

Опыт эксплуатации систем биомониторинга качества воды в Санкт-Петербурге

Проблема обеспечения экологической безопасности населения и предотвращения угроз экологического терроризма в зоне питьевых водозаборов актуальна для всех стран мира. При этом заранее не известно, какие вещества, особенно в актах преднамеренного воздействия, будут причиной угроз экологической безопасности населения. В связи с этим в настоящее время в нашей стране и за рубежом большое внимание уделяется разработке и внедрению методов и средств биологического мониторинга качества поверхностных вод в реальном времени.

В 2006 г. с целью обеспечения безопасности водоснабжения населения С.-Петербурга от случайного или намеренного (терроризм) поступления на водопроводные сооружения исходной воды, загрязненной токсичными веществами, все десять поверхностных водозаборов водопроводных станций С.-Петербурга были оснащены станциями производственного биологического мониторинга качества воды (СПБМКВ) [1]. В работе станций используется волоконно-оптический метод дистанционного измерения и анализа в реальном времени изменения сердечного ритма бентосных беспозвоночных, имеющих жесткий панцирь, например *Crustacea* (Decapoda) и *Mollusca* [2]. Работа биоаналитического блока СПБМКВ основана на анализе изменения сердечного ритма раков и пове-

денческих характеристик рыб и позволяет, в отличие от физико-химических методов, интегрально выявлять уровень токсикологической опасности воды как среды обитания гидробионтов. На основе этого метода разработана биосенсорная информационно-измерительная система, предназначенная для обеспечения технической возможности проведения биомониторинга воды источника в зоне питьевых водозаборов [3; 4].

Параллельно с внедрением информационно-измерительной системы в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» разработана и внедрена система обеспечения безопасного водоснабжения в условиях обнаружения токсичных веществ в воде водозаборных сооружений водопроводных станций [1]. Опыт эксплуатации СПБМКВ в течение года показал, что заложенные при разработке основные технические решения, регламент обслуживания и методики отбора животных работоспособны в конкретных производственных условиях и удовлетворяют предъявляемые к ним требования.

Функциональное состояние рака считается 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 мин и отсутствие аритмии [5; 6]. Опыт эксплуатации СПБМКВ показал, что отобранные животные при правильном режиме кормления и обслуживания аквариумов, по крайней мере в течение года, сохраняют нормальный уровень функционального состояния, пригодный для использования их в качестве биосенсоров.

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

При действии экстремальных факторов на организм в зависимости от примененного воздействия и его силы развивается стресс, захватывающий все органы и приводящий к стимуляции многих систем организма, направленных на повышение его защитных сил. Это обстоятельство может привести к возникновению возбужденного состояния

или даже стресса вследствие факторов, не относящихся к уровню токсичности воды.

В ходе опытной эксплуатации СПБМКВ имели место ситуации, когда в результате засорения в системе водонагревателя значительно уменьшался расход воды. На одной из водопроводных станций произошел подобный случай, что привело к повышению температуры воды в распределительном баке, которая за первые шесть минут с момента начала повышения достигла 28 °С. Это на три градуса выше порога (25 °С), при котором СПБМКВ выдает на мониторы диспетчеров красный сигнал о превышении допустимого значения температуры воды.

Для предотвращения случаев, когда значения температуры или расхода воды превышают заданные пороги, в алгоритмах обработки данных СПБМКВ заложена блокировка срабатывания аварийного сигнала токсикологической опасности. Это позволяет избежать ложного срабатывания системы. Несмотря на то что животные (два рака), находящиеся «на дежурстве», оказались в стрессовой ситуации, на мониторах в диспетчерских общий красный сигнал тревоги не загорелся. На графиках зависимости температуры и параметров изменения пульсометрии раков от времени (рис. 1, а, б) видно, что оба биосенсора адекватно отреагировали на столь значительное повышение температуры: значения частоты сердечных сокращений и стресс-индекса синхронно повысились вместе с увеличением температуры. Более того, один из раков через полчаса погиб от перегрева. Если бы блокировка отсутствовала, то СПБМКВ неизбежно выдала бы «ложный» сигнал аварийной опасности, в соответствии с которым и «Регламентом действий персонала ГУП «Водо-

канал Санкт-Петербурга» и специализированных организаций Санкт-Петербурга в условиях обнаружения токсичных веществ в воде водозаборных сооружений» должен выполняться комплекс дорогостоящих технических и организационных мероприятий, направленных на ликвидацию токсикологической опасности воды.

