATIC EARLY WARNING DEVICE FOR ENVIRONMENTAL RISKS AT WATERBODIES AND ITS TRIALS

Automatic early warning device for environmental risks at waterbodies is a tool for bio-monitoring based on remote monitoring of the condition of bivalves. The system is made up of the animals, IR optic sensors, cables, buoy, server, laptop computer, mobile phone. Buoy consists of accumulator, data processing unit, transceiver. This design enables stand-alone operation of the device, reduction of service costs, the possibility to use it in the field. Trial runs were performed for freshwater and saltwater bivalves. They demonstrated high stability of the animals' heart rate and applicability of the device in both laboratory and field conditions.

Keywords: biomonitoring; ecology; heart rate; plethysmography; *M. edulis*; *Unio sp.*

Введение

Известна система биологического мониторинга водной среды, состоящая из датчика носительного движения частей тела животного,

линии передачи сигнала датчика, выполненной в виде оптического волокна, усилителя, аналого-цифрового преобразователя и компьютера. Данная система основана на регистрации и анализе сигналов движения жаберных

крышек рыб, характеризующих дыхательную активность животных [Холодкевич, Любимцев, 2008]. Недостатком данной системы является невысокая точность измерений, поскольку размещение датчика относительного движения на теле рыбы может вызвать у нее состояние стресса, которое не связано с изменением качества водной среды. Кроме того, движение жаберных крышек рыб часто связано с причинами, обусловленными факторами индивидуальных особенностей особей и физиологическими природными изменениями. Во второй известной системе биомониторинга в качестве животных-индикаторов используются двустворчатые моллюски, а именно – движение створок раковины животных [Холодкевич, Любимцев, 2009]. Недостаток данной системы заключается в том, что изменение положения створок раковин двустворчатых моллюсков может быть обусловлено иными внешними воздействиями (подводные течения, приливы), а не изменением качества водной среды. Кроме того, движение створок раковин моллюсков никак не скоррелировано с дыхательной активностью, так как потребление кислорода обеспечивается движением ресничек жаберного эпителия. Таким образом, при изменении факторов внешней среды изменяется скорость течения воды через жабры моллюсков, тогда как створки раковин могут оставаться в этот момент без движения. Наиболее близким аналогом к нашей разработке является система биологического мониторинга окружающей среды, которая состоит из инфракрасных оптико-электронных датчиков, установленных на карапаксе речных раков, усилителей, аналого-цифровых преобразователей и компьютера [Kholodkevich et al., 2008]. Система регистрирует параметры кардиологической активности животных. Тестируемых животных размещают в проточном аквариуме. У данной системы также существует несколько недостатков. Во-первых, она требует регулярного обслуживания и непригодна для автономной работы в полевых условиях (раков необходимо кормить и отслеживать периоды линьки и размножения, во время которых сердечная активность зависит в основном от внутренних факторов). Во-вторых, данный вид животных достаточно подвижен, что также вносит дополнительный фактор, меняющий сердечную ритмику вне зависимости от качества воды. В то же время использование неинвазивного метода регистрации сердечной активности животных, на наш взгляд, является достаточно перспективным. В связи с этим данная методика была выбрана в качестве прототипа разработанной нами системы.

Материалы и методы

1. Разработанная система мониторинга окружающей среды в водных объектах

Техническим результатом, на достижение которого направлена разрабатываемая автоматическая система раннего оповещения об экологической опасности на водоемах (далее АСРЭВ), является создание комплекса устройств, которые обеспечат возможность автономной работы системы, снижение затрат на ее обслуживание, а также возможность использовать систему в полевых условиях. Достигается технический результат за счет того, что АСРЭВ снабжена приемо-передающим устройством, которое связано с блоком обработки данных и с сервером, а в качестве биоиндикаторов использованы моллюски, что дает возможность отслеживать состояние среды непосредственно на водоеме.

АСРЭВ (рис. 1) включает в себя: моллюсков (1), инфракрасные оптико-электронные датчики (2), кабели (3), буй (4), приемо-передающую антенну (5), ретрансляторную вышку (6), сервер (7), планшет (8), ноутбук (9), мобильный телефон (10).

