

УДК 628.11:504.064

## Повышение эффективности и надежности биоэлектронных систем станций производственного биологического мониторинга качества воды

А. К. КИНЕБАС<sup>1</sup>, Е. Д. НЕФЕДОВА<sup>2</sup>, В. А. ГВОЗДЕВ<sup>3</sup>,  
С. В. ХОЛОДКЕВИЧ<sup>4</sup>, А. В. ИВАНОВ<sup>5</sup>, А. С. КУРАКИН<sup>6</sup>, Е. Л. КОРНИЕНКО<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Кинебас Анатолий Кириллович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 42, тел.: (812) 326-53-16, e-mail: Kinebas\_AK@vodokanal.spb.ru

<sup>2</sup> Нефедова Елена Дмитриевна, кандидат технических наук, начальник Управления водоснабжения – главный технолог филиала ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» «Инженерно-инновационный центр»

Тел.: (812) 326-52-06, e-mail: Nefedova\_ED@vodokanal.spb.ru

<sup>3</sup> Гвоздев Владимир Андреевич, заместитель начальника Управления водоснабжения филиала ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» «Инженерно-инновационный центр»

Тел.: (812) 438-43-26, e-mail: Gvozdev\_VA@vodokanal.spb.ru

<sup>4</sup> Холодкевич Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН

197110, Россия, Санкт-Петербург, Корпусная ул., 18, тел.: (812) 230-77-43, e-mail: kholodkevich@mail.ru

<sup>5</sup> Иванов Алексей Валентинович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН

Тел.: (812) 230-79-75, e-mail: ivanovalexei@yahoo.com

<sup>6</sup> Куракин Антон Сергеевич, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН

Тел.: (812) 230-79-75, e-mail: kurakin\_as@mail.ru

<sup>7</sup> Корниенко Евгений Леонидович, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН

Тел.: (812) 230-78-75, e-mail: kornienko\_el@mail.ru

В 2005 г. в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» разработана система обеспечения химической безопасности водоснабжения в условиях обнаружения токсических веществ. Система основана на использовании станций производственного биологического мониторинга качества воды. В 2010 г. весь программно-аппаратный комплекс станции производственного биологического мониторинга качества воды был модернизирован с целью повышения обнаружительной способности и надежности систем. Разработанный инновационный проект уникален как с точки зрения использованных научно-технических решений, так и обеспечения надежной круглосуточной информацией о текущем состоянии водозаборных сооружений водопроводных станций.

**Ключевые слова:** биологический мониторинг, качество воды, водозабор, водопроводная станция, вариационная пульсометрия, тест-животные, стресс-индекс, биосенсор, биомаркер.

*Saint-Petersburg Vodokanal MPE* developed in 2005 a system of ensuring chemical safety of the water supply system in case of detecting toxic substances. The system is designed on the basis of industrial biological water quality monitoring stations. In 2010 both software and hardware of the industrial biological water quality monitoring station were upgraded to improve the system detectability and reliability. The developed innovation project is unique from sci-tech point of view as well as because it ensures reliable day-and-night data on the current state of the intake facilities of the water treatment plants.

**Key words:** biological monitoring, water quality, water intake, water treatment plant, variational pulsometry, reactors, stress-index, biosensor, biomarker.

С целью обеспечения безопасности водоснабжения населения Санкт-Петербурга от случайного (при аварии) или намеренного (в результате террористического акта) поступления на водопроводные станции загрязненной токсичными веществами воды все водозаборы водопроводных станций города в декабре 2005 г. были оснащены станциями производственного биологического мониторинга качества воды (СПБМКВ) [1].

На станциях используется разработанный в Научно-исследовательском центре экологической безопасности Российской академии наук (НИЦЭБ РАН) волоконно-оптический метод дистанционного измерения и анализа в реальном времени вариабельности сердечного ритма бентосных беспозвоночных с жестким панцирем, например *Crustacea (Decapoda)* и *Mollusca*, и поведенческих характеристик рыб.

В отличие от физико-химических методов биологический мониторинг позволяет интегрально выявлять уровень токсикологической опасности воды как среды обитания гидробионтов. На основе этого метода разработана биосенсорная информационно-измерительная система, предназначенная для проведения биомониторинга водоисточника в зоне питьевых водозаборов [2–4].

