

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ МЕДЬЮ И ТРИБУТИЛОЛОМ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВУХ ДРЕЙССЕН (*DREISSENA POLYMORPHA* И *D. BUGENSIS*)

© 2024 Березина Н.А.^{а, *}, Шаров А.Н.^{б, с, **}, Холодкевич С.В.^{б, с, ***}, Кухарева Г.И.^с

^а Зоологический институт Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199034, Россия

^б Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук, Борок, 152742, Россия

^с Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, 199178, Россия

e-mail: *nadezhda.berezina@zin.ru, **sharov@ibiw.ru, ***kholodkevich@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024. После доработки 24.07.2024. Принята к публикации 06.08.2024

Работа посвящена изучению физиологических показателей дрейссен, *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) и *D. bugensis* (Andrusov, 1897), таких, как выживаемость, метаболическая активность (уровень потребления кислорода), индекс массы тела и кардиоактивность (восстановление естественного ритма сердца после нагрузки), при загрязнении воды медью и трибутилолом. Результаты выявили различия в физиологических реакциях у двух видов дрейссен на загрязнение воды этими веществами. Бугская дрейссена была более уязвима, чем речная дрейссена к воздействию меди и трибутилола по показателям смертности, биомаркерам сердечного ритма и метаболической активности. Воздействие этих соединений также приводило к снижению индекса массы тела у дрейссен. Оба вида моллюсков, подвергшиеся воздействию меди, имели сходную динамику дыхательной активности, с дозозависимой реакцией колоколообразного характера. Моллюски из варианта с наименьшей концентрацией меди и контроля не различались по уровню дыхательной активности. Однако в средних концентрациях меди 100 и 500 мкг/л у дрейссен наблюдалось статистически значимое увеличение интенсивности дыхания, а при высоких уровнях меди (1 и 5 мг/л) – его значительное снижение. Воздействие оловоорганических соединений также существенно влияло на дыхательную активность обоих видов дрейссен: приводя к увеличению потребления кислорода в 1.5–1.7 раза по сравнению с контролем. Бугская дрейссена была более чувствительна к присутствию трибутилола, чем речная. В результате исследования установлено, что время восстановления пульса речной дрейссены увеличивалось с ростом концентрации меди (от 100 до 5000 мкг/л), так что моллюскам требовалось на 10–25 минут больше времени для восстановления сердечного ритма, чем в контроле. У бугской дрейссены время восстановления сердечного ритма при высоких концентрациях меди (1000 мкг/л) увеличилось почти в два раза (103 минуты) относительно контроля (56 минут). Время восстановления частоты сердечных сокращений при воздействии трибутилола (10–100 нг/л) у обоих видов было больше, чем в контроле. Наибольшие различия наблюдались при 100 нг/л трибутилола, когда *D. bugensis* требовалось на 27–35 минут больше времени для восстановления сердечного ритма, чем *D. polymorpha*. Наши данные показали, что лучшая выносливость речной дрейссены к присутствию загрязняющих веществ в воде может способствовать её дальнейшей экспансии и успешной конкуренции с бугской дрейссеной. Вместе с тем, бугская дрейссена, будучи более чувствительной к загрязнению воды медью и оловоорганическими соединениями, может стать более эффективным видом-индикатором при мониторинге этих загрязнений.

Ключевые слова: моллюски, скорость потребления кислорода, энергетический обмен, частота сердечных сокращений, масса тела, загрязнение воды.

