

ТОКСИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНОВ МЕДИ НА ОРГАНИЗМЫ, ОТЛИЧАЮЩИЕСЯ МОЛЕКУЛЯРНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ТРАНСПОРТА КИСЛОРОДА

О.М. Балаева-Тихомирова, Е.И. Кацнельсон

Учреждение образования «Витебский государственный
университет имени П.М. Машерова»

В статье представлены результаты исследования, полученные при воздействии ионов меди(II) различной концентрации на газообмен и ключевые показатели углеводного обмена пресноводных легочных моллюсков, отличающихся молекулярными механизмами транспорта кислорода.

Цель работы — установить влияние ионов меди на газообмен и углеводный обмен легочных пресноводных гидробионтов.

Материал и методы. В эксперименте были использованы прудовик обыкновенный — *Lymnaea stagnalis* (белок-переносчик — гемоцианин) и катушка роговая — *Planorbis corneus* (белок-переносчик — гемоглобин). Изучали действие растворов сульфата меди(II) в концентрациях 0,01; 0,1 и 1 мг/дм³ на протяжении 48 часов эксперимента. Определяли показатели газообмена (количество поглощенного кислорода и выделяемого углекислого газа), содержание глюкозы в гемолимфе и гликогена в гепатопанкреасе.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что воздействие ионов меди(II) приводит к изменениям в процессах газообмена и метаболизма углеводов у легочных пресноводных моллюсков, степень влияния связана с концентрацией реагента и способностью организмов применять адаптационные механизмы защиты. Влияние токсиканта химической природы во всех исследуемых концентрациях на прудовика обыкновенного вызывает снижение концентраций потребляемого кислорода и выделяемого углекислого газа, увеличение уровня глюкозы в гемолимфе и снижение концентрации гликогена в гепатопанкреасе. У катушки роговой при таком же воздействии на организм фиксируются сходные трансформации только в концентрации токсиканта 1 мг/дм³.

Заключение. Влияние ионов меди приводит к развитию адаптационных механизмов за счет подавления потребления кислорода и снижения выделения углекислого газа, использования в качестве резервного источника энергии только углеводов и функционирования параллельно анаэробного гликолиза совместно с аэробными процессами.

Ключевые слова: ионы меди, легочные пресноводные моллюски, интоксикация, потребление кислорода, гликолиз.

TOXIC EFFECT OF COPPER IONS ON ORGANISMS WITH DIFFERENT MOLECULAR MECHANISMS OF OXYGEN TRANSPORT

O.M. Balayeva-Tikhomirova, E.I. Katsnelson

Education Establishment "Vitebsk State P.M. Masherov University"

The article presents a study results obtained under the influence of copper(II) ions of various concentrations on gas exchange and key indicators of carbohydrate metabolism of freshwater pulmonary mollusks, which differ in molecular mechanisms of oxygen transport.

The purpose of the article is to establish the effect of copper ions on the gas exchange and carbohydrate metabolism of pulmonary freshwater aquatic organisms.

Material and methods. The experiment used the common pond snail — *Lymnaea stagnalis* (protein-carrier — hemocyanin) and the horned snail — *Planorbis corneus* (protein-carrier — hemoglobin). The effect of copper(II) sulfate solutions at concentrations of 0,01; 0,1, and 1 mg/dm³ was studied over 48 hours of the experiment. The gas exchange parameters (the amount of the absorbed oxygen and the released carbon dioxide), the glucose content in the hemolymph and glycogen in the hepatopancreas were identified.

Findings and their discussion. It was established that the effect of copper(II) ions leads to changes in the processes of gas exchange and carbohydrate metabolism in freshwater pulmonate mollusks, the degree of influence is associated with the concentration of the

reagent and the ability of organisms to use adaptive defense mechanisms. The effect of the toxicant of the chemical nature in all studied concentrations on the common pond snail led to a decrease in the concentrations of consumed oxygen and released carbon dioxide, an increase in the level of glucose in the hemolymph and a decrease in the concentration of glycogen in the hepatopancreas. In the case of the horned snail, with the same effect on the organism, similar changes are recorded only in the concentration of the toxicant of 1 mg/dm³.

Conclusion. The influence of copper ions leads to the development of adaptation mechanisms by suppressing oxygen consumption and reducing the release of carbon dioxide, using only carbohydrates as a reserve energy source and functioning of anaerobic glycolysis in parallel with aerobic processes.

Key words: copper ions, pulmonary freshwater mollusks, intoxication, oxygen consumption, glucocorticolysis.