Буй (рис. 2) состоит из аккумуляторной батареи (11), блока обработки данных (12), приемо-передающего устройства (13).

Работа предлагаемой АСРЭВ должна осуществляться следующим образом. Инфракрасные оптико-электронные датчики (см. рис. 1/2), закрепленные на раковинах моллюсков (см. рис. 1/1), измеряют плетизмограмму в режиме реального времени. Затем данные измерений передаются по кабелям в блок обработки данных (см. рис. 2/12), откуда при помощи приемо-передающего устройства (см. рис. 2/13) отправляются по беспроводному каналу связи на сервер (см. рис. 2/7). На сервере производится анализ принятых данных, по результатам которого можно судить об экологической обстановке на месте расположения системы. Питание системы осуществляется от аккумуляторной батареи (см. рис. 2/11).

В случае возникновения экологической опасности тревожное сообщение с сервера поступает на планшет или ноутбук (см. рис. 1/8, 9) в виде электронного письма и на мобильный телефон (см. рис. 1/10) в виде SMS с указанием места и времени наступления аварии.

Применение моллюсков в качестве тест-объектов избавляет от необходимости кормить животных. Увеличение числа биоиндикаторов, в нашем случае данного типа животных,

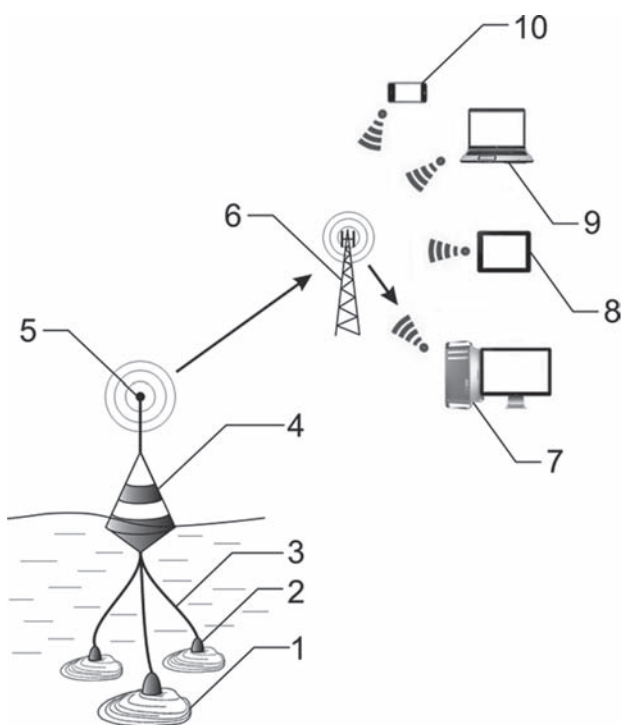


Рис. 1. Общая схема автоматической системы раннего оповещения об экологической опасности на водоемах

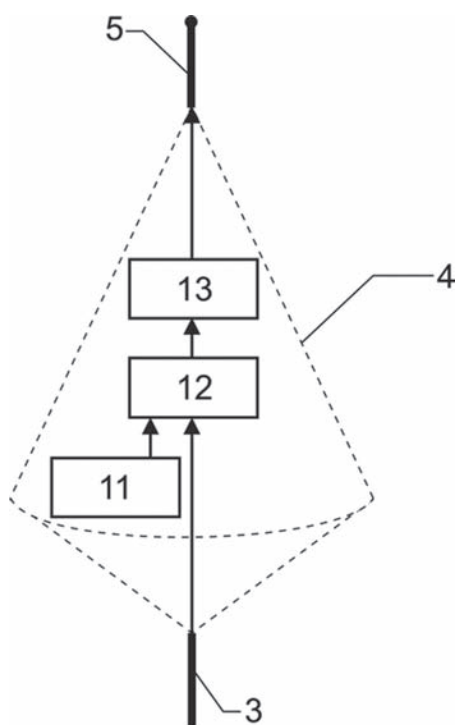


Рис. 2. Схема внутренней конструкции буя

снижает вероятность ложной тревоги и пропуска сигнала экологической опасности. Однако, с другой стороны, это приведет к повышенному энергопотреблению и тем самым снизит автономность системы. Поэтому по результатам исследований, проведенных в ПетрГУ, установлено, что оптимально использовать в системе 5–6 моллюсков, а в дополнение к аккумуляторной батарее использовать солнечную батарею.