DOI:10.35885/1996-1499-17-3-027-038

Введение

Наряду с изменениями климата, во всём мире чужеродные виды являются наибольшей угрозой естественному биоразнообразию и причиной трансформации среды обитания многих аборигенных видов. В этом

отношении внимания заслуживают чужеродные виды, которые давно натурализовались и стали массовыми в реципиентных водоёмах, значительно влияя на функционирование всей экосистемы. К таким видам в водной среде относятся двустворчатые моллюски

рода *Dreissena* (*Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) и *D. bugensis* (Andrusov, 1897)), которые к настоящему времени широко распространены в Евразии и Северной Америке и стали доминантами во многих водоёмах [Karatayev et al., 2015]. Во всём мире дрейссениды входят в десятку наиболее экономически дорогостоящих водных инвазионных видов [Cuthbert et al., 2021]. Анализ воздействия дрейссенид на пресноводные экосистемы показал, что после инвазии они путём фильтрационного поведения значительно сокращают общую численность фитопланктона, на 35–78% [Higgins, Vander Zanden, 2010]. Однако, есть данные о том, что присутствие дрейссенид в водоёме приводит к увеличению численности цианобактерий, таких как *Microcystis aeruginosa*, за счёт механизма «селективного отторжения» дрейссенами токсичных штаммов цианобактерий с псевдофекалиями [Vanderploeg et al., 2001; Raikow et al., 2004; Knoll et al., 2008]. Считается, что дрейссениды могут повышать уровни биодоступных активных форм фосфора и аммония в донных местообитаниях при их массовых поселениях, откуда эти биогены легко ресуспендируются в толщу воды [Vanderploeg et al., 2017; Reynolds, Aldridge, 2021].

Актуально определить чувствительность разных видов дрейссен к токсическому загрязнению и рассмотреть их с практической стороны, а именно можно ли использовать такие виды-эдификаторы для целей биоиндикации качества среды. Во многих исследованиях доказана высокая чувствительность моллюсков, группы к которой относятся дрейссениды, к действию загрязнителей природной среды [Петухова 2005; Богатов, Богатова, 2009; Klimova et al., 2017; Шулькин, Кавун, 2023]. Для решения вопроса необходимы определения экофизиологических показателей видов и изучение реакций со стороны разных систем организма на тот или иной тип загрязнения. В настоящее время обозначена необходимость исследований дрейссенид для целей биоиндикации и биотестирования, включая изучение чувствительности разных видов к фоновым уровням загрязняющих веществ [Waller et al., 2023].

Ранее уже была показана разная чувствительность дрейссен *D. polymorpha* и *D.*

bugensis к резко токсичным загрязнителям, таким как медь и оловоорганические соединения [Berezina et al., 2024]. Однако, в этой работе были исследованы всего две концентрации воздействия этих веществ. Выбор для исследования физиологических реакций дрейссен именно этих загрязнителей связан с тем, что к настоящему времени они накопились в значительных количествах и обнаруживаются во многих водоёмах, поскольку оба вещества долгое время использовались как биоциды для борьбы с животными-обрастателями (как раз с такими, как дрейссены) днищ судов и гидротехнических сооружений. Из-за летальных эффектов на всю окружающую биоту, включая рыб, оловоорганические биоциды были частично запрещены в начале этого века, а соединения меди продолжают применяться как биоцидные добавки в краски против обрастателей и в настоящее время. Анализ трёх физиологических биомаркеров, наиболее чётко отражающих состояние моллюсков при токсическом воздействии, таких как метаболическая активность (уровень потребления кислорода), индекс массы тела и кардиоактивность (восстановление естественного ритма сердца после нагрузки) у двух видов дрейссен (*D. polymorpha* и *D. bugensis*) при загрязнении воды медью и трибутилолом проведён в этой работе.

Материал и методы

Схема эксперимента и химический анализ. Моллюски обоих видов (*Dreissena polymorpha* и *D. bugensis*) были собраны в ноябре 2020 г. при температуре 8 °С в сублиторальной точке (8–10 м) Рыбинского вдхр., которая использовалась в качестве эталонного места (координаты этой станции: 58.0445 с. ш., 38.3054 в. д.). Животных помещали в отстоянную водопроводную воду объёмом 100 л в стеклянных аквариумах и акклиматизировали к лабораторным условиям в течение двух недель. Концентрация меди в контрольной воде составила 4.2 мкг/л, трибутилола не обнаружено (предел обнаружения LOD = 10 нг/л). Солёность воды была 0.3 г/л, а pH – 7.2.