Поиск средств и методов оценки качества водной среды остается актуальным. Особое значение для биоиндикации поверхностных вод имеют гидробионты, которые способны к специфическому и неспецифическому реагированию на загрязнение. Реакция дыхательной системы является одной из наиболее чувствительных характеристик водных организмов и используется для оценки влияния неблагоприятных факторов среды обитания [1].

Организмы, средой обитания которых является вода, чувствительны к количеству растворенного в ней кислорода, особенно при его дефиците. На содержание растворенного в воде кислорода и способность его усваивать гидробионтами влияют такие факторы, как температура, сезонность, время суток, характер питания, стадия жизненного цикла, генетические особенности вида, загрязнение водоемов химическими веществами [2]. Поскольку дыхательная система уязвима для загрязнителей, пестициды и тяжелые металлы, даже в небольших количествах, особенно при длительном воздействии, оказывают токсическое действие на водные организмы [3]. Следовательно, важно разрабатывать методы комплексной оценки состояния организма при одновременном влиянии на него неблагоприятных условий обитания и соединений химической природы.

Для моллюсков обитание в водоемах с низким содержанием кислорода на протяжении многих поколений сформировало адаптивные механизмы. К поведенческим адаптациям относят способность мигрировать в более оптимальные условия обитания. Для оптимизации биохимических процессов у моллюсков выработалась способность частично или полностью переходить с аэробного типа дыхания на анаэробное, с сокращением количества используемого кислорода. Данные изменения необходимы для нормального функционирования организма моллюска и энергетического обеспечения его жизнедеятельности. В исследованиях, проводимых ранее на гидробионтах, выявлено, что увеличение содержания углекислого газа в одних условиях стимулирует потребление кислорода, в других приводит к ускорению процесса гликолиза [4]. При развитии ответных реакций на гипоксию, вызванную влиянием загрязнителей химической природы, изменяются как скорость обменных процессов, так и их направление, что подтверждает частичное или полное переключение аэробного пути обмена на анаэробный. О замедлении метаболизма моллюсков свидетельствует потеря подвижности, которая развивается при длительном нахождении в среде с недостатком кислорода [5]. Эта особенность гидробионтов связана с накоплением не полностью окисленных продуктов промежуточного обмена, которые образуются при анаэробии и кислородной недостаточности. В то же время в период реоксигенации организмы потребляют повышенное количество кислорода — для окисления токсичных промежуточных соединений и устранения кислородной недостаточности. Кратковременное пребывание животных в условиях низкого содержания кислорода или в воде, богатой водорослями, приводит к снижению интенсивности метаболических процессов [6]. В анаэробных условиях, вследствие неполного окисления продуктов гликолиза и сниженного выхода энергии, гликоген расходуется значительно быстрее — в 3–6 раз, а по некоторым данным, в 10 раз интенсивнее, чем в аэробных.

Подводя итог обзору литературы, следует отметить, что медь представляет собой важный микроэлемент, участвующий в работе ферментов (цитохромоксидаза, супероксиддисмутаза), но в повышенных концентрациях становится токсичной. Одним из ведущих механизмов токсического действия ионов меди может быть нарушение дыхания, поскольку Cu^{2+} ингибирует активность цитохромоксидазы, что снижает эффективность клеточного дыхания. Кроме того, избыток меди приводит к генерации активных форм кислорода (окислительный стресс), а это вызывает повреждение липидов, белков и ДНК. При хроническом воздействии наиболее значимо изменение активности ферментов (снижение

активности каталазы, супероксиддисмутазы и других антиоксидантных ферментов). Возможно и нарушение ионного баланса, так как медь конкурирует с другими металлами (Zn, Fe) за транспортные белки, что может приводить к дефициту необходимых элементов. Эти первичные биохимические процессы снижают двигательную активность, угнетают фильтрационную способность и нарушают репродуктивные функции (снижение плодовитости).

Цель работы — установить влияние ионов меди на газообмен и углеводный обмен легочных пресноводных гидробионтов.

Материал и методы. В эксперименте были использованы 108 моллюсков двух видов: прудовик обыкновенный — *Lymnaea stagnalis* (Linnaeus, 1758); катушка роговая — *Planorbarius corneus* (Linnaeus, 1758), которые были собраны в бассейне реки Витьба (Витебск, Беларусь) в осенне-весенний период. Для адаптации перед началом эксперимента животные содержались в лабораторных условиях: в сосудах с непроточной водой в течение 10 суток при стандартных условиях ($t=18-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\text{pH}=7,2-7,4$; содержание кислорода в воде — $10\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$), из расчета не менее 0,5 литра на особь, кормили молодыми листьями салата, меняли воду каждые три дня.