В конце 2010 г. система биомониторинга с использованием раков была усовершенствована (количество одновременно тестируемых раков увеличилось с двух до шести). Был модернизирован весь программно-аппаратный комплекс системы станций производственного биологического мониторинга качества воды. Комплекс позволяет осуществлять одновременный анализ кардиоактивности шести тест-животных, оценку их функционального состояния, анализ данных, полученных от системы наблюдения за движением рыб, а также от автоматической станции непрерывного экологического мониторинга (АСНЭМ), оценку уровня токсичности воды источника, поступающей на водозабор, передачу в режиме реального времени получаемой информации в диспетчерскую службу водопроводных станций. Алгоритмы, применяемые в программно-аппаратном комплексе, обеспечивают работу АСНЭМ с минимальной вероятностью ложного срабатывания для заданного числа тест-животных.

Цель модернизации системы биомониторинга – повышение эффективности и надежности работы биоэлектронной системы СПБМКВ, химической безопасности водоснабжения населения путем резкого снижения вероятности возникновения ложных сигналов тревоги, а также

создания методики и системы самодиагностики для последующей отбраковки тест-животных с ослабленными адаптационными возможностями.

СПБМКВ является наукоемкой, многопараметрической, многоуровневой системой, состоящей из нескольких блоков. Отказ в работе одного из них ведет к полной или частичной потере работоспособности всей системы. Основная отличительная особенность биоэлектронной системы СПБМКВ – использование в качестве сенсоров тест-организмов (раков и рыб), «работа» которых не всегда может адекватно восприниматься другими компонентами системы. Одной из важных проблем, выявленных в ходе эксплуатации СПБМКВ, являются ложные срабатывания. Это резкое изменение физиологического состояния тест-организмов, не связанное с опасным изменением качества воды, которое приводит к выработке сигнала тревоги.

Оценка физиологического состояния тест-животных системы СПБМКВ проводится на основе измерения и анализа нескольких показателей вариабельности сердечного ритма – биомаркеров: частота сердечных сокращений тест-организма, его стресс-индекс SI, относительная скорость изменения частоты сердечных сокращений и др. Для каждого из биомаркеров, измеряемых СПБМКВ, устанавливается свой пороговый уровень, превышение которого вызывает появление сигнала тревоги. При определении значения порогового уровня необходимо учитывать следующее. Если пороговый уровень установить высоким, то чувствительность системы снижается, так как степень стресса животного должна быть достаточно высокой для преодоления порогового значения, что в свою очередь может быть обусловлено только загрязнением высокой токсичности. Если же установить его низким, то сигнал тревоги будет подаваться при любом незначительном возбуждении биосенсора, не связанного с опасным изменением качества воды. Таким образом, возникает проблема выбора пороговых значений биомаркеров и алгоритмов обработки информации: с одной стороны, чувствительность системы должна быть достаточной для выявления опасных загрязнений, а с другой – частота ложных срабатываний должна быть минимальной. Опыт эксплуатации станций и анализ накопленной базы данных позволили подойти к решению этой проблемы следующим образом.

Анализ работы кардиосистемы каждого из биосенсоров производится независимо. Для каждого биомаркера B, характеризующего физио-

логическое состояние животного, устанавливается свой уровень срабатывания  $L_B$ , превышение которого указывает на то, что данный биосенсор находится в возбужденном или стрессовом состоянии. При этом сигнал аварийной тревоги о возможном загрязнении возникает в том случае, если используемые биосенсоры (от 2 до 6 раков) переходят в стрессовое состояние в течение достаточно малого периода времени срабатывания  $T_{cp}$ . Время срабатывания задается в настройках программного комплекса СПБМКВ. Основными биомаркерами, по которым система принимает решение о том, что данный биосенсор находится в стрессовом состоянии, являются стресс-индекс SI и скорость изменения частоты сердечных сокращений животного  $dHR$ :

$$dHR(t) = \frac{HR(t) - HR(t - T_3)}{HR(t - T_3)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $HR(t)$  – частота сердечных сокращений в момент времени  $t$ ;  $T_3$  – время задержки.

Таким образом, в решающую процедуру СПБМКВ о выработке сигнала аварийной опасности входят три параметра:  $L_B$ ,  $T_{cp}$  и  $T_3$ . Проанализируем влияние каждого из этих параметров на работу станции биомониторинга.