Отклик со стороны систем организма моллюсков изучали в контроле и при воздействии

Таблица 1. Концентрации химических веществ в испытуемых средах

Вариант	Cu, мкг/л			ТВТ, нг/л		
	расчётное	начало	конец	расчётное	начало	конец
1 (Контроль)	0	<5	<5	0	<10	<10
2	50	51	40	10	10	8
3	100	100	88	20	22	28
4	500	449	352	50	55	52
5	1000	998	885	100	101	141
6	5000	4805	4020	–	–	–

разных доз загрязнителей: трибутилолова в диапазоне 10–100 нг/л и меди в диапазоне 50–5000 мкг/л. Продолжительность воздействия меди из водного раствора сульфата меди на моллюсков обоих видов (шесть вариантов концентраций, таблица 1) и трибутилолова (пять вариантов концентраций, таблица 1) составила 96 ч.

Все варианты воздействия проводились в изотермической комнате при постоянной температуре воды ($T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для приготовления растворов использовали воду, к которой моллюски были акклимированы. В неё добавляли раствор трибутилолова хлорида (96%; «Sigma-Aldrich», США) в ацетоне или водный раствор медного купороса (CuSO_4 , «ЛенРеактив», Россия) согласно заданным концентрациям, приведённым в таблице 1. В каждом варианте содержали по 20 моллюсков каждого вида. Во время экспозиции аквариумы с моллюсками и экспериментальной средой были накрыты для избегания испарения воды. Обеспечивали постоянную аэрацию воды на уровне насыщения. Моллюсков кормили ежедневно сухими водорослями. Фотопериод был установлен 8:16 ч (день: ночь) в соответствии со временем проведения эксперимента.

Концентрации токсических веществ в растворах также контролировали путём аналитического определения в момент приготовления сред и после 96 ч экспозиции. Пробы собирали до и после воздействия и хранили в течение 1 недели при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до анализа. Производные оловоорганических соединений в воде и тканях моллюсков определяли с помощью газовой хроматографии/масс-спектрометрии (ГХ-МС) в соответствии с протоколом ISO 17353:2004 [ISO..., 2004] и методом, описанным ранее [Metelkova et al., 2022]. Экстракты анализировали в целевом режиме

Selection Ion Monitoring с помощью газового хроматографа/масс-спектрометра GC-QP 2010 (Shimadzu, Япония).

Концентрацию меди в воде и в тканях моллюсков определяли в аттестованной лаборатории (LabGroup, Санкт-Петербург [2024]; RA.RU.21AK94) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре Agilent 7500a по общепринятым методам ISO 3696:1995 (вода) [ISO..., 1995] и ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 (ткани) [ПНД..., 1998]. Точность измерений (выход <5%) контролировали с использованием сертифицированного стандарта (CRM 9055-2008). Содержание металлов в тканях (мкг/г сырой массы) переводили в единицы на сухую массу, предполагая, что сухая масса составляет 20% сырой массы животных.

Смертность и индекс массы тела. Смертность моллюсков определяли в конце эксперимента, подсчитывая процент особей с полураскрытыми раковинами без каких-либо признаков жизни к изначальному количеству моллюсков. Длину раковины (L , см) определяли, как максимальный размер от переднего до заднего края, её измеряли штангенциркулем. Влажную массу моллюсков с раковиной и без неё определяли путём взвешивания на весах Pioneer PX124 (OHAUS Corporation, США) с точностью 0.01 мг. Сухая масса тканей дрейссен составляет 18–20% сырой массы их живой ткани. Зависимость сырой массы моллюсков от длины их панциря выражали степенной функцией и использовали при расчёте показателей.

Индекс массы тела (CI) – есть отношение сухой массы тела (DW) моллюска к массе его раковины (SW), он рассчитывался по формуле: $CI = DW / SW \times 100$.