В эксперименте участвовали животные, относящиеся к одному размерному классу (масса от 6,80 до 9,65 г). Их расчетный возраст оценивался в 68 недель (1 год и 3 месяца), что свидетельствует об использовании в эксперименте половозрелых особей [7].

Забор гемолимфы проводили после взвешивания особей, посредством раздражения ноги иголкой шприца. Гемолимфу собирали и измеряли с помощью автоматических пипеток. Морфометрические показатели легочных моллюсков определяли по методике Е.М. Хейсина [8].

В экспериментах было исследовано влияние сульфата меди в концентрациях 0,01; 0,1 и $1\text{ мг}/\text{дм}^3$, которые были выбраны с учетом значений предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения [9]. Продолжительность острого эксперимента 48 часов. Контролем служили особи, содержащиеся в отстоянной водопроводной воде в стандартных условиях.

Для выявления накопления ионов меди в гемолимфе применяли спектрофотометрический метод. Уровень глюкозы в гемолимфе определяли глюкозооксидазным методом наборами фирмы Диакон Диасис [10], а содержание гликогена в гепатопанкреасе — методом Krisman [11].

Для расчета дыхательного коэффициента использовали отношение объема выделяемого из организма углекислого газа к объему поглощаемого за то же время кислорода [12]. Интенсивность общего газообмена у гидробионтов устанавливали по сумме поглощенного кислорода и выделившегося углекислого газа. Для этого применялись стеклянные сосуды объемом 250 см^3 , по одному на каждую особь. Сосуды заполнялись водой до полного вытеснения воздуха. В каждый сосуд помещали по одному моллюску одинакового размера, после чего сосуды герметично закрывали пробками и выдерживали в течение четырех часов для дальнейшего анализа (Строганов, 1971). Определение интенсивности потребления кислорода осуществлялось с помощью йодометрического титрования исследуемой пробы тиосульфата натрия по методу Winkler в модификации Н.С. Строганова (1971) [13]. Исследовать интенсивность выделения углекислого газа позволил метод потенциометрического титрования раствором гидроксида натрия, согласно модифицированному методу Н.Ю. Аликина (1971) [13].

Весь цифровой материал вводили для хранения и обработки в таблицы Microsoft Excel с применением теста Манна — Уитни. Полученные результаты представлены в виде медианы и интерквартильной широты (25–75 процентилей). Для оценки достоверности различий между независимыми выборками использовали тест Манна — Уитни, U критическое для критерия Манна — Уитни ($U_{кр}=27$ при $p<0,05$).

Результаты и их обсуждение. Ионы меди(II) оказывают значительное влияние на метаболизм прудовика обыкновенного и катушки роговой. Уровень их воздействия зависит от концентрации, формы ионов, продолжительности экспозиции, а также физиологического состояния организма. Высокая концентрация Cu^{2+} приводит к снижению двигательной активности гидробионтов, угнетению фильтрационной способности, а также нарушению репродуктивных функций (снижению плодовитости).

В табл. 1 представлены морфометрические показатели легочных пресноводных моллюсков реки Витьба города Витебска Витебского района.

Таблица 1

**Морфометрические показатели легочных пресноводных моллюсков
р. Витьба г. Витебска Витебского р-на, [25%; 75%]**

Вид моллюска, (n=9)	Высота, см	Ширина, см	Масса, г	Объем гемолимфы, см ³
Весна				
<i>Lymnaea stagnalis</i>	5,05 [4,90–5,70]	1,75 [1,70–2,00]	8,57 [7,67–8,80]	1,60 [1,40–1,90]
<i>Planorbarius corneus</i>	2,45 [2,30–2,60]	3,20 [3,10–3,50]	8,20 [6,80–8,70]	1,28 [1,00–1,40]
Лето				
<i>Lymnaea stagnalis</i>	4,85 [4,50–5,40]	1,90 [1,70–2,30]	8,47 [8,05–9,15]	1,80 [1,20–2,40]
<i>Planorbarius corneus</i>	2,55 [2,40–2,70]	3,40 [3,20–3,70]	7,90 [7,70–9,50]	1,30 [1,10–1,50]
Осень				
<i>Lymnaea stagnalis</i>	4,75 [4,50–5,30]	1,79 [1,74–2,19]	8,10 [7,60–9,30]	1,95 [1,00–2,60]
<i>Planorbarius corneus</i>	2,45 [2,30–2,60]	3,30 [3,20–3,65]	7,70 [7,40–9,65]	1,23 [0,90–1,55]

При стандартных условиях ($t=18-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH}=7,2-7,4$) установлена видовая специфичность газообмена (табл. 2). Интенсивность потребления O_2 наиболее выражена у *Lymnaea stagnalis* (0,094 мг/г в час). У *Planorbarius corneus* данный показатель составляет 0,023 мг/г в час.