Снижение уровня срабатывания  $L_B$  влечет за собой повышение чувствительности станции, так как в этом случае необходимо меньшее стрессовое воздействие на биосенсор для того чтобы значение соответствующего биомаркера превысило порог  $L_B$ . В то же время надежность системы уменьшается, так как возрастает вероятность ложного срабатывания, поскольку в этом случае флуктуации значений соответствующего биомаркера, обусловленные естественными для биосенсора изменениями физиологического состояния, могут с большей вероятностью выходить за пределы уровня срабатывания.

При увеличении времени срабатывания  $T_{cp}$ , с одной стороны, повышается надежность определения реакции биосенсоров, так как временная разность ответов двух тест-организмов может быть больше значения  $T_{cp}$ , а с другой стороны, увеличивается вероятность ложного срабатывания, поскольку два независимых перехода биосенсоров в возбужденное состояние (особенно при низких значениях уровня срабатывания) могут привести к выработке сигнала аварийной опасности. Аналогичное утверждение справедливо и для параметра  $T_3$ . При увеличении времени задержки будут учитываться как быстрые, так и медленные процессы, приводящие к росту частоты сердечных сокращений, т. е. надежность регистрации перехода животного в стрессовое

состояние повышается. Однако такие медленные переходы, вероятнее всего, связаны с естественными для биосенсора изменениями физиологического состояния, а не с токсикологическим загрязнением окружающей среды, которое обычно носит пороговый характер. Кроме того, в этом случае увеличивается временная задержка между началом опасного воздействия и реакцией на него системы СПБМКВ.

На основании анализа полученных за несколько лет данных для каждого из основных биомаркеров (стресс-индекс и скорость нарастания частоты сердечных сокращений) были выбраны три значения уровня срабатывания как наиболее характерные. Так, для индекса напряжения были выбраны значения 1000, 5000 и 10000  $c^{-3}$ , а для скорости нарастания частоты сердечных сокращений – 50, 75 и 100%. Кроме того, величина этой скорости была рассчитана для трех значений параметра  $T_3$ : 2, 10 и 30 минут.

При обработке данных суточной кардиоактивности биосенсоров было замечено, что превышение уровня срабатывания биомаркеров происходит нерегулярно. При этом значения биомаркеров либо не превышают  $L_B$  в течение суток, либо превышают его неоднократно. Учитывая это, для каждой из установленных СПБМКВ были вычислены вероятности возникновения события, при котором происходит превышение значений соответствующих биомаркеров в течение суток уровня  $L_B$ , и средние значения периода  $T_{np}$  (время превышения), при котором данные превышения регистрировались.

Из данных рис. 1 видно, что время превышения монотонно уменьшается при увеличении значения  $L_B$ . Однако следует отметить, что выборка значений, по которой вычислялось среднее значение  $T_{np}$ , существенно неоднородна. Среднеквадратичное отклонение по выборке

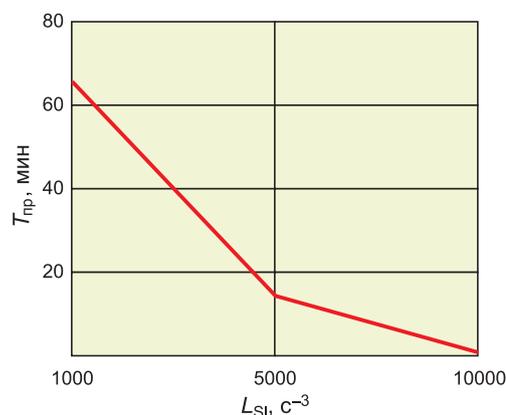
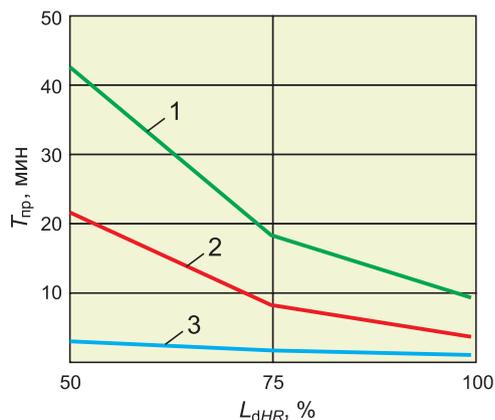


Рис. 1. Зависимость времени превышения  $T_{np}$  от уровня срабатывания  $L_B$ , соответствующего стресс-индексу SI



