

САМОДИАГНОСТИКА БИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

*А.В. Иванов, С.В. Холодкевич,
А.С. Куракин*

Учреждение Российской академии наук
Санкт-Петербургский
научно-исследовательский центр
экологической безопасности РАН
г. Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18
E-mail: kholodkevich@mail.ru

В статье приводятся результаты и опыт создания и эксплуатации в производственных условиях системы самодиагностики работоспособности тест-организмов, входящих в состав биоэлектронной системы СПБМКВ, установленной на водозаборах г. Санкт-Петербурга.

Введение. В настоящее время при решении задач оценки состояния (здоровья) водных экосистем все большее внимание уделяется биологическим методам и основанным на них технологиям мониторинга качества поверхностных вод.

Однако большинство известных биологических методов не только не поддаются автоматизации, но и вообще не могут использоваться при решении задач экспресс-оценки состояния поверхностных вод, так как принципиально ограничены необходимостью проведения длительных процедур анализа.

Наибольшие успехи в развитии биологических методов и технологий оценки качества поверхностных вод в реальном времени достигнуты в направлении, основанном на использовании неинвазивных методов измерения реакций физиологических и поведенческих биомаркеров бентосных беспозвоночных с экзоскелетом (раков, крабов, моллюсков) на изменения качества среды их обитания.

Измерительные системы, с помощью которых регистрируют такие показатели, получили название биоэлектронных [1]. В таких системах животные включены в состав первичных преобразователей, являясь неотъемлемой частью электронной системы регистрации тех или иных фи-

зиологических или поведенческих биомаркеров.

Во всех известных биоэлектронных системах в качестве биомаркеров бентосных беспозвоночных используются поведенческие характеристики (движение створок моллюсков) и/или характеристики кардиоактивности. Примерами таких систем могут служить система MosselMonitor и система CAPMON [2, 3].

Выбор характеристик кардиоактивности в качестве биомаркеров обусловлен тем, что сердечно-сосудистая система (ССС) является одной из основных функциональных систем организма, отражает работу других систем, обладает быстрым откликом на внешние воздействия, а также характеризуется периодичностью своей работы.

Принимая во внимание указанные выше преимущества ССС, в 1999 г. был разработан волоконно-оптический метод регистрации и анализа кардиоактивности бентосных беспозвоночных с экзоскелетом. Измеряя фотоплетизмографически сокращения сердца, данный метод позволяет неинвазивно оценивать функциональное состояние животных на основе анализа характеристик распределения кардиоинтервалов. Основными измеряемыми характеристиками кардиоактивности являются: среднее значение кардиоинтервалов (M_{cp}), частота сердечных сокращений (ЧСС), среднее квадратичное отклонение (СКО), стресс-индекс (СИ), определяемый по формуле

$$СИ = \frac{1}{2M_{cp}СКО^2},$$

а также групповой коэффициент вариации ЧСС, вычисляемый по группе исследуемых тест-животных.

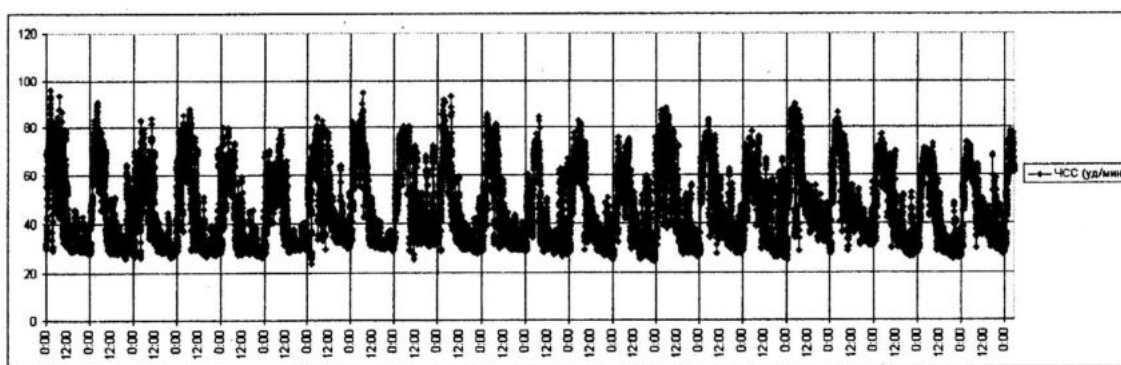
Используя данный метод, были проведены многочисленные исследования взаимосвязи функционального состояния животных и качества окружающей среды (ссылка). Было показано, что животные интегрально реагируют на изменения внешней среды, т.е. вне зависимости от природы изменения, а также количества факторов, обуславливающих данное изменение.

