

УДК 591.5:594.3

А. П. Стадниченко

**ВЛИЯНИЕ СЕРНОКИСЛОГО ЖЕЛЕЗА НА БЫСТРЫЕ  
ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ  
КАТУШКИ РОГОВОЙ (MOLLUSKA: GASTROPODA:  
PULMONATA)**

Исследовано влияние сернокислого железа  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  на быстрые (48 ч) поведенческие и физиологические реакции катушки роговой *Planorbarius corneus* (L.). Установлены сроки проявления реакций избегания, ослизнения тела, развития разлитого отека, потери животными тактильной чувствительности и летального исхода.

**Ключевые слова:** *Planorbarius corneus*, сернокислое железо, отравление, поведенческие и физиологические реакции.

В настоящее время одной из приоритетных групп загрязнителей (по объему поступления) являются тяжелые металлы — долго сохраняющиеся в водных экосистемах биологически активные агенты, характеризующиеся высокой токсичностью в относительно небольших концентрациях [3, 5, 12, 14, 17]. К их числу относится и железо — Fe (II) и Fe (III). В гидробиоценозах мигрирует преимущественно Fe (II), поскольку Fe (III) при отсутствии комплексообразующих веществ не может в заметных количествах находиться в воде в растворенном состоянии [5]. В поверхностных водах Украины содержание железа находится в пределах 0,1—1,0 мг/дм<sup>3</sup>, иногда немного больше [5]. Однако в местах поступления в природные водоемы недостаточно очищенных или неочищенных сбросов предприятий металлургической, металлообрабатывающей, лакокрасочной и текстильной промышленности, а также шахтно-рудничных производств содержание железа может достигать 400 мг/дм<sup>3</sup> [4]. Предельно допустимая концентрация (ПДК) Fe (II) для водоемов хозяйственно-питьевого водоснабжения составляет 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, рыбохозяйственного назначения — 0,05 мг/дм<sup>3</sup> [10]. Имеющиеся в литературе сведения о его влиянии на гидробионтов крайне скудны. Известно, что соли железа являются агентами локального воздействия, оказывающими двойное влияние [7]. Во-первых, ионы Fe (II) образуют с гидроксил-ионами гидроксид, которая плохо растворяется в воде и в виде плотного налета оседает на поверхности кладок моллюсков, вызывая гибель эмбрионов от асфиксии. Во-вторых, ионы железа оказывают на моллюсков специфическое токсическое воздействие, однако не указывается, в чем оно состоит. Обычными на-

© А. П. Стадниченко, 2014

рушениями у легочных моллюсков (*Lymnaea*) при таких отравлениях являются деформация раковины и изменение окраски тела, а у морских (*Mytilus*) — нарушение нерестового периода [14]. Учитывая все усиливающееся ухудшение качества поверхностных вод Украины в связи их загрязнением промышленными стоками [9], необходимо исследовать жизнедеятельность гидробионтов, находящихся в неблагоприятных условиях среды.

Цель работы — определить быстрые поведенческие и физиологические реакции катушки роговой при воздействии растворов сернокислого железа с концентрацией, значительно превышающей рыбохозяйственную ПДК.

**Материал и методика исследований.** Исследования проведены на 936 экз. катушки роговой *Planorbarius corneus* (L.), собранных вручную в июне — августе 2013 г. в р. Тетерев (с. Заречаны, Житомирская обл.). Животные были акклимированы в течение 14 сут [15] в аквариумах объемом 100 дм<sup>3</sup>, заполненных отстоянной водопроводной водой, плотность посадки составила 3 экз/дм<sup>3</sup>, температура — 20—22°C, рН 7,2—7,7, содержание О<sub>2</sub> — 8,5—8,9 мг/дм<sup>3</sup>. Ежедневно заменяли треть объема воды. Животных кормили мацерированными в речной воде листьями салата, тонкими пластинками моркови и белокочанной капусты.

В эксперименте [1] использовали сернокислое железо FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O в концентрации 5,5, 7,5 и 9,5 мг/дм<sup>3</sup> (в пересчете на ионы Fe (II) — 1,1, 1,5 и 1,9 мг/дм<sup>3</sup>). Экспозиция составила 48 ч. Через 24 ч полностью обновляли токсическую среду. Результаты регистрировали через 10 и 30 мин, 1, 3, 6, 12, 24 и 48 ч. Опыты проводили в трехкратной повторности. Контролем служили особи, содержащиеся в воде без добавления сернокислого железа.