2. Апробация разработанной системы

Для проверки разработанного прибора были проведены эксперименты по регистрации сердечной активности двустворчатых моллюсков – пресноводных *Unio sp.* и морских *Mytilus edulis*. Выбор объектов исследования обусловлен прежде всего широким распространением вышеуказанных видов и, следовательно, возможностью применения животных в дальнейшем при биоиндикации пресных (*Unio sp.*) и морских (*M. edulis*) прибрежных вод. Кроме того, мидии и беззубки являются модельными объектами и достаточно часто используются в различных экспериментах [Brand, 1968; Бергер, 1976; Widdows, Shick, 1985; Polhill, Dimock, 1996]. Это позволяет сравнить полученные результаты с уже имеющимися данными.

Основными целями данной работы являлись, во-первых, отработка методики полевой

регистрации сердечной активности моллюсков и, во-вторых, оценка стабильности сердечного ритма.

Пресноводные двустворчатые моллюски *Unio sp.* были собраны в старом русле реки Суна. После сбора измерили длину моллюсков, которая составила в среднем $67,7 \pm 7,7$ мм, и приклеили к ним оптические сенсоры CNY70. Перед началом регистрации сердечной ритмики животных в течение 7 суток акклиматизировали к лабораторным условиям. Моллюсков содержали в аквариумах из оргстекла с аэрируемой водой при постоянном освещении и температуре 17 °С. Ежедневно проводилась частичная смена воды. Всего в эксперименте было использовано 23 моллюска. Регистрация их сердечной активности осуществлялась непрерывно на протяжении 10 суток. Для проверки адекватности работы разработанного прибора параллельно использовали стандартную методику регистрации сердечной активности моллюсков [Depledge, Andersen, 1990; Bakhmet et al., 2005]. Все показатели указаны как средние значения \pm ошибка средней.

Мидии собирали в бухте Круглой Чупинской губы Кандалакшского залива Белого моря с установок для культивирования моллюсков (глубина 2 м) при температуре воды 8 °С. После сбора измеряли длину моллюсков и определяли возраст по кольцам зимней остановки роста