Это позволило создать биоэлектронную систему, направленную на непрерывный мониторинг в реальном времени качества воды поверхностного источника СПБМКВ (станция производственного биологического мониторинга качества воды). Данная система предназначена для своевременного выявления опасного для водоснабжения населения уровня токсичности воды и подачи аварийного сигнала в центр управления производством. В качестве тест-организмов для систем СПБМКВ были выбраны речные раки *Pontastacus leptodactylus*. В 2005 г. станции СПБМКВ были установлены на всех водозаборах г. Санкт-Петербурга [4].

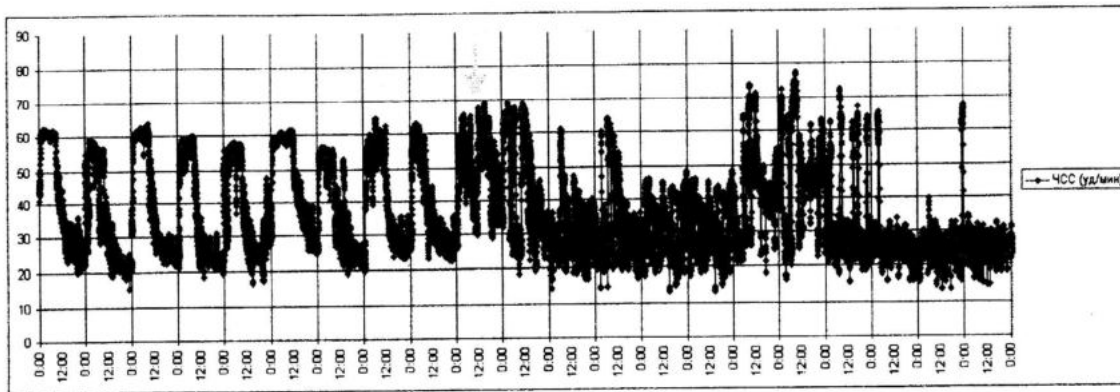
Проблема. Одной из важных проблем, которая возникает при разработке и эксплуатации любой сложной технической системы, является проблема самодиагностики как отдельных ее блоков, так и всей системы в целом. При производственной эксплуатации станций СПБМКВ возникла необходимость создания системы самодиагностики работоспособности тест-организмов, выполняющих роль сенсоров станции. Поскольку станция СПБМКВ осуществляет мониторинг в автоматическом режиме, работоспособность ее биосенсоров необходимо было оценивать также автоматически. При этом оценку функционального состояния животных-биоиндикаторов необходимо было проводить методом, при котором они не должны подвергаться

стрессовым тест-воздействиям, которые сами по себе могли бы приводить к неработоспособности биосенсоров.