**Рис. 2.** Зависимость времени превышения  $T_{пр}$  от уровня срабатывания  $L_B$ , соответствующего скорости изменения частоты сердечных сокращений для трех значений времени задержки  $T_з$ , мин: 1 – 30; 2 – 10; 3 – 2

ке для индекса напряжения составляет 70–80%, а иногда и выше. Кроме того, вероятность возникновения события, при котором происходит превышение уровня срабатывания системы по стресс-индексу в течение суток, достаточно мала – 20–30%. Из этого следует, что погрешность вычисления  $T_{пр}$  достаточно велика и, следовательно, оценка вероятности ложного срабатывания по стресс-индексу является относительно грубой.

Из рис. 2 видно, что для каждого значения  $T_з$  время превышения монотонно уменьшается при увеличении уровня срабатывания. Анализ данных показывает, что среднеквадратичное отклонение в выборке значений  $dHR$  тем меньше, чем больше значение  $T_з$ , т. е. однородность выборки становится выше с ростом времени задержки. Так, среднеквадратичное отклонение при  $T_з = 2$  мин составляет 60–80%, при  $T_з = 10$  мин – 40%, а при  $T_з = 30$  мин – 30%. Следовательно, погрешность вычисления  $T_{пр}$  уменьшается при увеличении  $T_з$ , а оценка вероятности ложного срабатывания по скорости изменения частоты сердечных сокращений становится более точной. Нетрудно заметить, что при увеличении  $T_з$  время превышения монотонно растет (рис. 3).

Вычислив для каждой из установленных СПБМКВ вероятность возникновения события, при котором происходит превышение значений уровня  $L_B$  соответствующими биомаркерами в течение суток, а также средние значения периода времени  $T_{пр}$ , при котором данные превышения регистрировались, можно получить оценку вероятности ложных срабатываний. Она рассчитывается по формуле условной вероятности:

$$P(A) = P(A|B) \times P(B), \quad (2)$$

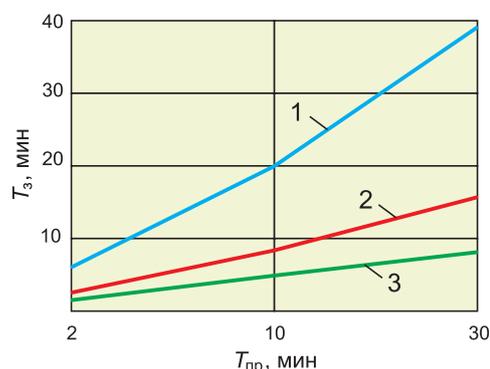
где  $P(A)$  – вероятность ложных срабатываний;  $P(B)$  – вероятность возникновения события, при котором происходит превышение уровня  $L_B$  соответствующим биомаркером в течение суток;  $P(A|B)$  – вероятность ложного срабатывания при условии, что событие  $B$  произошло.

Вероятность  $P(A|B)$  рассчитывается как отношение времени превышения (в минутах) к общему количеству минут в сутки (1440 мин). В [5] представлены данные вычислений средней вероятности ложного срабатывания для трех значений времени  $T_{ср}$  (2, 5 и 10 минут соответственно).

Результаты токсикологических экспериментов, проведенных в лаборатории экспериментальной экологии водных систем НИЦЭБ РАН, показали, что характерное время отклика биосенсоров на резкое токсикологическое воздействие составляет от 1 до 5–10 минут. При этом уровень срабатывания для стресс-индекса колеблется от 1000 до 15000, а для скорости нарастания частоты сердечных сокращений – 50–75%. Учитывая эти результаты, можно рекомендовать значения параметров для СПБМКВ, руководствуясь следующим алгоритмом:

1. Исходя из технологических, регламентных и экономических требований выбирается максимальное время срабатывания станции (т. е. временная задержка между началом воздействия и реакцией системы)  $T_{ср.макс}$ , а также оптимальное (или максимальное) значение прогнозируемого числа ложных срабатываний в год.

2. По данным таблиц [2] определяются биомаркеры и значения соответствующих параметров ( $L_B$ ,  $T_{ср}$  – для стресс-индекса и  $L_B$ ,  $T_{ср}$ ,  $T_з$  – для скорости изменения частоты сердечных сокращений), которые соответствуют требуемому числу ложных срабатываний в год в предположении, что  $T_{ср} < T_{ср.макс}$ .