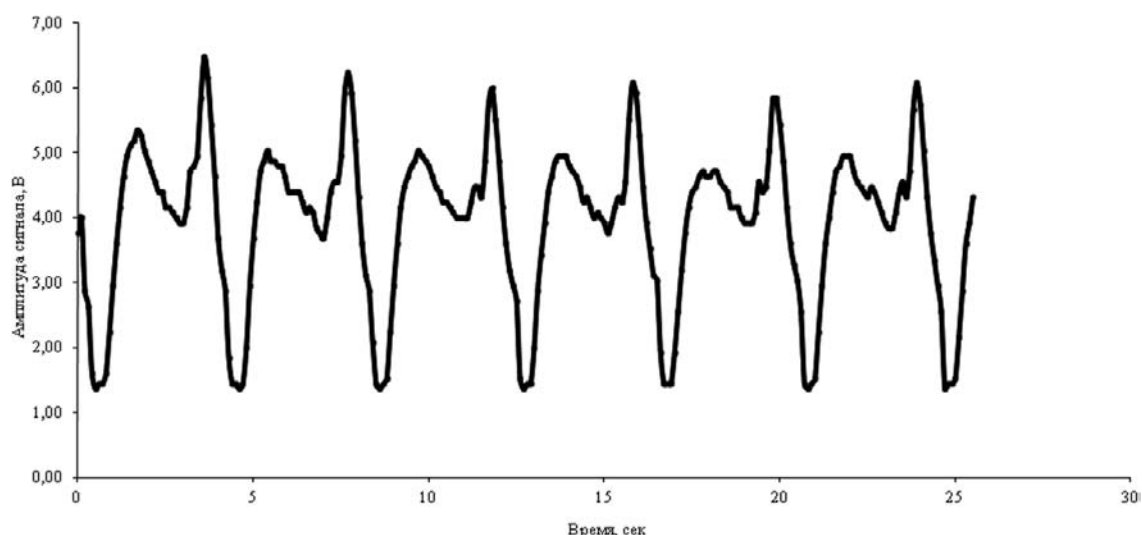


Рис. 3. Стандартная плетизмограмма *Unio sp.* и *M. edulis*

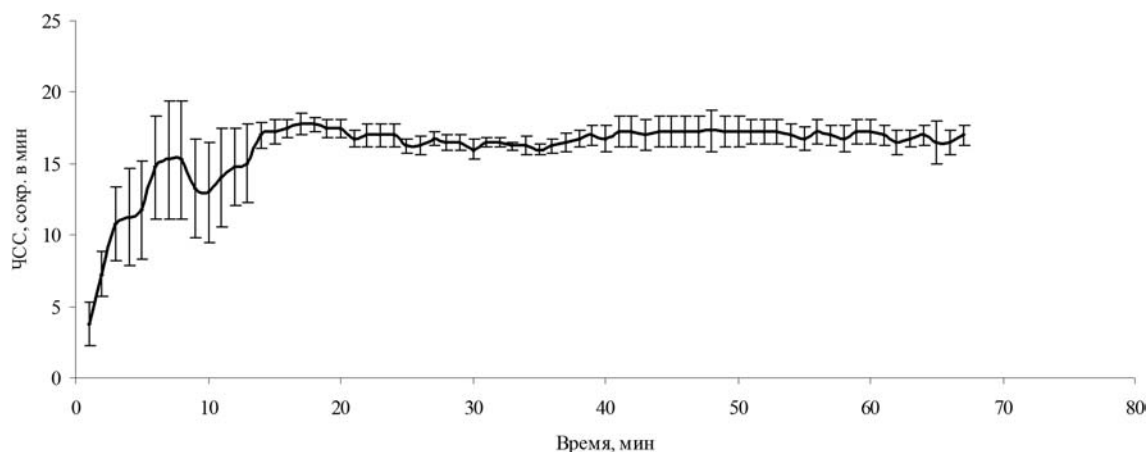


Рис. 4. Изменение ЧСС мидий в процессе адаптации к лабораторным условиям

раковины. Все работы выполнялись на ББС ЗИН РАН «Картеш». В дальнейшем соблюдалась методика, описанная для пресноводных животных, за исключением солености воды, которая поддерживалась на уровне 25 ‰ (характерная соленость для Белого моря) и температуры 10 °С. Первая часть экспериментов выполнялась в лабораторных условиях, вторая – в полевых. Для полевых работ мидии с приклеенными датчиками опускали в садке в море на глубину трех метров. Были использованы моллюски с длиной раковины $47,2 \pm 3,4$ мм.

Результаты и обсуждение

Прежде всего следует отметить, что мы получили четко выраженную запись плетизмограммы *Unio sp.* в виде последовательных волн, показывающих сокращение предсердий (короткий и высокий пик) и желудочка (пик более длительный и уплощенный) (рис. 3).

Применение стандартной методики дало аналогичный результат, что подтверждает адекватность использования нового прибора. Частота сердечных сокращений (ЧСС) составила в среднем $10,1 \pm 0,4$ в начале эксперимента и $8,1 \pm 0,3$ сокращений в минуту. Понижение сердечной активности объясняется недостатком питания. В то же время показатели ЧСС были достаточно стабильны на протяжении всего времени регистрации и не отклонялись от средних значений более чем на 1,1 сокращения в минуту. Следует отметить, что сердечная активность пресноводных моллюсков была более чем в два раза ниже ЧСС мидий при тех же температурах [Kholodkevich et al., 2009], а при 10 °С – в 1,5 раза выше (см. ниже). Причина данных различий пока неясна.