Для решения данной проблемы были разработаны способ и система автоматической регистрации циркадианного (околосуточного) ритма в функционировании ССС раков, используемых в СПБМКВ в качестве тест-организмов [5, 6]. В естественных условиях обитания у пресноводных раков наблюдается суточная ритмика, проявляющаяся в более высокой локомоторной и пищедобывательной активности в сумеречное и ночное время. Повышение в темное время суток двигательной активности раков сопровождается соответствующими изменениями вегетативных показателей, в том числе повышением ЧСС [7]. Кроме того, многочисленные исследования на различных видах животных указывают на взаимосвязь функционального состояния животных с наличием циркадианной активности [8]. Проведенные в НИЦЭБ РАН экспериментальные исследования на речных раках подтвердили наличие такой взаимосвязи, а также выявили отличия в реакциях животных с хорошей и плохой циркадианной активностью на внешние воздействия. В частности, было показано, что группы животных, демонстрирующие циркадианную ритмику, реагируют на внешние воздействия более синхронизовано и однонаправлено.



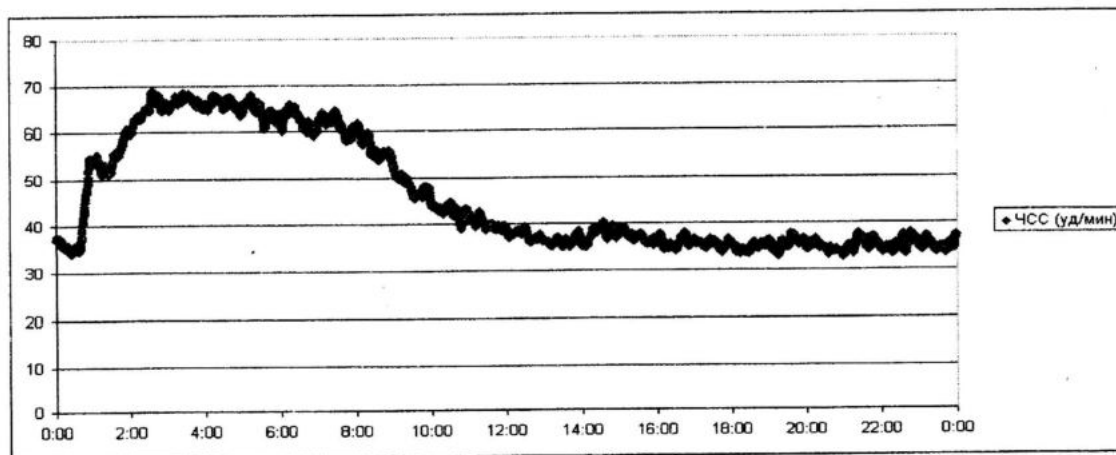
Р и с. 1. Типичная динамика ЧСС рака из референтной группы в течение 3-х недель работы на станции СПБМКВ (Северная водопроводная станция, г. С-Петербург)



Р и с. 2. Пример нарушения циркадианного ритма ЧСС рака из референтной группы за 12 суток до гибели тест-животного на станции СПБМКВ (Северная водопроводная станция, г. С-Петербург)

При разработке системы самодиагностики были проанализированы многомесячные данные, полученные при работе станций СПБМКВ. Было показано, что суточная динамика раков с хорошим

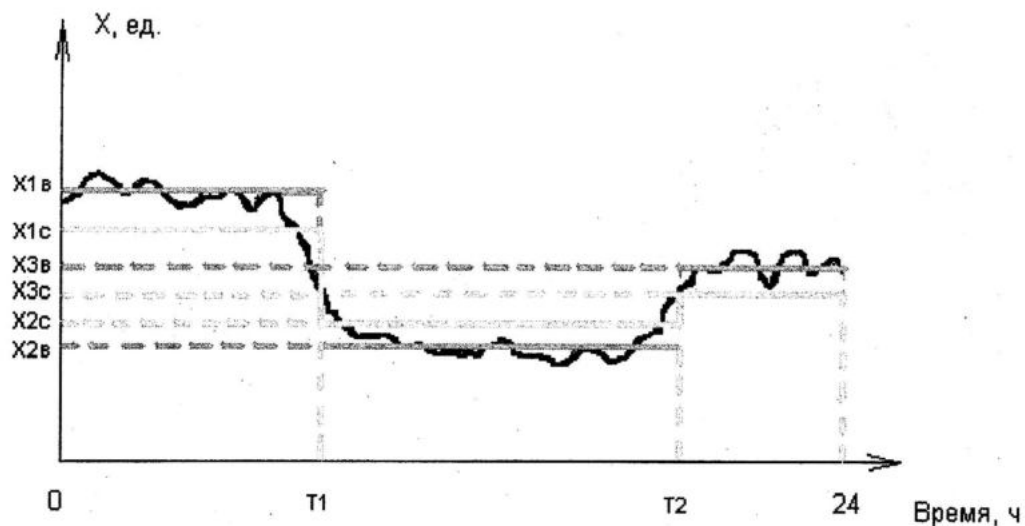
функциональным состоянием имеет простой вид с двумя ярко выраженными уровнями (покоя и активного состояния) (рис.3).