### Результаты исследований и их обсуждение

У моллюсков в токсической среде первые признаки отравления, проявившиеся в возрастании двигательной активности, отмечены уже через 10 мин после начала эксперимента. Сначала в течение 4—7 мин они совершали беспорядочные разнонаправленные перемещения преимущественно по дну аквариумов (реакция «беспокойства»), а затем целенаправленно устремлялись к поверхности воды и располагались на стенках непосредственно над ней, то есть, за пределами токсической среды (реакция «избегания»). Количество животных, проявлявших такую форму защитного поведения, было прямо пропорционально концентрации токсиканта и продолжительности его воздействия (табл. 1).

Избегание токсической среды — одна из наиболее быстрых поведенческих защитных реакций, характерных для моллюсков. Она обусловлена наличием у них нервной связи между органами восприятия химических раздражений — осфрадиями и мускулатурой, ответственной за перемещение в пространстве. Следует отметить, что реакция наблюдалась не у всех подопытных животных: так, при 5,5, 7,5 и 9,5 мг/дм<sup>3</sup> над поверхностью воды их поднялось соответственно лишь 12,7%, 26,7 и 49,6%. В дальнейшем (через 1 ч) реакция избегания угнеталась, а потом и полностью исчезала. Ее последние проявления у единичных особей зарегистрированы через 3 ч после начала эксперимента.

**1. Количество особей *P. corneus* (%), проявивших реакцию «избегания» под воздействием серноокислого железа**

| Концентрация токсиканта,<br>мг/дм <sup>3</sup> | Экспозиция |        |
|--|------------|--------|
|  | 10 мин     | 30 мин |
| 5,5  | 4,4        | 8,3    |
| 7,6  | 8,5        | 18,2   |
| 9,5  | 14,7       | 34,9   |

Серноокисное железо как токсикант локального действия [7] оказывает на эпителиальные покровы катушки «прижигающее» воздействие, обусловленное частичным коагулированием обволакивающей их слизи с образованием альбуминатов. При этом сначала происходит помутнение слизистого слоя, затем — образование небольших, но многочисленных комочков молочно-белого цвета. Позже из них формируются короткие нити, впоследствии преобразующиеся в короткие и широкие тяжи. Некоторая часть этих образований отделяется от кожных покровов моллюска, зависает в воде, а затем медленно оседает на дно. Этот процесс сопровождается оголением кожного покрова, увеличением объема и последующим сморщиванием его клеток, затем их слущиванием и некротическим распадом. На пораженных участках покровов появляются изъязвления. В тяжелых случаях повреждаются не только кожные покровы, но и респираторный эпителий, выстилающий полость легких, что особенно опасно для этих животных. Последнее нередко становится причиной образования кровоподтеков разного размера и более или менее обильных подкожных кровоизлияний, чреватых критическими для катушки кровопотерями. Не отслоившиеся участки кожного и дыхательного эпителия приобретают разной интенсивности бурю окраску в связи с тем, что на них оседает гидроокись железа. Толщина ее слоя возрастает с увеличением концентрации и длительности эксперимента.

Обволакивание слизью поверхности тела и полости легкого катушки является результатом активизации клеток железистого эпителия, вызванной воздействием токсиканта. Умеренное ослизнение тела моллюска можно расценивать как защитно-приспособительную реакцию, поскольку утолщенный (но только до определенной степени) слой слизи в некоторой мере затрудняет доступ ионов железа к тканям. Однако очень толстый слой слизи представляет угрозу для моллюсков, поскольку способствует развитию аноксии — *P. corneus*, как и другие легочные моллюски, половину необходимого кислорода получают через легкое, а половину — через кожу [11]. Первые случаи возрастания слизиотделения у катушки были зарегистрированы через 1 ч в растворах 7,5 и 9,5 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 2).

Интенсивность слизиотделения и количество особей, у которых оно наблюдается, возрастают с увеличением экспозиции. Однако этот процесс отмечен не у всех подопытных катушек: к концу опыта при 5,5 мг/дм<sup>3</sup> — у 37,4%, при 7,5 — у 50,0%, а при 9,5 мг/дм<sup>3</sup> — у 76,0%.