Плетизмограмма мидий не отличалась от таковой у пресноводных моллюсков (см. рис. 3). Средняя ЧСС составила $16,9 \pm 0,2$ сокращения в минуту в начале эксперимента

и $9,2 \pm 0,5$ – в конце, что также обусловлено недостатком питания. Хотелось бы подчеркнуть, что благодаря online-регистрации сердечной ритмики удалось отследить акклимацию животных к лабораторным условиям (рис. 4). Заметно, что для выхода ЧСС на плато моллюскам достаточно 20–40 минут. Относительно короткий период акклимации после хэндлинга связан, на наш взгляд, с условиями обитания мидий на литорали. В связи с отливно-приливной волной животные периодически подвергаются полной осушке (до 7 часов). Таким образом, мидии имеют достаточно ограниченное время для питания и дыхания. Следовательно, моллюски вынуждены быстро адаптироваться к изменениям параметров окружающей среды, что мы и наблюдали в нашем случае. Так же как и в случае с пресноводными моллюсками, ЧСС мидий была достаточно стабильна на протяжении всего времени регистрации и не отклонялась от средних значений более чем на 0,8 сокращения в минуту.

Разработанная методика полевой регистрации сердечной активности позволила получить четко различимую запись ЧСС мидий, расположенных на глубинах от двух до десяти метров. При отсутствии изменения температуры (в зимнее время) сердечная активность мидий достоверно не отклонялась от средних значений на протяжении четырех месяцев и составила в среднем $5,6 \pm 0,3$ сокращения в минуту. Отметим достаточно высокую ЧСС моллюсков, несмотря на низкую температуру ($-1,5$ °C), что свидетельствует о выработанных механизмах адаптации животных к зимним условиям существования.

Заключение

На основе проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что АСРЭВ позволяет дистанционно отслеживать изменения сердечной активности двустворчатых моллюсков, как пресноводных, так и морских, как в лабораторных, так и в полевых условиях. Ранее было показано, что ЧСС мидий высокочувствительна к самым различным поллютантам: тяжелым металлам [Marchan et al., 1999; Curtis et al., 2000], аммиаку [Bloxham et al., 1999], нефтепродуктам [Бахмет, 2009]. Следовательно, после создания базы данных по ЧСС моллюсков, обитающих в определенных водоемах, возможны следующие варианты применения данной системы:

– непрерывный дистанционный контроль водных объектов;

- обнаружение чрезвычайных экологических ситуаций, вызванных загрязнением водоемов промышленными стоками, тяжелыми металлами, аварийными разливами нефтепродуктов, с возможностью автоматического оповещения по электронной почте или путем отправки SMS-сообщения;
- контроль качества воды на водозаборах;
- контроль эффективности работы очистных сооружений.

Кроме того, АСРЭВ найдет применение в экспериментальных работах по изучению сердечной ритмики двустворчатых моллюсков в лабораторных и полевых исследованиях. В частности, с точки зрения фундаментальной науки, чрезвычайно важно проведение экспериментов по исследованию сердечной активности животных при изменяющихся природных факторах, как абиогенных (температура, соленость, концентрация кислорода), так и биогенных (питание, хищники).

Литература

Бахмет И. Н. Оценка влияния нефтепродуктов на сердечный ритм мидий // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2009. Т. XXII. С. 267–277.

Бергер В. Я. Сравнение реакций баренцевоморских и беломорских литторин на изменение солености среды и обсуждение вопроса о критериях физиологических рас / В сб. Исследование фауны морей. Т. XVII (XXV) Соленостные адаптации водных организмов. Л.: ЗИН РАН, 1976. С. 112–123.

Холодкевич С. В., Любимцев В. А. Датчик относительного движения частей тела животного и система биологического мониторинга среды обитания животного на его основе // Патент России № RU 77974 U1. 2008.

Холодкевич С. В., Любимцев В. А. Способ биологического мониторинга водной среды на основе регистрации положения створок раковин двустворчатых раковинных моллюсков и система для его осуществления // Патент России № RU 2361207. 2009.