Р и с. 3. Суточная динамика ЧСС рака из референтной группы, усредненная за 40 дней работы на станции СПБМКВ (Северная водопроводная станция, г. С-Петербург)

Для описания такой циркадианной динамики была предложена 8-параметрическая математическая модель. Основные вычисляемые характеристики модели представлены на рис.4. При анализе циркадианного ритма динамики показателя X ССС раков определяются моменты времени T_1 и T_2 , соответствующие переходу животного из активного состояния в состояние покоя и обратно. Выделяют три внутрисуточных интервала времени ΔT_1 – интервал от начала отсчета суток до момента T_1 , ΔT_2

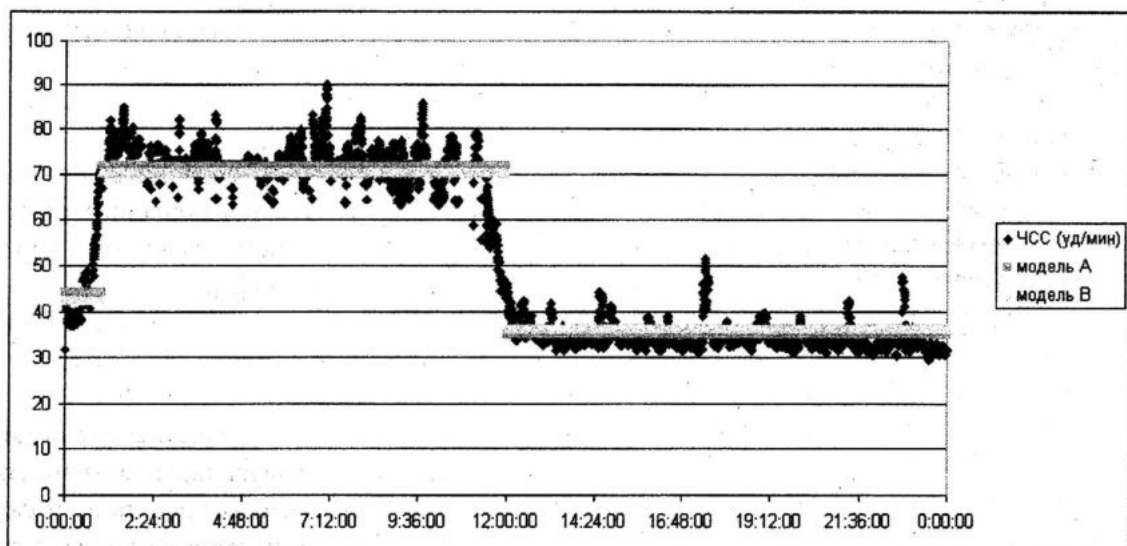
– интервал между T_1 и T_2 и ΔT_3 – интервал от момента T_2 до конца суток. Вследствие того, что период активного состояния раков обычно начинается около полуночи, а заканчивается в 8-10 часов утра, за начало отсчета суток было принято время 16 часов 00 минут. Для каждого интервала времени ΔT_i вычисляются два значения X_{ic} и X_{ib} , где X_{ic} – среднее значение величины X на интервале ΔT_i , а X_{ib} – наиболее часто встречающееся значение величины X на интервале ΔT_i .



