

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОЛЛЮСКОВ, ИНСТАЛЛИРОВАННЫХ В СИСТЕМЕ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ТОКСИЧНОСТИ ВОДЫ «SYMBIO», К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

## Сообщение 1. Ионы тяжелых и цветных металлов в интервале концентраций 0–20 ПДК для водоемов культурно-бытового назначения

© 2011 г. А.Н. Попов, А.С. Фоминых, О.С. Ушакова, В.Ф. Мухутдинов, Н.А.

Сечкова

*ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования  
и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург*

**Ключевые слова:** токсичность, двустворчатые моллюски, поведенческая реакция моллюска, биоиндикация, безопасность водопользования, мониторинг питьевой воды, качество воды.

В сообщении представлены результаты экспериментов по оценке чувствительности моллюсков, инсталлированных в систему оперативного мониторинга токсичности воды «Symbio», по отношению к ионам меди (2+), цинка (2+), кадмия (2+), свинца (2+) и хрома (6+).

### Введение

Перспективы развития биомониторинга как средства экологической безопасности лежат в области автоматической непрерывной (оперативной) биоиндикации с использованием систем «раннего оповещения» (early warning systems).

Эксплуатация системы раннего оповещения для выявления опасных ситуаций в водоснабжении позволяет:

- своевременно выявить факт поступления токсичных веществ в систему водоподготовки;
- в кратчайшие сроки отреагировать на критическую ситуацию;
- избежать трагических последствий поступления токсичных веществ в систему водоснабжения.

Одной из множества существующих разработок в области обнаружения отравляющих веществ в воде является биосигнализатор с использованием двустворчатых моллюсков.

Основное преимущество биосигнализации, биологическим материалом в которой служат моллюски, – технологичность и практичность процесса мониторинга качества воды. Уступая рыбам по чувствительности, они выигрывают по эксплуатационным затратам и возможности внедрения на любом водном объекте, поскольку для биосигнализатора используются моллюски, взятые из природных водоемов, а не выращенные в специальных рыбных хозяйствах [1].

Система биосигнализации «Symbio» достаточно широко используется в странах Европейского союза для контроля качества питьевой воды и воды, используемой пищевой промышленностью при производстве напитков и продуктов. Относительно недавно началось внедрение данной установки в системы водоснабжения крупных городов России (Екатеринбург, Владивосток).

За основу системы раннего оповещения «Symbio» взят поведенческий акт закрытия створок раковин (изолирующий рефлекс), обеспечивающий моллюскам эффективную защиту от неблагоприятных воздействий окружающей среды. Если при появлении токсиканта в воде как минимум 5 из использованных в системе 8 моллюсков закрывают створки ниже 5 % границы, срабатывает система оповещения «Symbio»: световая сигнализация и звуковая сирена.

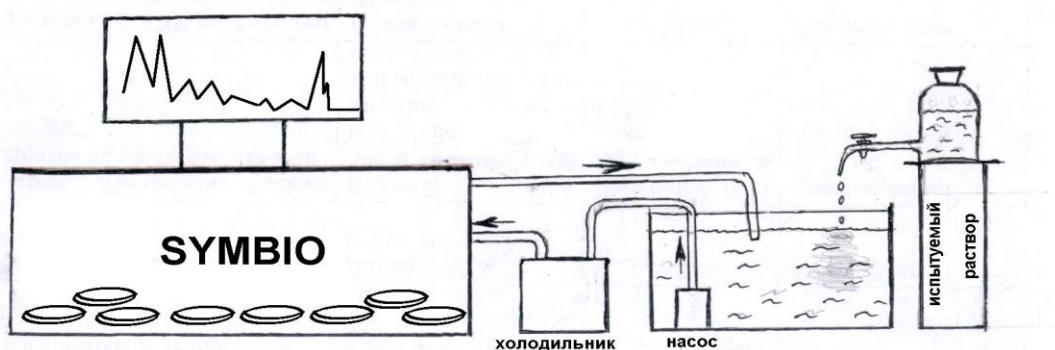
В 80-х годах прошлого столетия было проведено множество исследований физиологических функций двустворчатых моллюсков, в том числе изменения их фильтрационной активности при воздействии различных поллютантов [2]. Исследования фокусировались на таких параметрах, как изменение фильтрационной активности, изменение ритма движения створок, а также их полное закрытие [3–5]. Изолирующий рефлекс рассматривается как стрессовый ответ моллюска на появление в воде токсичных веществ [6]. Результаты работ [2–6] продемонстрировали неоднозначность реакции двустворчатых моллюсков на воздействие токсикантов в зависимости от их типа и концентрации. Были выявлены также межвидовые и внутривидовые различия чувствительности моллюсков к токсикантам [3, 7, 8].