Таблица 2

**Показатели газообмена (мг/г час) у моллюсков,
различающихся типом транспорта кислорода, [25%; 75%]**

Вид моллюска, (n=27)	Интенсивность потребления кислорода, мг/г в час	Интенсивность выделения CO_2 , мг/г час	Дыхательный коэффициент
<i>Lymnaea stagnalis</i>	0,094 [0,089–0,097] ¹ p<0,05	0,037 [0,035–0,039] ¹ p<0,05	0,394 [0,393–0,402] ¹ p<0,05
<i>Planorbarius corneus</i>	0,023 [0,021–0,026]	0,021 [0,018–0,024]	0,913 [0,857–0,923]

Примечание: ¹p<0,05 по сравнению с *Planorbarius corneus*.

При изучении процессов газообмена у прудовика обыкновенного и катушки роговой выявлена тесная взаимосвязь между количеством потребляемого кислорода и концентрацией выделяемого при этом углекислого газа. При сравнении межвидовых особенностей фиксируются статистически значимые отличия между прудовиком обыкновенным и катушкой роговой. Установлено, что за единицу времени *Lymnaea stagnalis* поглощает наибольшее количество кислорода, при этом концентрация выделяемого углекислого газа снижается. У прудовика обыкновенного дыхательный коэффициент равен 0,372, у катушки роговой — 0,929, разница показателя у двух видов составила 2,5 раза, что связано с особенностью молекулярных механизмов транспорта кислорода. Результат экспериментальных исследований позволяет предположить, что молекулярные механизмы транспорта кислорода исследуемых организмов, с использованием в качестве белков-переносчиков гемоцианина и гемоглобина, вызывают различные реакции на нехарактерные изменения факторов среды обитания. В исследованиях Е.А. Пузаткиной [13] прослежена взаимосвязь между содержанием каротиноидов и показателями газообмена моллюсков, что обусловлено межвидовыми особенностями, которые впоследствии влияют на способность организма адаптироваться к неблагоприятным факторам среды.

Результаты исследования влияния сульфата меди(II) на газообмен прудовика обыкновенного и катушки роговой представлены в табл. 3. Статистически значимые отличия зафиксированы у *Lymnaea stagnalis* при воздействии растворов сульфата меди(II) во всех концентрациях. Отмечено снижение уровня поглощения кислорода и, как следствие, выделения углекислого газа. При расчете значений дыхательного коэффициента также выявлены значимые изменения во всех используемых в эксперименте

концентрациях токсиканта (0,01; 0,1 и 1 мг/дм³). При наибольшем негативном воздействии токсиканта фиксируется значение дыхательного коэффициента выше единицы, что свидетельствует об изменении в обмене веществ и переключении аэробного дыхания на химические реакции, протекающие в организме при анаэробных процессах. Данные изменения подтверждают развитие адаптационных механизмов, которые являются следствием негативного воздействия окружающей среды.