Другой случай опытной эксплуатации СПБМКВ демонстрирует, как «человеческий фактор» инициировал сигнал токсикологической опасности исходной воды, связанный с попаданием хлорированной водопроводной воды в аквариумы с тест-животными. Из рис. 2 видно, что «дежурные» раки почти мгновенно синхронно отреагировали на ошибочные действия персонала при промывке входного фильтра, являющейся стандартной ежедневной операцией. Перед началом процедуры промывки

механического фильтра на входе подачи воды в аквариум не был перекрыт кран входа в гидравлическую систему СПБМКВ. Кран подачи водопроводной воды после промывки фильтра остался в приоткрытом состоянии, вследствие чего хлорированная вода в течение многих часов продолжала поступать в аквариумы СПБМКВ. В результате уже через минуту на диспетчерском пульте появился сигнал токсикологической опасности воды (что обусловлено токсичностью активного хлора для гидробионтов), а сигнал, поступающий от канала с рыбами, выдал красный сигнал токсикологической опасности только через 6 часов, когда они погибли и перестали двигаться. Раки, столь оперативно выдавшие красный сигнал опасности, остались живы и через несколько дней продолжили свою токсикологическую службу.

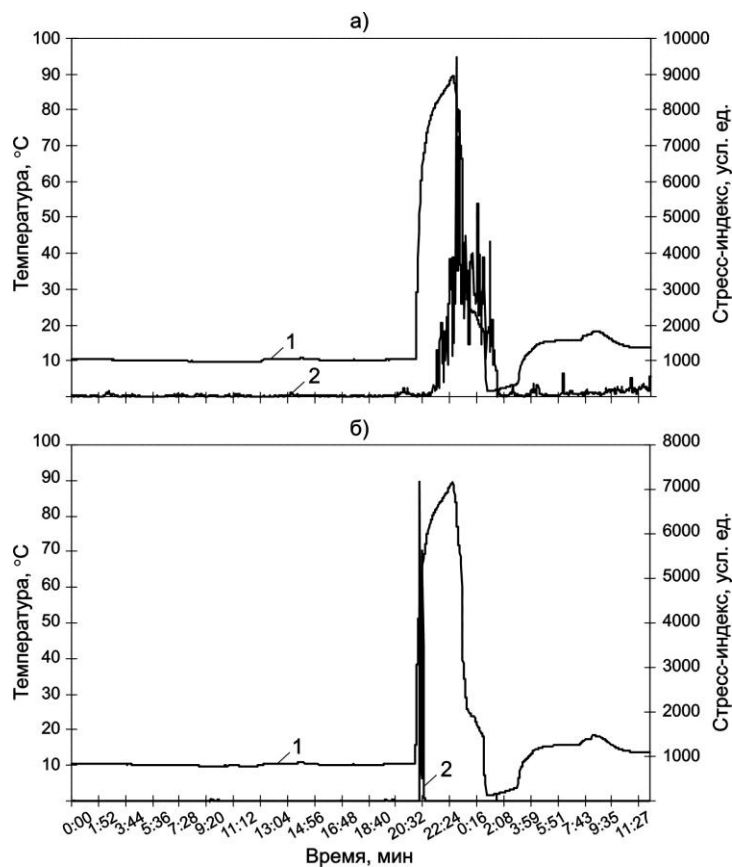


Рис. 1. Реакции раков при повышении температуры в аквариуме вследствие засоренности системы водонагревателя
а – канал 1; б – канал 2; 1 – температура; 2 – вероятность ложного срабатывания системы

Сравнительные тренды частоты сердечных сокращений раков представлены на рис. 2, а, стресс-индексов тех же раков – на рис. 2, б.

Приведенные примеры доказывают необходимость постоянного учета или полного исключения побочных факторов, которые могут вызывать стресс, но не относятся к уровню токсичности анализируемой исходной воды. Эта причина обусловила включение в состав СПБМКВ в качестве дополнительного технического устройства аналитического блока АСНЭМ-2, обеспечивающего контроль удельной электропроводности воды, мутности, оптической плотности на длине волны 254 нм, рН, концентраций Cl^- , NH_4^+ , NO_3^- -ионов, температуры, а также уровня шума и вибрации.

Опыт показал, что ввод в эксплуатацию АСНЭМ-2 резко снизил частоту ложных срабатываний сигнала тревоги. В частности, если до ее запуска сигналы тревоги за счет скачка температуры в аквариумах из-за изменения скорости протока воды происходили на каждой из станций 1–2 раза в месяц, то в настоящее время это полностью исключено, как и эффекты тревоги, вызываемые внезапным изменением уровня шума или вибрации.