Цель представленной работы: оценить область возможного использования ответной поведенческой реакции моллюсков в системе «Symbio» по отношению к различным поллютантам и оценка влияния возрастающих концентраций поллютантов на двигательную активность моллюсков.

В данном сообщении представлены результаты экспериментов по оценке чувствительности моллюсков, инсталлированных в систему, к воздействию ионов тяжелых и цветных металлов Cu (2+), Cr (4+), Zn (2+), Cd (2+) и Pb (2+) в интервале концентраций от 0 до 20 ПДК для водоемов культурно-бытового назначения и определения влияния указанных ингредиентов в возрастающих концентрациях на двигательную активность моллюсков.

## Методы и материалы

Схема экспериментальной установки «Symbio» представлена на рис. 1. Эксперименты по определению чувствительности моллюсков, инсталлированных в систему «Symbio», к воздействию тяжелых металлов проводились в двух повторностях. Введение загрязняющих веществ в воду проводилось через бюретку с постоянной скоростью подачи испытуемого раствора (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки «Symbio».

Биологическим материалом для инсталляции в систему «Symbio» использовалась перловица обыкновенная (живописцев) *Unio pictorum* (рис. 2) – наиболее массовый вид крупных двухстворчатых моллюсков для водоемов Среднего Урала.



**Рис. 2.** Двустворчатый моллюск *U. pictorum*, используемый в системе биомониторинга «Symbio».

*U. pictorum*, относящаяся к классу Двустворчатых (Bivalvia), надотряду Жаберных (Autobranchia), отряду Унионид (Unionida). Перловица – пресноводный моллюск, относительно крупных размеров (рис. 2), ведет преимущественно роющий образ жизни. Данный моллюск относится к группе биофильтраторов, питающихся взвешенными в воде частицами органических веществ и мелким планктоном, и играет существенную роль в биологической очистке вод [9].

Температура воды в лотке (объем 100 л) с моллюсками поддерживалась около 12 °С. Перед началом эксперимента моллюски стимулировались на более активную фильтрацию воды путем введения в лоток корма, представлявшего собой раствор дрожжей или нежирного кефира. Перед подачей токсиканта исследовалась нормальная активность моллюсков. Эксперимент начинался только в том случае, когда средняя величина открытия створок моллюсков превышала значение 55 %.

Для испытания выбраны следующие вещества:  $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Pb}(\text{HCO}_3)_2$ . Отбор проб воды производился многократно в ходе развития ответной реакции моллюсков на химическое воздействие.

После эксперимента с одним веществом в системе «Symbio» заменялась вся вода и 8 моллюсков, задействованных в эксперименте.

## Результаты исследований

### *Медь (2+)*

Средняя степень открытия створок моллюсков в начале эксперимента с медью равнялась 64 %. Продолжительность эксперимента – 26 часов.

Результаты эксперимента по определению чувствительности моллюсков, инсталлированных в системе «Symbio», к воздействию меди приведены на рис. 3.

**Рис. 3.** Реакция моллюска на возрастание концентрации меди (2+) в среде: *a* – средний процент открытия створок моллюсков в зависимости от концентрации меди (2+) в воде, *б* – временная диаграмма степени открытия моллюсков при увеличении концентрации меди (2+).

Для гидробионтов медь (2+) является высокотоксичным элементом, что хорошо демонстрируется поведением моллюсков в системе «Symbio». Эффективная концентрация ингредиента в лотке, при которой отмечается снижение степени открывания створок моллюсков, составила 0,08–0,10 мг/л. При повышении концентрации меди (2+) в воде до 0,5 мг/л наблюдалось резкое снижение степени открытия створок (с 68 до 25 %). При последующем увеличении ее содержания до 3 мг/л наблюдалось незначительное снижение степени среднего открытия (рис. 3а). При достижении концентрации меди (2+) в воде 18 мг/л (18 ПДК) степень открытия створок составляла от 0 до 25% (со средней степенью открытия створок – 11 %). При этом моллюски не подавали признаков фильтрационной активности, что выразилось в отсутствии двигательной активности створок. В последующие сутки картина поведения моллюсков не изменялась (рис. 3б).

Несмотря на то, что моллюски своевременно отреагировали на присутствие в воде меди в концентрации менее ПДК (1 мг/л) [10], активации системы оповещения «Symbio» не произошло, поскольку сигнал «моллюск закрыт» запрограммирован на срабатывание при среднем показателе открытия створок ниже 5 %.

### *Хром (6+)*

Для проведения эксперимента с хромом (6+) была выбрана соль  $K_2Cr_2O_7$ . Средняя степень открытия створок моллюсков в начале эксперимента равнялась 90 %. Продолжительность эксперимента – 118 часов.