Скорость потребления кислорода. Экспериментальные исследования скорости

потребления кислорода (СПК) моллюсков проводились в закрытых широкогорлых респирометрах ёмкостью 100 мл. Респирометры промывали этанолом и деминерализованной водой и затем сушили. Бактериальный фон потребления кислорода таким образом был минимизирован. Эти склянки наполняли чистой обогащённой кислородом водой, рассаживали в них по одному моллюску. Затем склянки плотно закрывали и погружали в аквариум с температурой воды 10 °С, воду в котором непрерывно перемешивали. Каждый вид тестировали в 10 повторах на вариант. Контрольные склянки с той же водой, но без моллюсков экспонировались в том же аквариуме. Время экспозиции – 4 ч. Сразу по окончании экспозиции проводили измерение растворённого в воде кислорода при помощи оксиметра (HANNA HI9142), который перед началом измерения калибровали стандартным методом. Величины СПК рассчитывали по разнице между уровнями кислорода в опыте и контроле (вода без животных). Рассчитывали удельные массовые скорости потребления кислорода, то есть количество кислорода, поглощённого на 1 мг сырой массы тела моллюсков. Затем для сравнения эти удельные величины пересчитывались для особи средней массы.

Показатели сердечной активности. Частоту сердечных сокращений у моллюсков оценивали индивидуально у каждой из семи особей обоих видов дрейссен, отобранных случайным образом из каждого варианта эксперимента после окончания 96 ч экспозиции. Миниатюрные датчики с двумя гибкими оптическими волокнами были приклеены с помощью цианакрилатного клея к раковине живых моллюсков в области расположения сердца. Эти датчики подключались к системе регистрации и обработки сигналов сердца. Сигнал формируется за счёт периодических изменений характеристик отражения и рассеяния света полупроводникового лазера низкой интенсивности, обусловленных движением сердечной мышцы моллюска, и его преобразования из оптического сигнала в электрический на фотоплетизмографе. Регистрация частоты сердечных сокращений проводилась на оригинальном фотоплетиз-

мографе (НИЦ Экоконтур, Санкт-Петербург, Россия). Фотоплетизмограмма обрабатывалась с помощью оригинальной статистической программы VarPulse (Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия).

В качестве показателя физиологического состояния моллюсков было использовано время восстановления сердечного ритма моллюсков (Трес, мин) после нагрузочного теста до фонового уровня. Тест состоял в пребывании моллюсков в течение 1 ч без воды на воздухе. Известно, что дрейссены (*D. polymorpha*) способны выдерживать осушение на воздухе при температуре не выше 20 °С более суток без видимых последствий [Алимов и др., 1994]. Ранее для изучения кардиорезистентности дрейссен тест с кратковременным пребыванием на воздухе уже применялся [Berezina et al., 2023]. Этот тест проводили после окончания экспозиции (96 ч) в исследуемых средах с загрязняющими веществами и в контроле при тех же температурных условиях (10 °С). При нахождении на воздухе частота сердечных сокращений моллюсков, как правило, снижается, но после возвращения их в воду сердечный ритм начинает восстанавливаться. Время восстановления ритма сердца вычисляли как период в минутах, необходимый для восстановления частоты сердечных сокращений до фонового уровня (то есть уровня, который был до начала теста).

Статистика. Средние значения и стандартная ошибка были рассчитаны для содержания химических веществ в воде и тканях моллюсков ($n = 3$) и для показателей массы и длины моллюсков ($n = 20$). Статистические отличия индекса массы тела в вариантах эксперимента от контроля и между видами определяли с использованием t -критерия Стьюдента (для $n > 20$, $p < 0.05$). Значения физиологических показателей моллюсков ($n = 7$) для показателей сердечного ритма и $n = 10$ для скорости потребления кислорода) были представлены в виде медиан (50-й процентиль) со стандартным отклонением. Значимость различий этих показателей между видами и вариантами эксперимента анализировали с помощью непараметрического теста

Таблица 2. Средние величины и их ошибки индекса массы тела моллюсков *Dreissena polymorpha* (DP) и *D. bugensis* (DB). Звёздочками отмечены величины, статистически отличные от контроля, n=20.