Bakhmet I. N., Berger V. Ja., Khalaman V. V. The effect of salinity change on the heart rate of *Mytilus edulis* specimens from different ecological zones // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2005. Vol. 318, No 2. P. 121–126.

Bakhmet I. N., Fokina N. N., Nefedova Z. A., Nemova N. N. Physiological-biochemical properties of blue mussel *Mytilus edulis* adaptation to oil contamination // Environ. Monit. Assess. 2009. Vol. 155. P. 581–591.

Bakhmet I. N., Kantserova N. P., Lysenko L. A., Nemova N. N. Effect of copper and cadmium ions on heart function and calpain activity in blue mussel *Mytilus edulis* // J. Environ. Sci. Health Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng. 2012. Vol. 47, No. 12. P. 1528–35.

Brand A. R. Some adaptations to the burrowing habit in the class Bivalvia. Ph. D. thesis, Univeraity of Hull, 1968. 23 p.

Curtis T. M., Williamson R., Depledge M. H. Simultaneous, long-term monitoring of valve and cardiac activity in the blue mussel *Mytilus edulis* exposed to copper // *Mar. Biol.* 2000. Vol. 136, No 5. P. 0837–0846.

Depledge M. H., Andersen B. B. A computer-aided physiological monitoring system for continuous, long-term recording of cardiac activity in selected invertebrates // *Comp. Biochem. Physiol.* 1990. Vol. 96. P. 474–477.

Kholodkevich S. V., Ivanov A. V., Kurakin A. S. et al. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations // *Environ. Bioindic.* 2008. Vol. 3, No 1. P. 23–34.

Kholodkevich S. V., Ivanov A. V., Kuznetsova T. V. et al. Ultradian rhythms in cardiac activity of

bivalvia // *Dokl. Biol. Sci. Physiol.* 2009. Vol. 426. P. 216–218.

Marchan S., Davies M. S., Fleming S., Jones H. D. Effect of copper and zinc on the heart rate of the limpet *Patella vulgata* L. // *J. Comp. Biochem. Physiol.* 1999. A. Vol. 123. P. 89–93.

Polhill B. J. V., Dimock R. V. Jr. Effects of temperature and pO₂ on the heart rate of juvenile and adult freshwater mussels (Bivalvia: Unionidae) // *Comp. Biochem. Physiol. Part A: Physiol.* 1996. Vol. 114, iss. 2. P. 135–141.

Widdows J., Shick J. M. Physiological responses of *Mytilus edulis* and *Cardium edule* to aerial exposure // *Mar. Biol.* 1985. Vol. 85. P. 217–232.

Поступила в редакцию 15.05.2015.

References

Bakhmet I. N. Ocenka vliyaniya nefteproduktov na serdechnyi ritm midiy [Petroleum products impact assessment on the heart rate of mussels]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of ecological monitoring and ecosystem modelling]. 2009. Vol. XXII. P. 267–277.

Berger V. Ja. Sravnenie reakcii barentsovomorskih i belomorskih littorin na izmenenie solenosti sredy obsuzhdenie voprosa o kriteriyah fiziologicheskikh ras [Comparison of reactions to salinity changes in Littorina from the Barents and White Seas and discussion on criteria of physiological races]. *V sb. Issledovanie fauny morei* [Study of marine fauna]. Vol. XVII (XXV) Solenostnye adaptacii vodnyh organismov. Leningrad: ZIN RAN, 1976. P. 112–123.

Holodkevich S. V., Liubimcev V. A. Datchik otnositelnogo dvizheniya chastei tela zhivotnogo i sistema biologicheskogo monitoringa sredy obitaniya zhivotnogo na ego osnove [Sensing device for capturing relative motions of animal body parts and biological monitoring of the living environment]. Patent Rossii No RU 77974 U1 [Russian patent No RU 77974 U1]. 2008.

Holodkevich S. V., Liubimcev V. A. Sposob biologicheskogo monitoringa vodnoi sredy na osnove registracii polkozheniya stvorok rakoviny duhstvorchatyh rakovinyh molluskov i sistema ego osuschestvleniya [Method for aquatic medium biological monitoring based on recording the position of the shell valves of bivalve mollusks and a system for carrying out said method]. Patent Rossii No RU 2361207 [Russian patent No RU 2361207]. 2009.