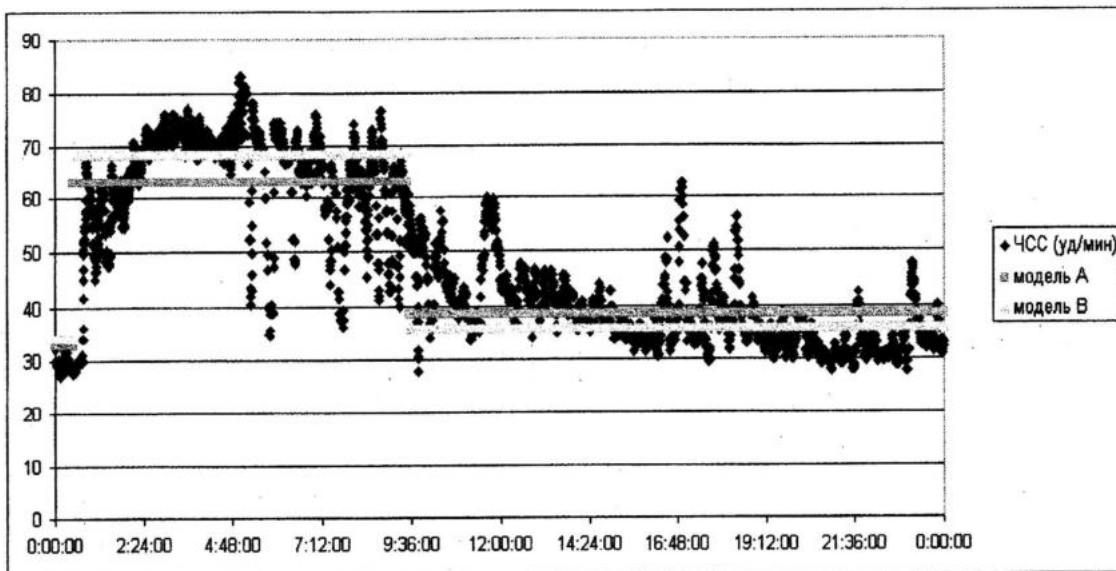
Р и с. 4. Основные параметры модели, вычисляемые при анализе циркадианного ритма кардиосистемы: $T_{1,2}$ – время перехода тест-организма из активного состояния в состояние покоя и обратно; X_{ic} (в) – среднее (наиболее часто встречающееся) значения параметра X на промежутке времени i

На рис. 5,6 представлены примеры суточной динамики ЧСС раков, полученные со станций СПБМКВ с вычисленными характеристиками предложенной математической модели. При этом видно, что характеристики X_{ic} (модель А) и X_{iv} (модель В) близки по своим значениям на рис.5 и заметно отличаются на рис. 6. Такое отличие обусловлено тем, что на интервалах времени ΔT_i в

случае рис. 6 график ЧСС рака имеет достаточно продолжительные по времени и большие по амплитуде выбросы. Таким образом, наличие или отсутствие таких выбросов может контролироваться по разнице величин X_{ic} и X_{iv} , что является дополнительной информацией при анализе циркадианного ритма ССС раков.