Таблица 3

**Показатели газообмена (мг/г час) моллюсков
при влиянии различных концентраций ионов меди [25%; 75%]**

Показатели	Концентрация CuSO ₄ , мг/дм ³			
	Контроль (n=27)	0,01 (n=27)	0,1 (n=27)	1 (n=27)
<i>Lymnaea stagnalis</i>				
Интенсивность потребления кислорода, мг/г·час	0,094 [0,089–0,097]	0,023 [0,018–0,025] ¹ p<0,05	0,016 [0,015–0,018] ¹ p<0,05	0,010 [0,009–0,012] ¹ p<0,05
Интенсивность выделения углекислого газа, мг/г·час	0,037 [0,035–0,039]	0,017 [0,016–0,018] ¹ p<0,05	0,022 [0,018–0,027] ¹ p<0,05	0,021 [0,019–0,022] ¹ p<0,05
Дыхательный коэффициент	0,394 [0,393–0,402]	0,739 [0,720–0,889] ¹ p<0,05	1,375 [1,200–1,500] ¹ p<0,05	2,100 [1,833–2,111] ¹ p<0,05
<i>Planorbarius corneus</i>				
Интенсивность потребления кислорода, мг/г·час	0,023 [0,021–0,026]	0,027 [0,024–0,029]	0,019 [0,018–0,021]	0,009 [0,008–0,010] ¹ p<0,05
Интенсивность выделения углекислого газа, мг/г·час	0,021 [0,018–0,024]	0,023 [0,020–0,024]	0,020 [0,017–0,022]	0,022 [0,020–0,024] ¹ p<0,05
Дыхательный коэффициент	0,913 [0,857–0,923]	0,852 [0,828–0,833]	1,053 [0,952–1,222]	2,444 [2,400–2,500] ¹ p<0,05

Примечание: ¹p<0,05 — по сравнению с контрольной группой.

У моллюсков, использующих в качестве белка-переносчика гемоглобин, при воздействии сульфата меди(II) в концентрациях 0,01 и 0,1 мг/дм³ по сравнению с контролем не установлено статистически значимых отличий в содержаниях кислорода и углекислого газа. Значительные изменения в газообмене гидробионтов отмечаются при повышении содержания соли меди до 1 мг/дм³. В данной концентрации сульфата меди(II) дыхательный коэффициент также отличается от контрольных значений, подобных изменений не зафиксировано при более низком содержании тяжелого металла. У легочных моллюсков были зарегистрированы изменения в процессах дыхания и газообмена — из-за гипоксии, развивающейся в ответ на воздействие ионов Cu²⁺. Однако установленные изменения по-разному воздействовали на два вида экспериментальных моллюсков. Все используемые концентрации растворов сульфата меди(II) у прудовика обыкновенного приводили к снижению поглощения растворенного в воде кислорода и, как следствие, уменьшению выделения углекислого газа. Для катушки роговой, у которой белком-переносчиком является гемоглобин (эволюционно более совершенная структура для связывания и транспортировки кислорода), сходное воздействие на газообмен наблюдается только в растворе с концентрацией соли 1 мг/дм³.

В результате расчета дыхательного коэффициента у прудовика обыкновенного значения выше единицы были получены при влиянии сульфата меди(II) в средней и высокой концентрациях. Такого изменения коэффициента не фиксировалось у катушки роговой при концентрациях сульфата меди(II) 0,01 и 0,1 мг/дм³, только при содержании в воде токсиканта в количестве 1 мг/дм³ отмечено увеличение дыхательного коэффициента выше единицы. Следовательно, экспериментальные данные

подтверждают, что легочные пресноводные моллюски при уменьшении потребления кислорода используют в качестве адаптации механизм переключения обмена веществ на реакции разложения углеводов, которые являются основными процессами анаэробного гликолиза. Указанными исследованиями установлено, что влияние сульфата меди(II) более выражено у прудовика обыкновенного, так как растворы токсиканта во всех используемых в эксперименте концентрациях приводили к уменьшению поглощения кислорода из воды и снижению количества выделяемого углекислого газа. Выявлено, что катушка роговая более устойчива и изменения в газообмене фиксируются только при наибольшем воздействии 1 мг/дм³. У двух видов легочных пресноводных моллюсков обнаружено увеличение показателя «дыхательный коэффициент» больше единицы при концентрации сульфата меди(II) 1 мг/дм³. Таким образом, изменения дыхательного коэффициента моллюсков находятся в зависимости от вида, экологических условий обитания, степени негативного влияния, способности использовать процессы анаэробного дыхания и молекулярных механизмов транспорта кислорода.

При содержании легочных пресноводных моллюсков в растворах ионов Cu²⁺ различной концентрации происходит их накопление в гемолимфе (табл. 4). Зафиксировано дозозависимое содержание ионов меди(II) у экспериментальных животных, напрямую связанное с концентрацией используемого раствора соли. У прудовика обыкновенного уровень ионов Cu²⁺ повышается в 1,3 раза уже при концентрации токсиканта 0,01 мг/дм³, у катушки роговой статистически достоверных различий по сравнению с контролем не установлено. Сульфат меди(II) в концентрациях 0,1 и 1 мг/дм³ накапливается в гемолимфе обоих видов моллюсков и составляет соответственно у *Lymnaea stagnalis* 1,30 и 1,79 мг/дм³, у *Planorbarius corneus* 0,89 и 1,26 мг/дм³. Следовательно, уровень ионов Cu²⁺ максимально увеличился в 2 раза по сравнению с контрольной группой.