Важным симптомом отравления *P. corneus* серноокислым железом является обводнение тканей, прежде всего головы и ноги. Сначала оно проявляется

**2. Ослизиение тела *P. corneus* (% особей) при воздействии сернокислого железа**

| Концентрация токсиканта, мг/дм <sup>3</sup> | Экспозиция, ч |      |      |      |      |
|---|---------------|------|------|------|------|
|   | 1             | 3    | 12   | 24   | 48   |
| 5,5   | 0,0           | 6,2  | 8,1  | 10,8 | 12,3 |
| 7,6   | 1,0           | 10,1 | 11,3 | 13,0 | 14,6 |
| 9,5   | 2,0           | 12,9 | 15,5 | 21,1 | 24,5 |

ся в образовании очагов слабо выраженной пастозности, характеризующейся размягчением тканей и незначительным осветлением расположенных над ними кожных покровов. В дальнейшем пастозность усиливается, охватывая всю поверхность пораженных частей тела и переходит в ярко выраженный разлитой отек. При концентрации сернокислого железа 7,5 и 9,5 мг/дм<sup>3</sup> первые случаи пастозности отмечены через 1 ч после начала опыта, а через 3 ч выраженный отек головы и ноги обнаруживался при 7,5 мг/дм<sup>3</sup> у 16% особей, а при 9,5 мг/дм<sup>3</sup> — у 22%. При 5,5 мг/дм<sup>3</sup> единичные отечные моллюски появлялись через 12 ч, а через 24 и 48 ч их доля составляла соответственно 4 и 6% общего количества.

Обводнение тканей гидробионтов при отравлении обычно связывают с обогащением водой цитоплазмы их клеток [8] при повышении содержания углекислоты в организме [13]. Набухшие части тела катушек резко увеличиваются в объеме в 1,5—2,5 раза и, как правило, не помещаются в полости раковины и выпячиваются наружу (реакция выпадения). Роль обводнения тканей в ходе патологического процесса, вызванного отравлением, неоднозначна. С одной стороны, возрастание массы тела вследствие умеренного набухания (до реакции выпадения) сопровождается «разбавлением» находящихся в организме, токсикантов и может рассматриваться как защитный процесс, способствующий в определенной степени ослаблению повреждающего воздействия последних. С другой стороны, появление разлитого отека головы и ноги и, как результат, реакция выпадения могут быть следствием развития у моллюска адаптивно-компенсаторного процесса, состоящего в частичном (а иногда и полном) переключении аэробного расщепления углеводов на гликолиз. Известно [2, 6], что при несостоятельности аэробного расщепления это позволяет отравленным моллюскам использовать альтернативный путь получения энергии, необходимой для поддержания их жизнедеятельности, хотя и менее эффективный. Как известно [16], при анаэробном расщеплении углеводов субстрат расходуется примерно в десять раз быстрее, поэтому связанное с реакцией выпадения обездвиживание *P. corneus*, «переключивших» аэробный обмен на гликолиз, можно расценивать как защитное приспособление, направленное на экономное расходование энергетических ресурсов. При этом не стоит забывать, что реакция выпадения свидетельствует о крайней стадии патологического процесса, при которой восстановление невозможно.

У *P. corneus* с выраженной реакцией выпадения к комплексу симптомов отравления сернокислым железом добавляется полная потеря тактильной чувствительности. При концентрации токсиканта 9,5 мг/дм<sup>3</sup> через 12 ч 4% особей не реагируют на механические раздражения, через 24 ч — 12%, а че-

### 3. Смертность *P. corneus* (%) в растворе сернокислого железа

| Концентрация токсиканта, мг/дм <sup>3</sup> | Экспозиция, ч |      |      |      |
|---|---------------|------|------|------|
|   | 3             | 12   | 24   | 48   |
| 5,5   | 0,0           | 4,3  | 12,2 | 16,5 |
| 7,6   | 4,1           | 10,4 | 18,2 | 26,3 |
| 9,5   | 8,0           | 12,1 | 22,3 | 46,6 |

рез 48 ч — 20%. При концентрации токсиканта 7,5 мг/дм<sup>3</sup> через 24 и 48 ч их доля составляет соответственно 8 и 14%, а при 5,5 мг/дм<sup>3</sup> — лишь 10% через 48 ч.

Картина острого отравления *P. corneus* сернокислым железом не ограничивается перечисленными симптомами. К ним следует добавить быстрое одномоментное выделение обильных фекалий, нередко завершающееся выведением пустых перитрофических мембран, выметывание неполноценных кладок, «выпотевание» лимфы. Эти нарушения наблюдаются очень редко и лишь при далеко зашедшем необратимом патологическом процессе, неизбежно ведущем к летальному исходу.