На протяжении первых 50 часов эксперимента, при экспонировании моллюсков в воде с содержанием хрома (6+) менее 1,0 мг/л, состояние животных интерпретировалось как нормальное. Средняя степень открытия створок моллюсков существенно не изменялась и оставалась на уровне 88 %. При дальнейшем увеличении концентрации токсиканта (более 1,0 мг/л) наблюдается снижение величины средней степени открытия створок до 60 % (рис. 4а).

**Рис. 4.** Реакция моллюска на возрастание концентрации хрома (6+) в среде: а – средний процент открытия створок моллюсков в зависимости от концентрации хрома (6+) в воде; б – временная диаграмма степени открытия моллюсков при увеличении концентраций хрома (6+).

При достижении эффективной концентрации хрома (6+), равной 0,1 мг/л моллюски существенно изменяют частоту и амплитуду колебаний створок раковин. Наблюдается скачкообразное смыкание створок с последующим увеличением периода спада двигательной активности до 5 часов (рис. 4б).

Опираясь на опыт более ранних работ [3, 12], можно интерпретировать изменения в частоте и амплитуде смыкания створок как стрессовый ответ на присутствие токсиканта. Концентрация хрома (6+), приводящая к заметной ответной реакции моллюсков, составила 1,0 мг/л (20 ПДК). Пороговая концентрация, приводящая к полному закрыванию *U. pictorum* и срабатыванию системы биомониторинга «Symbio», в данном случае не достигнута.

#### *Кадмий (2+)*

Средняя степень открытия створок моллюсков в начале эксперимента с кадмием составляла 95 %. Продолжительность эксперимента – 142 часа.

При экспонировании моллюсков в воде с концентрациями кадмия (2+) менее 20 ПДК (0,02 мг/л) средняя величина степени открывания створок существенно не изменялась. Моллюски демонстрировали фильтрационную активность при высокой степени открытия (средняя величина открытия 98–93 %). При повышении содержания кадмия до 20 ПДК отмечалось незначительное (до 78 %) снижение величины среднего открывания створок (рис. 5а).

**Рис. 5.** Реакция моллюска на возрастание концентрации кадмия (2+) в среде: а – средний процент открытия створок моллюсков в зависимости от концентрации кадмия (2+) в воде, б – временная диаграмма степени открытия моллюсков при увеличении концентраций кадмия (2+).

В поведении моллюсков отмечается резкое увеличение амплитуды колебания створок раковин и продолжительные периоды спада двигательной активности (4–8 часов у 7 моллюсков) (рис. 5б). В конце эксперимента концентрация кадмия (2+) в воде составила 0,015 мг/л, при средней степени открытия створок моллюсков 78 %.

#### *Цинк (2+)*

Средняя степень открытия створок моллюсков в начале эксперимента с цинком составляла 90 %. Продолжительность эксперимента – 24 часа.

При концентрации цинка (2+) 5 мг/л в воде наблюдалось изменение фильтрационной активности моллюсков. Эффективная концентрация цинка (2+) в эксперименте, при которой отмечается снижение средней степени открытия створок моллюсков, составила 12 мг/л (рис. 6а).

**Рис 6.** Реакция моллюска на возрастание концентрации цинка (2+) в среде: а – средний процент открытия створок моллюсков в зависимости от концентрации цинка (2+) в воде; б – временная диаграмма степени открытия моллюсков при увеличении концентрации цинка (2+).

При концентрации цинка (2+) 15 мг/л отмечается резкое снижение средней степени открытия створок моллюсков (с 80 до 45 %). Однако в дальнейшем данная тенденция не сохраняется. У моллюсков резко возросла амплитуда колебания (до 90 %)

и снижается частота открывания створок (1 раз за 2–8 ч) (рис. 6б). Спустя сутки среднее значение степени открывания створок колебалось в интервале 45–55 % .

### *Свинец (2+)*

Для проведения эксперимента со свинцом (2+) была выбрана соль  $Pb(HCO_3)_2$ . Средняя степень открытия створок моллюсков в начале эксперимента была равна 70%. Продолжительность эксперимента – 4 часа.

При экспонировании моллюсков в воде с содержанием свинца(2+) менее 8 мг/л не отмечено ответной стрессовой реакции в их поведении. При достижении данной концентрации наблюдается незначительное изменение в поведении животных, что проявилось в увеличении частоты неполного смыкания створок раковин (рис. 7б). Средняя величина степени открывания створок к концу эксперимента не изменилась, оставшись в пределах 65 % (рис. 7а). Конечная концентрация свинца(2+) в растворе достигла 12,75 мг/л.

**Рис. 7.** Реакция моллюска на возрастание концентрации свинца (2+) в среде: а – средний процент открытия створок моллюсков в зависимости от концентрации свинца(2+) в воде; б – временная диаграмма степени открытия моллюсков при увеличении концентрации свинца(2+).