Учения по отработке действий, предусмотренных «Регламентом действий персонала ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и специализированных организаций Санкт-Петербурга в условиях обнаружения токсичных веществ в воде водозаборных сооружений», проведенные в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», показали готовность персонала и других организаций к ликвидации последствий возможного загрязнения воды, поступающей на водо-

проводные очистные сооружения города, токсичными веществами.

СПБМКВ является многопараметрической, многоуровневой и состоит из нескольких блоков. Отказ в работе одного из них приводит к полной или частичной потере работоспособности всей системы. Отличительная особенность СПБМКВ – наличие биологических объектов, работа которых не всегда может адекватно восприниматься другими компонентами системы. Одной из существенных проблем, выявленных в ходе эксплуатации СПБМКВ, являются так называемые ложные срабатывания, под которыми понимается резкое изменение физиологического состояния биоиндикаторов, не связанное с опасным изменением качества воды, приведшим к выработке сигнала тревоги.

Оценка физиологического состояния животных проводится на основе измерения и анализа нескольких показателей изменения сердечного ритма – биомаркеров. Для каждого из биомарке-

ров, измеряемых СПБМКВ, устанавливается свой пороговый уровень, превышение которого вызывает выработку сигнала тревоги. При этом установка высокого порогового уровня приводит к снижению чувствительности системы, 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 установлен низкий уровень, то сигнал тревоги будет срабатывать из-за любого незначительного возбуждения биосенсора, не связанного с опасным изменением качества воды. Выбор пороговых значений биомаркеров и алгоритмов обработки информации должен обеспечивать, с одной стороны, достаточную чувствительность системы для выявления опасных загрязнений, а с другой, – минимум ложных срабатываний. Опыт эксплуатации станций и накопленный банк данных позволили обеспечить

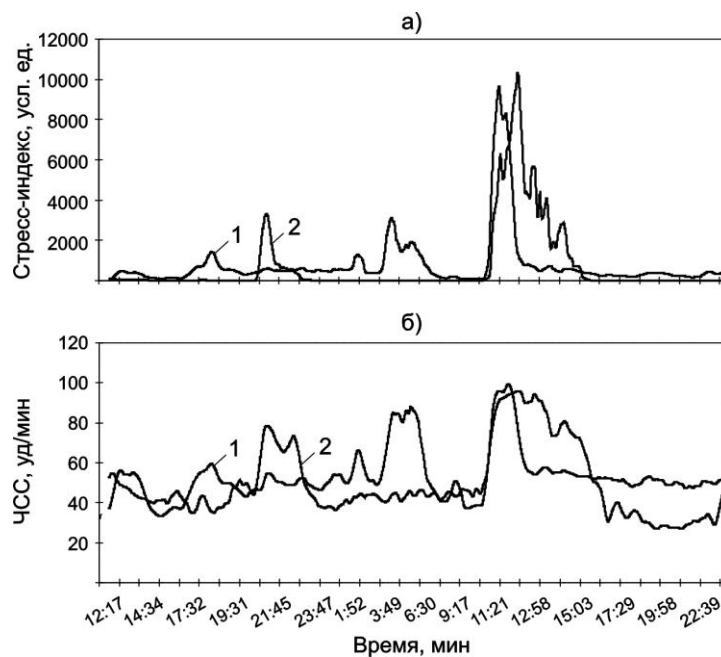


Рис. 2. Пример синхронной экспресс-реакции раков на случайную подачу (5 июня 2006 г. в 10 ч 50 мин) хлорированной воды в аквариумную систему СПБМКВ при промывке керамзитового фильтра на входе в установку
а – стресс-индекс; б – ЧСС – частота сердечных сокращений; 1 – канал 1; 2 – канал 2

решение этой проблемы.

Анализ работы кардиосистемы каждого из двух биосенсоров, находящихся на дежурстве СПБМКВ, производится независимо. Для каждого биомаркера (Б), характеризующего физиологическое 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 оба биосенсора переходят в стрессовое состояние в течение достаточно малого периода времени. Время срабатывания T_{cp} 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 и скорость изменения частоты сердечных сокращений животного (dHR), которая вычисляется по следующему правилу:

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

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 . На основании анализа данных, полученных за год, для каждого из основных биомаркеров (индекс напряжения и скорость нарастания частоты сердечных сокращений) выбраны, как наиболее характерные, по три значения уровня срабатывания. Для индекса напряжения выбраны значения 1000, 5000 и 10000 c^{-3} , а для скорости нарастания

частоты сердечных сокращений – 50, 75 и 100 %. Кроме того, рассчитана величина скорости нарастания частоты сердечных сокращений для трех значений параметра T_3 : 2, 10 и 30 мин. Учитывая результаты выполненных вычислений, можно рекомендовать значения параметров на СПБМКВ, руководствуясь следующим алгоритмом:

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

определяются биомаркеры и значения соответствующих параметров (L_B , T_{cp} для стресс-индекса и L_B , T_{cp} , T_3 для скорости изменения частоты сердечных сокращений), которые соответствуют требуемому числу ложных срабатываний в год в предположении, что $T_{cp} < T_{cp, макс}$;

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

Кроме того, одним из возможных способов уменьшения вероятности ложных срабатываний является увеличение количества биосенсоров, анализ физиологического состояния которых учитывается при оценке качества воды. С учетом выполненных расчетов специалистами НИЦЭБ РАН разработана новая семиканальная конструкция фотоплетизмографа, позволяющая одновременно наблюдать за функциональным состоянием семи животных [7; 8]. Внедрение такой измерительной системы позво-

лит в будущем существенно снизить вероятность ложных срабатываний системы СПБМКВ.

Выводы

Установленные на водозаборных сооружениях водопроводных станций С.-Петербурга системы биомониторинга качества воды водоисточника обеспечили надежную защиту водоснабжения города от возможного загрязнения водопроводной воды токсичными веществами. Опыт эксплуатации СПБМКВ в течение года показал, что заложенные при разработке основные технические решения, регламент обслуживания, методики отбора животных работоспособны в производственных условиях и удовлетворяют предъявляемые к ним требования.

СПБМКВ относится к наукоемким технологиям и требует квалифицированного обслуживания специалистами нескольких специальностей: инженеров-химиков, инженеров-электронщиков, программистов, биологов и химиков-аналитиков. Определены направления совершенствования технических устройств, которые могут значительно снизить вероятность ложных срабатываний системы СПБМКВ и повысить надежность защиты водоснабжения города. Использование семиканального фотоплетизмографа, с помощью которого одновременно можно наблюдать за функциональным состоянием семи тест-животных, практически исключит возможность ложного срабатывания системы биомониторинга качества воды водоисточника за счет индивидуальных особенностей проявления активности тест-животных в течение суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система обеспечения безопасности водоснабжения на водопроводных станциях Санкт-

- Петербурга / П. П. Махнев, А. В. Бекренев, В. С. Бакланов и др. // Водоснабжение и сан. техника. 2006. № 9. Ч. 1.
2. Пат. на полезную модель № 52190, Датчик физиологической активности беспозвоночных с жестким наружным покровом и система биологического мониторинга окружающей среды на его основе / С. В. Холодкевич, Л. Г. Говердовская, А. В. Ивановидр.
 3. Пат. на полезную модель № 61431, Датчик физиологической активности беспозвоночных с жестким наружным покровом и система биологического мониторинга окружающей среды на его основе / С. В. Холодкевич, В. К. Донченко, А. В. Ивановидр.
 4. Холодкевич С. В. Экологический мониторинг качества природных и сточных вод в реальном времени // Актуальные проблемы сохранения и восстановления биоресурсов морей и внутренних водоемов России: Сб. докл. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2006.
 5. Автоматическая станция аналитического и биоаналитического контроля природных и сточных вод в реальном времени / С. В. Холодкевич, В. А. Любимцев, А. В. Иванов и др. // Экология и сельскохозяйственная техника: Тез. докл. 4-й научно-практической конференции в 3-х т. Т. 3. Экологические аспекты производства продукции животноводства и электро-технологий. – СПб, 2005.
 6. Холодкевич С. В. Современные возможности управления экологическим риском водоснабжения Санкт-Петербурга // Материалы 8-й Международной конференции «АКВАТЕРРА-2005». – СПб, 2005.
 7. Холодкевич С. В. Волоконно-оптические дистанционные биосенсорные системы непрерывного биологического мониторинга качества поверхностных вод и донных отложений в реальном времени // Нефть и газ арктического шельфа – 2006: Тез. докл. Международ. конф. – Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2006.
 8. Система раннего биологического оповещения об изменении качества воды на основе биоиндикации функционального состояния моллюсков по их кардиоактивности в реальном времени / С. В. Холодкевич, А. С. Куракин, Ю. В. Кучерявых и др. // Там же.

Ф. В. КАРМАЗИНОВ,
генеральный директор;
А. К. КИНЕБАС, А. В. БЕКРЕНЕВ,
Э. К. СУЛЕЙМАНОВА
(ГУП «Водоканал Санкт-
Петербурга»);
С. В. ХОЛОДКЕВИЧ, А. В. ИВАНОВ
(Научно-исследовательский центр
экологической безопасности РАН,
Санкт-Петербург)