Содержание *P. corneus* в растворах токсиканта неизменно сопровождалось гибелью части животных (табл. 3). К моменту завершения эксперимента в средах концентрацией 5,5, 7,5 и 9,5 мг/дм<sup>3</sup> выживаемость моллюсков составила соответственно 67, 41 и 11%. Время наступления летального исхода находилось в прямой зависимости от концентрации и экспозиции. Так, при концентрации сернокислого железа 7,5 и 9,5 мг/дм<sup>3</sup> летальное время было в четыре раза меньшим, чем при концентрации 5,5 мг/дм<sup>3</sup>.

### Заключение

Комплекс симптомов патологического процесса, вызванного отравлением сернокислым железом, включает быстрые поведенческие (беспокойство, избегание) и физиологические (усиление ослизнения тела, образование кровоподтеков, кровоизлияний, отслаивание и разрушение кожного и респираторного эпителия, пастозность, разлитой отек головы и ноги, реакция выпадения и утрата тактильной чувствительности) реакции. Их проявление усиливается с возрастанием концентрации токсиканта и экспозиции. При отравлении *P. corneus* сернокислым железом мишенью становится легочное и кожное дыхание. Гибель животных наступает от асфиксии.

\*\*

*Досліджено вплив сірчаноокислого заліза FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O на швидкі (48 год) поведінкові та фізіологічні реакції витушки рогової Planorbarius corneus. Встановлено концентрацію токсиканту і строки появи реакцій уникнення, ослизнення тіла, розвитку розлитого набряку і повної втрати тактильної чутливості.*

\*\*

*The impact of ferric sulfate  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  on fast (48 h) behavioral and physiological responses of the snail *Planorbarius corneus* was investigated. Concentration of toxicant and terms of appearance of avoidance reaction, mucus forming on the body surface, diffuse edema of head and podium and loss of tactile sensitivity were determined.*

\*\*

1. Алексеев В.Ф. Основные принципы сравнительно-токсикологического эксперимента // Гидробиол. журн. — 1981. — Т. 17, № 3. — С. 92—100.
2. Биргер Т.И. Метаболизм водных беспозвоночных в токсической среде. — Киев: Наук. думка, 1979. — 190 с.
3. Брагинский Л.П. Некоторые итоги исследований по водной токсикологии в Украине // Актуальные проблемы водной токсикологии. — Борок, 2004. — С. 11—13.
4. Гайдаш Ю.К. Динамика развития макрозообентоса Днепропетровского водохранилища (оз. Ленина) в условиях зарегулированного стока и промышленного загрязнения: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Днепропетровск, 1986. — 20 с.
5. Гусева, Т.В., Молчанова Я.П., Заша Э.А. и др. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды. — М.: Эколайн, 2000. — 127 с.
6. Маляревская А.Я. Биохимические механизмы адаптации гидробионтов к токсическим веществам // Гидробиол. журн. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 70—82.
7. Метелев, В.В. Канаев, А.И., Дзасохова Н.Г. Водная токсикология. — М.: Колос, 1971. — 247 с.
8. Насонов Д.М., Александров В.Я. Реакция живого вещества на внешние воздействия. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. — 352 с.
9. Національна доповідь України про стан навколишнього середовища в Україні у 2011 р. — К., 2012. — 184 с.
10. Правила охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами. Постанова Кабінету Міністрів України від 25.03.1999 р. № 465 (зі змінами, внесеними згідно Постанови Кабінету Міністрів України від 07.08.2013 р. № 748).
11. Проссер Л., Браун Ф. Сравнительная физиология животных. — М.: Мир, 1967. — 766 с.
12. Романенко В.Д. Основы гидроэкологии. — К.: Обереги, 2001. — 723 с.
13. Строганов Н.С. Роль среды в пластическом обмене у рыб // Обмен веществ и биохимия рыб. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. — С. 23—30.
14. Филенко О.Ф., Михеева И.В. Основы водной токсикологии. — М.: Колос, 2007. — 142 с.
15. Хлебович В.В. Акклимация водных организмов. — Л.: Наука, 1981. — 136 с.
16. Harnish O. Studien zum anaeroben und Erhollengstoffwechsel der Larve von *Chironomus thymmi* // Z. Vergl. physiol. — 1938. — Bd. 28. — S. 200—240.
17. Ramade F. Ecotoxicology. — Chichester; New York: Willey, 1987. — 262 p.