**Рис. 3.** Взаимосвязь времени превышения  $T_{пр}$  и времени задержки для каждого из трех значений уровня срабатывания  
1 – dHR50; 2 – dHR75; 3 – dHR100

3. Из полученного набора выбираются минимальные значения уровня срабатывания  $L_B$  и максимальные значения параметров  $T_{cp}$  и  $T_3$ , так как именно эти значения обеспечивают наиболее надежную регистрацию перехода тест-животных в состояние стресса.

Кроме того, одним из эффективных способов снижения вероятности ложных срабатываний является увеличение количества биосенсоров, анализ физиологического состояния которых учитывается при оценке качества воды.

При анализе экспериментальных данных, полученных за 6 лет эксплуатации СПБМКВ на водопроводных станциях ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», была получена оценка вероятности ложного срабатывания системы:

$$P_2^0(2) \approx 1/30.$$

Данная вероятность может быть интерпретирована как частота ложных срабатываний системы СПБМКВ, что соответствует одному ложному срабатыванию в месяц. Для уменьшения частоты ложных срабатываний было предложено увеличить число тест-животных  $N$ , одновременная оценка физиологического состояния которых описывает качество водной среды. При этом появляется дополнительная возможность выбора уровня чувствительности системы, а именно числа гидробионтов  $M$ , одновременная реакция которых дает сигнал о потенциальной опасности загрязнения водной среды.

Используя полученную оценку частоты ложных срабатываний системы СПБМКВ для двух животных, можно получить вероятность ложного срабатывания станции  $P_N^0(M)$  при различном количестве  $N$  и  $M$ . Значения вероятности  $P_N^0(M)$  для  $N$  от 2 до 6 и  $M$  от 2 до  $N$  приведены в таблице. Желтым цветом отмечены комбинации чисел  $N$  и  $M$ , при которых вероятность ложного срабатывания меньше значения  $P_2^0(2)$ . Следует отметить, что наряду с повышением надежности системы, которая характеризуется частотой ложных срабатываний, необходимо добиваться максимальной чувствительности, которая характеризуется вероятностью срабатывания системы при измене-

нии качества водной среды. Если принять  $p$  как вероятность реакции одного рака на данное изменение качества водной среды, то вероятность срабатывания  $P_N(M)$  всей системы для фиксированных значений  $N$  и  $M$  описывается формулой:

$$P_N(M) = \sum_{k=M}^N C_N^k p^k (1-p)^{N-k}. \quad (3)$$

Таким образом, справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} P_{N_1}(M) &> P_{N_2}(M) \text{ при } N_1 > N_2; \\ P_N(M_1) &> P_N(M_2) \text{ при } M_1 < M_2; \\ P_6(4) &> P_3(3) \text{ при } p > \frac{7 - \sqrt{39}}{10} \approx 0,076; \\ P_6(4) &> P_4(3) \text{ при } p > 0,4. \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку вероятность  $p$  зависит от изменения качества водной среды, а также учитывая, что обнаружение этого воздействия должно быть достаточно устойчивым, можно рассматривать только те изменения качества водной среды, для которых  $p > 0,5$ . Таким образом, для достаточно сильных ( $p > 0,5$ ) изменений качества воды имеют место соотношения (4). Следовательно, максимальная чувствительность системы достигается при  $N = 6$ ,  $M = 4$ .

Для реализации на практике полученных результатов экспериментов СПБМКВ были оснащены в ходе модернизации четырем лазерными волоконно-оптическими фотоплетизмографами ЛВОФ-3 для одновременной регистрации кардиоактивности шести тест-животных. Фотоплетизмограф ЛВОФ-3 предназначен для изучения кардиоритма беспозвоночных животных, имеющих жесткий наружный покров (крабы, высшие раки, панцирные моллюски и др.), путем неинвазивного фотоэлектрического преобразования динамики изменения объема сердечного мешка в пропорционально изменяющийся аналоговый электрический сигнал.