Bakhmet I. N., Berger V. Ja., Khalaman V. V. The effect of salinity change on the heart rate of *Mytilus edulis* specimens from different ecological zones. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2005. Vol. 318, No 2. P. 121–126.

Bakhmet I. N., Fokina N. N., Nefedova Z. A., Nemova N. N. Physiological–biochemical properties of blue mussel *Mytilus edulis* adaptation to oil contamination. *Environ. Monit. Assess.* 2009. Vol. 155. P. 581–591.

Bakhmet I. N., Kantserova N. P., Lysenko L. A., Nemova N. N. Effect of copper and cadmium ions on heart function and calpain activity in blue mussel *Mytilus edulis*. *J. Environ. Sci. Health Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 2012. Vol. 47, No 12. P. 1528–1535.

Brand A. R. Some adaptations to the burrowing habit in the class Bivalvia. Ph. D. thesis, Univeraity of Hull, 1968. 23 p.

Curtis T. M., Williamson R., Depledge M. H. Simultaneous, long-term monitoring of valve and cardiac activity in the blue mussel *Mytilus edulis* exposed to copper. *Mar. Biol.* 2000. Vol. 136, No 5. P. 0837–0846.

Depledge M. H., Andersen B. B. A computer-aided physiological monitoring system for continuous, long-term recording of cardiac activity in selected invertebrates. *Comp. Biochem. Physiol.* 1990. Vol. 96. P. 474–477.

Kholodkevich S. V., Ivanov A. V., Kurakin A. S., Kornienko E. L., Fedotov V. P. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations. *Environ. Bioindic.* 2008. Vol. 3, No 1. P. 23–34.

Kholodkevich S. V., Ivanov A. V., Kuznetsova T. V., Kurakin A. S., Kornienko E. L., Pan'kov S. L., Khalatov A. N. Ultradian rhythms in cardiac activity of bivalvia. *Dokl. Biol. Sci. Physiol.* 2009. Vol. 426. P. 216–218.

Marchan S., Davies M. S., Fleming S., Jones H. D. Effect of copper and zinc on the heart rate of the limpet *Patella vulgata* L. *J. Comp. Biochem. Physiol.* 1999. A. Vol. 123. P. 89–93.

Polhill B. J. V., Dimock R. V. Jr. Effects of temperature and pO₂ on the heart rate of juvenile and adult freshwater mussels (Bivalvia: Unionidae). *Comp. Biochem. Physiol. Part A: Physiol.* 1996. Vol. 114, iss. 2. P. 135–141

Widdows J., Shick J. M. Physiological responses of *Mytilus edulis* and *Cardium edule* to aerial exposure. *Mar. Biol.* 1985. Vol. 85. P. 217–232.

Received May 15, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ипатов Андрей Александрович

магистрант
Петрозаводский государственный университет,
физико-технический факультет
пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
е-mail: andrej.ipatov2011@yandex.ru
тел.: (8142) 764288

Бахмет Игорь Николаевич

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: igor.bakhmet@gmail.com
тел.: (8142) 769810

Екимов Дмитрий Анатольевич

старший преподаватель
Петрозаводский государственный университет,
физико-технический факультет
пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: edmitr@sampo.ru
тел.: (8142) 719662

Кулдин Николай Александрович

доцент
Петрозаводский государственный университет,
физико-технический факультет
пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: kuldin@petsu.ru
тел.: (8142) 719662

CONTRIBUTORS:

Ipatov, Andrey

Petrozavodsk State University
33 Lenin St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: andrej.ipatov2011@yandex.ru
tel.: (8142) 764288

Bakhmet, Igor

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: igor.bakhmet@gmail.com
tel.: (8142) 769810

Yekimov, Dmitry

Petrozavodsk State University
33 Lenin St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: edmitr@sampo.ru
tel.: (8142) 719662

Kuldin, Nikolai

Petrozavodsk State University
33 Lenin St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: kuldin@petsu.ru
tel.: (8142) 719662