Незначительное увеличение частоты смыкания створок не рассматривается как стрессовый ответ на присутствие токсиканта. При данной концентрации моллюски демонстрировали фильтрационную активность при высокой степени открытия створок раковин (средняя величина открытия варьировала 55–65 %), что является показателем естественной активности животных.

Проведенный опыт продемонстрировал отсутствие поведенческих реакций, свидетельствующих о стрессовой активности моллюсков при концентрациях свинца (2+) в воде менее 20 ПДК.

### **Выводы**

В проведенных экспериментах при обозначенных выше максимальных концентрациях исследуемых токсикантов изолирующий рефлекс, рассматриваемый как стрессовый ответ моллюска на появление в воде токсичных веществ, не наблюдался.



Ответной поведенческой реакцией моллюсков на воздействие токсикантов стало резкое увеличение амплитуды колебания створок раковин и продолжительные периоды спада двигательной активности (4–8 часов). Подобный стрессовый ответ необходимо учитывать при анализе данных автоматической системы биосигнализации «Symbio» для более корректной интерпретации результатов воздействия исследуемых токсикантов на поведение двухстворчатых моллюсков.

По всей видимости, концентрации испытуемых веществ, которые способны вызвать изолирующий рефлекс и привести к срабатыванию системы «Symbio», должны превышать их максимальное содержание, задаваемое в экспериментах, результаты которых приведены выше.

Для подтверждения данного предположения и адекватной оценки возможностей применения системы «Symbio» в биосигнализации о воздействии на водный объект соединений исследуемых ингредиентов необходимо в дальнейшем провести эксперименты с растворами, в которых концентрации металлов будут выше.

### **Благодарности**

Авторы выражают свою искреннюю благодарность Оболдиной Г.А. за ценные советы и замечания при обсуждении материала статьи, а также Павлюк Е.Л. за помощь в сборе материала.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Павлюк Т.Е., Оболдина Г.А. Опыт использования автоматизированной системы биосигнализации «Symbio» для организации безопасного водоснабжения // Водное хозяйство России. 2009. № 4. С. 61–76.
2. Bayne B.L., Brown D.A., Burns K., Dixon D.R., Ivanovici A., Livingstone D.R., Lowe D.M., Moore M.N., Stebbing A.R.D., Widdows J. The effects of stress and pollution on marine animals. Praeger Publishers, New-York, 1985. 384 p.
3. Kramer K.J.M., Jenner H., De Zwart D. The valve movement response of mussels: a tool in biological monitoring // Hydrobiologia. 1989. № 188/189. P. 433–443.
4. Redpath K.J., Davenport J. The effect of copper, zinc and cadmium on the pumping rate of *Mytilus edulis* L. // Aquatic Toxicology. 1988. № 13. P. 217–225.
5. Salanki J., V-Balogh K. Physiological background for using freshwater mussels in monitoring copper and lead pollution // Hydrobiologia 1989. 188/189. P. 445–454.

6. Селье Г. На уровне целого организма. М.: Наука, 1972. 122 с.
7. Davenport J., Manley A. The detection of heightened sea-water copper concentrations by the mussel: *Mytilus edulis* // J Mar Biol Assess UK. 1978. 58 P. 843–850.
8. Akberali HB, Black JE (1981) Behavioral responses of the bivalve *Scrobicularia plana* (DA COSTA) subjected to short-term copper (Cu II) concentrations // Mar Environ Res – 1981. No. 4. P. 97–107.
9. Шарова, И.Х. Зоология беспозвоночных. М.: Владос, 1999. 592 с.
10. СанПиН 2.1.4.1074-01 (с изменениями). Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.
11. Небел Б. Наука об окружающей среде. М.: Мир, 1993. 420 с.
12. Mouabad A., Fdil M.A., Maarouf A., Pihan J.C. (2001). Pumping behaviour and filtration rate of the freshwater mussel *Potomida littoralis* as a tool for rapid detection of water contamination // Aquatic Ecology. 2001. No. 35. P. 51–60.

#### **Сведения об авторах:**

Попов Александр Николаевич, д. т. н., профессор, заведующий отделом восстановления рек и водоемов, ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГУП РосНИИВХ), 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23, e-mail: pan1944@rambler.ru

Фоминых Алексей Сергеевич, научный сотрудник, сектор гидробиологических исследований, ФГУП РосНИИВХ, г. Екатеринбург, e-mail: Fominich@mail.ru

Ушакова Ольга Сергеевна, магистр биологии, инженер 2-й категории, сектор гидробиологических исследований, ФГУП РосНИИВХ, г. Екатеринбург, e-mail: darilindan@gmail.com

Мухутдинов Валерий Фаметдинович, главный специалист, сектор гидробиологических исследований, ФГУП РосНИИВХ, г. Екатеринбург.

Сечкова Наталья Александровна, ведущий инженер, отдел восстановления рек и водоемов, ФГУП РосНИИВХ, г. Екатеринбург