Таблица 4

Содержание ионов Cu²⁺(мг/дм³) в гемолимфе *Lymnaea stagnalis* и *Planorbarius corneus* после воздействия влияния сульфата меди(II)

Группа, (n=27)	Вид моллюсков	
	<i>Planorbarius corneus</i>	<i>Lymnaea stagnalis</i>
Контроль	0,64 [0,41–0,84]	0,89 [0,63–1,12]
CuSO ₄ , 0,01 мг/дм ³	0,77 [0,52–0,98]	1,18 [0,91–1,32] ¹ p<0,05
CuSO ₄ , 0,1 мг/дм ³	0,89 [0,74–1,06] ¹ p<0,05	1,30 [1,11–1,58] ¹ p<0,05
CuSO ₄ , 1 мг/дм ³	1,26 [1,13–1,49] ¹ p<0,05	1,79 [1,61–2,07] ¹ p<0,05

Примечание: ¹p<0,05 — по сравнению с контрольной группой.

Модельный эксперимент по установлению влияния ионов меди(II) на метаболизм легочных пресноводных моллюсков сопровождался изменениями в углеводном обмене, которые можно оценить по содержанию глюкозы в гемолимфе и гликогена в гепатопанкреасе (табл. 5, 6). При воздействии иона тяжелого металла отмечено развитие гипоксии и переключение организма на анаэробное дыхание, при котором основным источником энергии является гликоген. Это подтверждается значениями дыхательного коэффициента выше 1 (табл. 3).

Из табл. 5 видно, что метаболизм катушки роговой быстрее реагирует на неблагоприятное влияние соли меди(II) и подключает анаэробные механизмы защиты уже при концентрации 0,01 мг/дм³, увеличивая расход гликогена. У прудовика обыкновенного защитные реакции начинают работать при более высоком содержании токсического вещества, и использование гликогена увеличивается в 1,3 и 2 раза. Содержание гликогена в гепатопанкреасе моллюсков при действии CuSO₄ в концентрациях 0,1 и 1 мг/дм³ соответственно составило: у *Lymnaea stagnalis* — 21,15 и 13,74 мг/г, у *Planorbarius corneus* — 15,56 и 8,92 мг/г. Как видно из значений, наиболее активный гликогенолиз происходит у исследуемых животных при их содержании в растворе соли с максимальной концентрацией: концентрация гликогена уменьшается в 2–2,8 раза в зависимости от вида моллюсков.

Содержание гликогена (мг/г) в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* и *Planorbarius corneus* после воздействия влияния сульфата меди(II)

Группы, (n=27)	Вид моллюсков	
	<i>Lymnaea stagnalis</i>	<i>Planorbarius corneus</i>
Контроль	26,91 [23,45–29,86]	24,61 [21,59–28,78]
CuSO ₄ , 0,01 мг/дм ³	27,72 [21,56–32,63] ¹ p<0,05	16,45 [12,64–21,17] ¹ p<0,05
CuSO ₄ , 0,1 мг/дм ³	21,15 [18,39–25,41] ¹ p<0,05	15,56 [14,72–23,65] ¹ p<0,05
CuSO ₄ , 1 мг/дм ³	13,74 [10,71–18,36] ¹ p<0,05	8,92 [7,44–12,08] ¹ p<0,05

Примечание: ¹p<0,05 по сравнению с контрольной группой.

Результат модельного эксперимента подтверждает, что с увеличением концентрации сульфата меди(II) усиливается токсическое действие на гидробионтов, и по причине влияния фиксируется уменьшение поглощаемого кислорода и выделяемого углекислого газа, а также отмечается переход организма на анаэробный тип дыхания с увеличением скорости разложения молекул гликогена.

Концентрация глюкозы (ммоль/дм³) в гемолимфе *Lymnaea stagnalis* и *Planorbarius corneus* после воздействия влияния сульфата меди(II)

Группы, (n=27)	Вид моллюсков	
	<i>Lymnaea stagnalis</i>	<i>Planorbarius corneus</i>
Контроль	0,37 [0,21–0,59]	1,54 [1,31–1,96]
CuSO ₄ , 0,01 мг/дм ³	0,60 [0,32–0,97] ¹ p<0,05	1,62 [1,34–2,03]
CuSO ₄ , 0,1 мг/дм ³	1,00 [0,88–1,22] ¹ p<0,05	1,73 [1,52–1,89] ¹ p<0,05
CuSO ₄ , 1 мг/дм ³	1,54 [1,42–2,16] ¹ p<0,05	2,60 [2,35–2,91] ¹ p<0,05

Примечание: ¹p<0,05 по сравнению с контрольной группой.