Исследования, предшествовавшие внедрению, показали, что для использования в качестве биоиндикаторов должны отбираться только

N	M				
	2	3	4	5	6
2	0,033				
3	0,088	0,006			
4	0,155	0,021	0,001		
5	0,228	0,045	0,005	$2 \times 10^{-4}$	
6	0,303	0,079	0,012	0,001	$4 \times 10^{-5}$

здоровые животные, характеризующиеся эмоционально устойчивым состоянием. Поэтому для использования в качестве биосенсоров в СПБМКВ отбираются здоровые зрелые самцы определенного размера без видимых повреждений карапакса и конечностей. Перед тестированием животные проходят период адаптации к условиям нахождения в данном аквариуме до восстановления нормальной частоты сердечных сокращений (50–70 ударов в минуту при комнатной температуре воды), характерной для устойчивого спокойного состояния. Обычно здоровым, адаптированным к производственному шуму животным требуется от 0,5 до 1 ч.

Функциональное состояние рака признается хорошим в том случае, если при внешнем осмотре у него не обнаруживаются признаки заболеваний; при взятии за карапакс животное демонстрирует реакцию опистотонуса (поднимание клешневых конечностей); при подвешивании в воде частота сердечных сокращений составляет не менее 100 ударов в минуту, а стресс-индекс SI превышает 8000 условных единиц. Кроме того, во время «подвеса» в воде здоровые раки должны демонстрировать стабильное значение частоты сердечных сокращений в течение 15–20 минут и отсутствие аритмии [6; 7].

Опыт показывает, что содержание общего белка в гемолимфе здоровых раков, пригодных для использования на СПБМКВ, должно быть более 20 мг/мл. У больных или ослабленных раков содержание белка составляет менее 10 мг/мл, а во время «подвеса» в воде такие животные демонстрируют отклонение значений частоты сердечных сокращений более 20%. Ритмограммы сердца больных или ослабленных раков характеризуются выраженной аритмией и нестабильностью инотропных показателей ритма, а стресс-индекс не превышает 1000 условных единиц. Такие раки отбраковываются еще на стадии первичного отбора — по анализу гемолимфы на содержание общего белка.

При отборе животных с помощью методов биотестирования к применению на СПБМКВ пригодными оказывались в среднем не более 5–10% раков. Опыт эксплуатации СПБМКВ показал, что отобранные таким образом референтные группы раков при правильном режиме кормления и обслуживания аквариумов, по крайней мере в течение года, могут сохранять нормальный уровень функционального состояния, пригодный для использования их в качестве биосенсоров. Хорошим индикатором нормального функционирования тест-организма могут служить регулярные и успешные линьки, поскольку

этот процесс требует значительных энергозатрат, и только здоровые животные могут его успешно завершать.

Сохраняя нормальный уровень функционального состояния, биоиндикаторы способны демонстрировать адекватные количественные характеристики на стандартизованные стрессовые воздействия. Это очень важный фактор, так как именно измеряемая биоаналитическим блоком СПБМКВ величина стресс-индекса SI является одной из основных характеристик кардиоактивности тест-животного, используемой для выявления опасных уровней токсичности воды.

В естественных условиях обитания у пресноводных раков наблюдается околосуточная (циркадианная) ритмика, проявляющаяся в более высокой локомоторной и пищедобывательной активности в сумеречное и ночное время. В ряде исследований [8; 9] установлено, что усиление в темное время суток двигательной активности раков сопровождается соответствующими изменениями вегетативных показателей, в том числе увеличением частоты сердечных сокращений. Показано, что характерная для вида циркадианная ритмика может нарушаться у раков, а также у крабов при их плохом функциональном состоянии, вызванном стрессовыми факторами, в частности в результате воздействия токсических веществ. На основании этого было предложено включить анализ циркадианной ритмики раков в работу СПБМКВ с целью контроля за адаптивными способностями тест-животных.

В экспериментах, проведенных в лаборатории биоэлектронных методов геоэкологического мониторинга НИЦЭБ РАН, циркадианный ритм частоты сердечных сокращений пресноводных раков *Pontastacus leptodactylus* исследовался в течение нескольких месяцев при разной освещенности [10]. При сравнительном анализе характеристик кардиоактивности в «ночной» и «дневной» периоды использовались следующие показатели: количество суточных записей, в которых наблюдалась фаза достоверного повышения частоты сердечных сокращений в «ночной» период (в процентах к их общему числу), длительность фазы «ночной» активности и величина повышения частоты сердечных сокращений в этой фазе по сравнению с предшествующим периодом покоя в дневное время суток.