Вещество	Медь		Трибутилолово	
	DP	DB	DP	DB
1 (контроль)	5.46±0.08	5.03±0.19	5.87±0.17	5.07±0.19
2	5.09±0.19 (<i>p</i> > 0.05)	5.16±0.18 (<i>p</i> > 0.05)	5.28±0.18* (<i>p</i> = 0.025)	5.36±0.16 (<i>p</i> > 0.05)
3	5.38±0.13 (<i>p</i> > 0.05)	5.20±0.21 (<i>p</i> > 0.05)	5.27±0.19* (<i>p</i> = 0.027)	5.41±0.21 (<i>p</i> > 0.05)
4	4.96±0.24 (<i>p</i> > 0.05)	5.00±0.16 (<i>p</i> > 0.05)	5.52 ±0.24 (<i>p</i> > 0.05)	5.09±0.26 (<i>p</i> > 0.05)
5	4.98±0.20* (<i>p</i> = 0.045)	5.07±0.21 (<i>p</i> > 0.05)	5.89 ±0.21 (<i>p</i> > 0.05)	5.45±0.26 (<i>p</i> > 0.05)
6	4.48±0.12* (<i>p</i> = 0.005)	4.45±0.16* (<i>p</i> = 0.049)	–	–

Краскела – Уоллиса с последующим попарным сравнением вариантов при помощи критерия Манна – Уитни. Различия принимались как достоверные при уровне значимости $\alpha \leq 0.05$. Анализы проводили в программном пакете PAST [2024].

Результаты

Определено примерно равное накопление меди обоими видами дрейссен, уровень накопления увеличивался с увеличением содержания меди в среде (рис. 1). Хотя при высоких концентрациях меди (0.5–5 мг/л) бугская дрейссена накапливала большие уровни меди в тканях, чем речная, однако эти различия были статистически незначимы. В отличие от меди, накопление трибутилолова было незначительным и практически не отличалось между вариантами эксперимента и видами дрейссен, составляя 25–30 нг/г сухой массы тканей.

Смертность моллюсков обоих видов не отмечена при концентрациях меди до 500 мк-

г/л, тогда как при концентрациях 1000–5000 мкг/л отмечены случаи гибели моллюсков (рис 2). Смертность речной дрейссены составила 4–7%, а в случае бугской дрейссены она была выше (10–16%). Случаев смертности моллюсков обоих видов не было отмечено при воздействии трибутилолова в концентрации 10–100 нг/л.

Длина раковины моллюсков варьировала от 17 до 24 мм у речной дрейссены и от 24 до 31 мм у бугской. Масса тела моллюсков без раковины и индекс массы тела, изменчивость которого определялась массой моллюска, были отличны между двумя видами (в контроле) согласно тесту Стьюдента, $p = 0.004$. Этот показатель был значимо ниже у бугской дрейссены по сравнению с речной (табл. 2). У обоих видов моллюсков этот индекс был значимо ниже при высоких концентрациях меди в воде, чем в контроле (табл. 2). При остальных концентрациях меди (варианты 2–4) различия с контролем были недостоверными. Во время экспозиции с трибутилоловом индекс

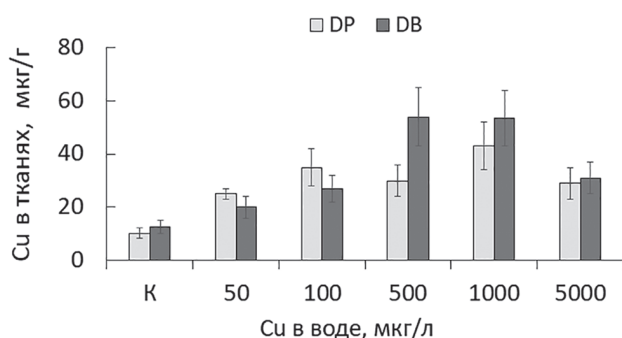


Рис. 1. Биоконцентрация меди (Cu) в теле дрейссен в контроле (К) и при разных концентрациях ионов меди в воде. Виды: DP – *Dreissena polymorpha*, DB – *D. bugensis*.