При уменьшении содержания гликогена в гепатопанкреасе фиксируется активация обратного процесса обмена углеводов: повышение уровня глюкозы в гемолимфе и уменьшение концентрации гликогена в гепатопанкреасе [14]. Уровень глюкозы повышается незначительно при более низкой концентрации соли тяжелого металла. Из табл. 6 следует, что гипергликемия фиксируется у обоих видов моллюсков в концентрациях раствора 0,1 и 1 мг/дм³ и соответственно составляет: у *Lymnaea stagnalis* — 1,00 и 1,54 ммоль/дм³, у *Planorbarius corneus* — 1,73 и 2,60 ммоль/дм³. Содержание глюкозы максимально повышается в 1,7–4,2 раза в зависимости от видовых особенностей. Полученные данные коррелируют с содержанием гликогена в гепатопанкреасе и свидетельствуют об активизации реакций анаэробного дыхания. Таким образом, выявлена закономерность в обмене углеводов: снижение концентрации гликогена в гепатопанкреасе повышает уровень глюкозы в гемолимфе.

Заключение. Влияние ионов меди приводит к развитию адаптационных механизмов за счет подавления потребления кислорода и снижения выделения углекислого газа, использования в качестве резервного источника энергии только углеводов и функционирования параллельно анаэробного гликолиза совместно с аэробными процессами. Установлена видовая специфичность газообмена у *Lymnaea stagnalis* и *Planorbarius corneus*. В сравнении с прудовиком обыкновенным роговая катушка обладает большей устойчивостью к воздействию ионов меди. У роговой катушки статистически значимые изменения в газообмене и метаболизме углеводов выявляются только при концентрации меди 1,0 мг/дм³. Прудовик обыкновенный же демонстрирует такие изменения при всех концентрациях токсиканта, что обусловлено различиями в молекулярных механизмах переноса кислорода и содержании каротиноидов.

Работа выполнена на базе учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова» в рамках задания ГПНИ 10 «Природопользование и экология» и задания 3.04 «Оценка состояния водных экосистем Белорусского Поозерья в условиях изменения климата и техногенного воздействия» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» (№ ГР 20210475 от 31.03.2021).

ЛИТЕРАТУРА

1. Чуйко, Г.М. Современные подходы использования методов биодиагностики при экотоксикологической оценке водных экосистем / Г.М. Чуйко // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VI Междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 29 мая — 1 июля / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. — Пермь, 2017. — Т. 3. — С. 90–94.
2. Свободно-радикальное окисление липидов и белков — универсальный процесс жизнедеятельности организма / М.А. Луцкий [и др.] // Успехи современного естествознания. — 2014. — № 12-1. — С. 24–28.
3. Livingstone, D.R. Oxidative stress in aquatic organisms in relation to pollution and aquaculture / D.R. Livingstone // Revue de Médecine Vétérinaire. — 2003. — Vol. 154, № 6. — P. 427–430.
4. Halliwell, B. Oxygen toxicity, oxygen radicalis, transition metals and disease / B. Halliwell, J.M. Gutteridge // Biochem. J. — 1984. — Vol. 292. — P. 1–14.
5. Карнаухов, В.Н. Функции каротиноидов в тканях животных / В.Н. Карнаухов. — М.: Наука, 1976. — 104 с.
6. Рязанцева, Л.Т. Ферменты-антиоксиданты: структурно-функциональные свойства и роль в регулировании метаболических процессов / Л.Т. Рязанцева // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2011. — Т. 7, № 2. — С. 126–129.
7. Зотин, А.А. Индивидуальный рост *Lymnaea stagnalis*. Поздний постличиный онтогенез / А.А. Зотин // Известия РАН. Серия биологическая. — 2009. — № 6. — С. 1–8.
8. Хейсин, Е.М. Краткий определитель пресноводной фауны / Е.М. Хейсин. — 2-е изд. — М.: Гос. учеб.-пед. изд-во М-ва просвещения РСФСР, 1962. — 148 с.
9. Гигиенические нормативы 2.1.5.10-21-2003 // Сб. гигиенических нормативов по разделу коммунальной гигиены. — Минск, 2004. — С. 38–75.
10. Чиркин, А.А. Клинический анализ лабораторных данных / А.А. Чиркин. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Медицинская литература, 2019. — 368 с.
11. Krisman, C.R. A method for the colometric estimation of glycogen with iodine / C.R. Krisman // Anal. Biochem. — 1962. — Vol. 4. — P. 17–23.
12. Ходоровская, Н.И. Физико-химические и гидробиологические методы исследования экологического состояния водоемов / Н.И. Ходоровская, О.Н. Кандерова. — Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. — 70 с.
13. Пузаткина, Е.А. Влияние экзогенных факторов на состояние газообмена и содержание каротиноидов в тканях пресноводных моллюсков: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Пузаткина Елена Александровна; Казан. гос. ун-т. — Казань, 2006. — 187 л.
14. Балаева-Тихомирова, О.М. Действие солей тяжелых металлов на углеводный обмен тканей пресноводных легочных моллюсков / О.М. Балаева-Тихомирова, Т.А. Толкачева, Е.И. Кацнельсон // Вестник Мозырского государственного педагогического университета им. И.П. Шамякина. — 2018. — № 1(51). — С. 12–17.