На основании полученных данных были установлены типичные для раков *Pontastacus leptodactylus* характеристики «ночной» активной фазы циркадианного ритма кардиоактивности — возрастание частоты сердечных сокращений более

чем на 30% (в среднем на 50%) по сравнению с дневным периодом покоя, причем длительность такого увеличения составляет не менее 2,5 часов (в среднем 6 часов). Эти значения могут использоваться в качестве критериев возникновения и стабилизации «ночной» активной фазы циркадианного ритма раков этого вида. Надежным показателем для определения начала фазы ночной активности является увеличение стресс-индекса SI – одного из основных показателей адаптированного для бентосных беспозвоночных метода вариационной пульсометрии [3; 4].

Анализ полученных результатов показал, что при длительном индивидуальном содержании раков в проточной воде р. Невы при колебаниях освещенности, близкой к естественной, или же при слабом постоянном освещении животные сохраняют способность проявлять характерный, генетически обусловленный для данного вида, циркадианный ритм чередования в «дневной» и «ночной» периоды суток соответственно низких и повышенных значений частоты сердечных сокращений [10]. Такая ритмичность, очевидно, коррелирует с ритмичкой локомоторной активности и для других видов ракообразных. В естественных условиях обитания циркадианная ритмика с выраженным усилением кардиоактивности и локомоций в «ночное» время у изученных видов декапод является адаптацией к циклическим изменениям в течение суток освещенности и температуры окружающей среды, способствующей избеганию дневных хищников и снижению межвидовой конкуренции.

Проведенный в работе анализ многодневных непрерывных измерений частоты сердечных сокращений раков *Pontastacus leptodactylus*, находившихся в неодинаковых условиях освещенности, показал сохранение у них генетической программы циркадианной ритмики кардиоактивности, свойственной этому виду. Однако устойчивая реализация этой программы в искусственных условиях длительного индивидуального содержания с большей вероятностью и без существенных нарушений возможна при изменениях освещенности, приближенной к естественной, и поддержании температуры в границах, оптимальных для данного вида.

От нормального функционирования циркадиантных ритмов зависит степень приспособленности организма к меняющимся условиям окружающей среды, к ее качеству и временным характеристикам. Одним из ранних проявлений физиологических и поведенческих нарушений у животных при действии неблагоприятных факторов (в частности, вредных химических

веществ) является нарушение фазовой архитектуры ритмических процессов, в том числе и циркадианного цикла кардиоактивности [11; 12]. Стабилизация типичного для данного вида циркадианного ритма кардиоактивности, как и локомоторной активности, потребления кислорода и других периодически изменяющихся физиологических функций организма, свидетельствует об устойчивой адаптации животного к среде обитания. Этот критерий может служить для оценки общего физиологического состояния организма и должен учитываться при использовании животных в качестве тест-организмов в тех или иных системах непрерывного биомониторинга качества воды.

Для реализации на практике данного критерия оценки общего физиологического состояния тест-животных СПБМКВ в ходе модернизации были оснащены системой искусственного поддержания светового режима «день–ночь». Данная система использует таймер, регулирующий процесс периодического включения и выключения люминесцентных ламп освещения аквариумов с раками, и обеспечивает стабильность освещения и смену режимов «день–ночь». Кроме того, на стойку системы СПБМКВ установлено дополнительно затеняющее покрытие, предназначенное как для защиты содержимого стойки от нежелательных механических воздействий, так и для изоляции тест-животных от внешнего освещения.

Наличие автоматической системы искусственного поддержания светового режима «день–ночь» совместно с дополнительным затеняющим покрытием дает возможность по разработанному алгоритму производить автоматический анализ стабильности циркадианного ритма кардиосистемы тест-животных. Это позволяет использовать стабильность циркадианного ритма в качестве критерия для оценки общего физиологического состояния тест-организмов и таким образом осуществлять непрерывное автоматическое тестирование их «пригодности», поскольку только здоровые особи способны демонстрировать адекватные реакции на стрессовые воздействия.