Р и с. 5. Пример вычисления основных параметров модели, вычисляемых при анализе циркадианного ритма ЧСС раков на станции СПБМКВ (случай совпадения характеристик моделей А и В)



Р и с. 6. Пример вычисления основных параметров модели, вычисляемых при анализе циркадианного ритма ЧСС раков на станции СПБМКВ (случай несовпадения характеристик моделей А и В)

Данная модель была принята за основу системы самодиагностики работоспособности биосенсоров станции СПБМКВ. В алгоритм работы данной системы заложено определение для каждого из тест-животных 8 параметров математической модели T_k , X_{ic} и X_{iv} , а также отклонений этих значений от аналогичных значений, усредненных за предыдущие n дней. В том случае, когда указанные отклонения превышают заданные уровни L_{Ti} , L_{Xi} , принимается решение о неработоспособности данного биосенсора, а получаемые от него данные исключаются из решающей процедуры всей станции СПБМКВ. Величины n , L_{Ti} и L_{Xi} являются параметрами системы самодиагностики и должны настраиваться для каждого тест-животного индивидуально.

После испытаний в лабораторных условиях система самодиагностики работоспособности биосенсоров была установлена на одной из станций СПБМКВ, входящей в состав системы обеспечения безопасности водоснабжения в условиях обнаружения токсичных веществ в воде водозаборных сооружений водопроводных станций г. Санкт-

Петербурга. Успешно пройдя апробацию в производственных условиях, данная система была установлена в 2010 г. на всех станциях СПБМКВ в рамках проекта по модернизации.

Заключение. Экспериментально подтверждена связь наличия устойчивых циркадиантных ритмов кардиоактивности животного с его функциональным состоянием и со степенью приспособленности организма к изменяющимся условиям окружающей среды.

Разработаны и прошли апробацию математическая модель, алгоритм и метод, позволяющие проводить анализ в реальном времени циркадиантных ритмов ряда бентосных беспозвоночных животных с экзоскелетом [5].

Разработана система самодиагностики работоспособности тест-организмов (речных раков) станции СПБМКВ на основе анализа в реальном времени циркадиантных ритмов их кардиоактивности.

В 2010 г. в рамках проекта по модернизации данная система самодиагностики введена в производственную эксплуатацию на всех станциях СПБМКВ г. Санкт-Петербурга [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Холодкевич С.В.* Комплексное обеспечение химической безопасности водоснабжения населения городов для предотвращения и минимизации последствий чрезвычайных ситуаций (на примере Санкт-Петербурга) // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности: 05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях (химическая технология). СПб, 2006. – 301 с.
2. *MOSSELMONITOR®*, The biological early warning system, AquaDect, www.aquadect.nl.
3. *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, 96A(4): 473 – 477.
4. *Махнев П.П., Бекренев А.В., Бакланов В.С., Холодкевич С.В., Иванов А.В., Донченко В.К., Куракин А.С., Корниенко Е.Л., Федотов В.П.* Система обеспечения безопасности водоснабжения на водопроводных станциях Санкт-Петербурга // *Водоснабжение и санитарная техника*, 2006, № 9, ч. 1. – С. 6 – 15.
5. *Холодкевич С.В., Иванов А.В.* Способ биологического мониторинга окружающей среды и система для его осуществления // *Бюл. изобр.*, 2012, № 26. Оpubл. 20.09.2012г. Патент РФ №2461825. МПК G01N 33/18.
6. *Кинебас А.К., Нефедова Е. Д., Гвоздев В.А., Холодкевич С.В., Иванов А.В., Куракин А.С., Корниенко Е.Л.* Повышение эффективности и надежности биоэлектронных систем станций производственного биологического мониторинга качества воды // *Водоснабжение и санитарная техника*, 2012, № 1. – С. 20 – 27.
7. *Aagard A., Warman C.G., Depledge M.N., Naylor E.* Dissociation of heart rate and locomotor activity during the expression of rhythmic behavior in the shore crab *Carcinus maenas* // *Mar. Behav. Physiol.* 1995. V.26 – P.1 – 10.
8. *Bojsen B.H., Witthoff H., Styris have B., Andersen O.* In situ studies on heart rate and locomotor activity in the noble freshwater crayfish, *Astacus astacus* (L.) in relation to natural fluctuation in temperature and light intensity // *Freshwater Biology*. 1998. V. 39. – P. 455 – 465.