REFERENCES

1. Chuiko G.M. *Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov: trudy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Perm, 29 maya – 1 iyulia* [Contemporary Issues of Water Bodies and their Catchment Areas: Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference, Perm, May 29 – June 1], Perm, 2017, 3, pp. 90–94.
2. Lutski M.A. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances of the Contemporary Natural Science], 2014, 12(1), pp. 24–28.
3. Livingstone, D.R. Oxidative stress in aquatic organisms in relation to pollution and aquaculture / D.R. Livingstone // Revue de Médecine Vétérinaire. — 2003. — Vol. 154, № 6. — P. 427–430.
4. Halliwell, B. Oxygen toxicity, oxygen radicalis, transition metals and disease / B. Halliwell, J.M. Gutteridge // Biochem. J. — 1984. — Vol. 292. — P. 1–14.
5. Karnaukhov V.N. *Funktsii karotinoidov v tkaniakh zhivotnykh* [Functions of Carotenoids in Animal Tissues], M.: Nauka, 1976, 104 p.
6. Riazantseva L.T. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Journal of Voronezh State Technical University], 2011, 7(2), pp. 126–129.
7. Zotin A.A. *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya* [Bulletin of the RAS. Biology], 2009, 6, pp. 1–8.
8. Kheisin E.M. *Kratki opredelitel presnovodnoi fauny* [Brief Directory of Freshwater Fauna], M.: Gos. ucheb.-ped. Izd-vo M-va prosveshcheniya RSFSR, 1962, 148 p.
9. *Sb. gigiyenicheskikh normativov po razdelu kommunalnoi gigiyeny* [A Collection of Hygiene Normatives of Communal Hygiene], Minsk, 2004, pp. 38–75.
10. Chirkin A.A. *Klinicheski analiz laboratornykh dannyykh* [Clinical Analysis of Laboratory Data], M.: Meditsinskaya literatura, 2019, 368 p.
11. Krisman, C.R. A method for the colometric estimation of glycogen with iodine / C.R. Krisman // Anal. Biochem. — 1962. — Vol. 4. — P. 17–23.
12. Khodorovskaya N.I., Kanderova O.N. *Fiziko-khimicheskiye i gidrobiologicheskiye metody issledovaniya ekologicheskogo sostoyaniya vodoyemov* [Physical and Chemical and Hydrobiological Research Methods of Ecological Status of Waterbodies], Cheliabinsk: Izd. YuUrGU, 2002, 70 p.
13. Puzatkina E.A. *Vliyaniye ekzogennykh faktorov na sostoyaniye gazoobmena i sodержaniye karotinoidov v tkaniakh presnovodnykh molluskov: dis. ... kand. biol. nauk* [Impact of Exogenous Factors on the State of Gas Exchange and Carotenoid Content in Freshwater Mollusk Tissues: PhD (Biology) Dissertation], Kazan, 2006, 187 sh.
14. Balayeva-Tikhomirova O.M., Tolkacheva T.A., Katsnelson E.I. *Vestnik Mozyrskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.P. Shamiakina* [Journal of Mozyr State Pedagogical I.P. Shamiakin University], 2018, 1(51), pp. 12–17.

Поступила в редакцию 14.07.2025

Адрес для корреспонденции: e-mail: olgabal.tih@gmail.com — Балаева-Тихомирова О.М.