## Выводы

Разработанный инновационный проект биологического мониторинга качества воды уникален как с точки зрения использованных научно-технических решений, так и обеспечения надежной круглосуточной информацией о текущем состоянии водозаборных сооружений водопроводных станций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махнев П. П., Бекренев А. В., Бакланов В. С. и др. Система обеспечения безопасности водоснабжения на водопроводных станциях Санкт-Петербурга // Водоснабжение и сан. техника. 2006. № 9, ч. 1.
2. Пат. 2308720, РФ. МПК G 01 N 33/18, G 01 N 21/17. Способ биологического мониторинга окружающей среды (варианты) и система для его осуществления / С. В. Холодкевич и др. // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 29.
3. Холодкевич С. В. Биоэлектронный мониторинг уровня токсичности природных и сточных вод в реальном времени // Экологическая химия. 2007. № 16 (4).
4. Kholodkevich S. V., Ivanov A. V., Kurakin A. S., et al. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations // Journal of Environmental Bioindicators. 2008. V. 3. № 1.
5. Кармазинов Ф. В., Кинебас А. К., Бекренев А. В. и др. Опыт эксплуатации систем биомониторинга качества воды в Санкт-Петербурге // Водоснабжение и сан. техника. 2007. № 7, ч. 2.
6. Холодкевич С. В., Любимцев В. А., Иванов А. В. и др. Автоматическая станция аналитического и биоаналитического контроля природных и сточных вод в реальном времени / Экология и сельскохозяйственная техника: Материалы 4-й научно-практ. конф. В 3-х томах. Т. 3. Экологические аспекты производства продукции животноводства и электротехнологий. – СПб, 2005.
7. Холодкевич С. В. Современные возможности управления экологическим риском водоснабжения Санкт-Петербурга: Материалы 8-й Междунар. конф. «АКВАТЕРРА–2005». – СПб, 2005.
8. Depledge M. H. On the tidal, diurnal and seasons modulation of endogenous cardiac activity rhythms in the shore crab (*Carcinus maenas*, L) // OEBALIA, 1992. V. 18. № 5.
9. Aagaard A., Warman C. G., Depledge M. H., Naylor E. Dissociation of heart rate and locomotor activity during the expression of rhythmic behaviour in the shore crab *Carcinus maenas* // Mar. Behav. Physiol. 1995. V. 26.
10. Удалова Г. П., Холодкевич С. В., Сладкова С. В. и др. Исследование циркадианной активности раков *Pontastacus Leptodactylus* при их многомесячном содержании в протоке речной воды // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2009. Т. 45. № 3.
11. Bojsen B. H., Witthofft H., Styrishave B., Andersen O. Diurnal variation in physiology and behaviour of the noble crayfish, *Astacus astacus* (L.) and the signal crayfish *Pacifastacus leniusculus* (Dana): Specialrapport. – Denmark, Roskilde Univ., 1997.
12. Bojsen B. H., Witthofft H., Styrishave B., Andersen O. In situ studies on heart rate and locomotor activity in the noble freshwater crayfish, *Astacus astacus* (L.) in relation ti natural fluctuation in temperature and light intensity // Freshwater Biology. 1998. V. 39.

## ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ!

2 января 2012 г. исполнилось 70 лет **ЮРИЮ ВЛАДИМИРОВИЧУ КЕДРОВУ**, кандидату технических наук, старшему научному сотруднику лаборатории биологической очистки ОАО «НИИ ВОДГЕО».

В 1964 г. Ю. В. Кедров окончил МИСИ им. В. В. Куйбышева и начал свою трудовую деятельность на производстве. В НИИ ВОДГЕО Юрий Владимирович работает с 1968 г. Его исследовательская деятельность в институте связана с разработкой тонкослойных отстойников и многоярусных нефтеловушек. Результаты исследований внедрены на многих предприятиях, в том числе на Павлодарском и Ачинском нефтеперерабатывающих заводах. В 1974 г. Юрий Владимирович защитил кандидатскую диссертацию. Им опубликовано более 40 научных работ, он имеет 3 авторских свидетельства на изобретения, в составе коллектива



авторов выпущена монография «Бассейны плавательные. Водоснабжение и водоотведение».

С 1986 по 2010 г. Ю. В. Кедров был заведующим отделом научно-технической информации и патентно-лицензионной работы. На протяжении многих лет он плодотворно совмещает научную деятельность с работой в качестве ученого секретаря диссертационного совета НИИ ВОДГЕО.

Доброжелательность, внимательное отношение к людям, отзывчивость, профессионализм – все эти качества

снискали Юрию Владимировичу уважение и симпатию не только в коллективе института, но и в других организациях, с которыми он сотрудничает.

**Уважаемый Юрий Владимирович! Коллеги и редакция журнала сердечно поздравляют Вас с юбилеем и желают Вам крепкого здоровья, счастья и успехов во всем.**