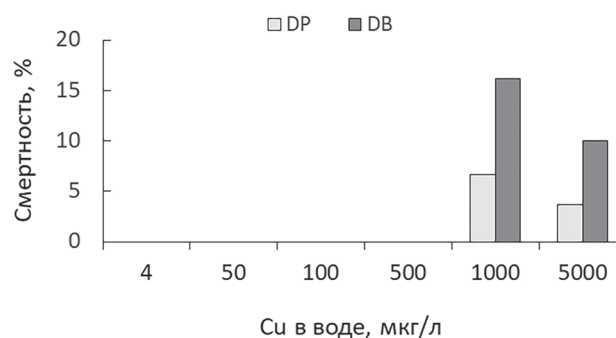


Рис. 2. Смертность (%) моллюсков в контроле (К) и при разных концентрациях меди в воде. Виды: DP – *Dreissena polymorpha*, DB – *D. bugensis*.

массы тела у речной дрейссены в некоторых вариантах (при 10 и 20 нг/л) также снижался относительно контроля. В остальных вариантах (50 и 100 нг/л), хотя и наблюдалась тенденция к его снижению у *D. polymorpha*, но различия были незначительны ($p > 0.05$). Никакого эффекта ТБО на показатели массы бугской дрейссены не обнаружено (все $p > 0.05$, табл. 2).

При воздействии меди наблюдалась примерно сходная динамика реакции со стороны дыхательной активности обоих видов моллюсков (тест Краскела – Уоллиса, DP: $H = 11.13$, $p = 0.049$ и DB: $H = 23.37$, $p = 0.0004$). Отклик моллюсков по этому показателю на присутствие разных концентраций ионов меди был зависимым от дозы и имел колоколообразный характер. Моллюски из варианта с самой низкой концентрацией меди и из контроля по уровню дыхательной активности не отличались, показывая примерно сходный уровень потребления кислорода на единицу массы (рис. 3). Статистически значимое увеличение (почти в 2 раза) по сравнению с контролем было отмечено для обоих видов при концентрации меди 100 мкг/л (тест Манна – Уитни, $p = 0.027$ (DP) и $p = 0.011$ (DB)) и также при 500 мкг/л ($p = 0.012$) для бугской дрейссены. При высоком содержании ионов меди в воде (1 и 5 г/л) величины показателя речной дрейссены были существенно ниже, чем в контроле, но из-за высокой вариабельности этих величин, разница была недо-

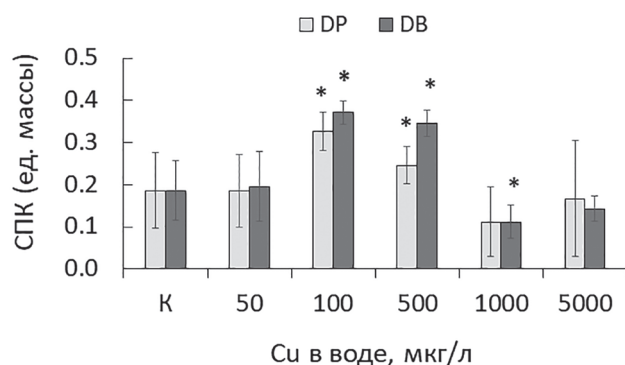


Рис. 3. Удельная скорость потребления кислорода (СПК, мг О/ч) на единицу массы (масса моллюска без раковины, г) дрейссен в контроле (К) и после воздействия разных концентраций меди в воде. Приведены значения медианы и абсолютное отклонение. Виды: DP – *Dreissena polymorpha*, DB – *D. bugensis*. Звёздочкой показаны значимые различия между вариантом и контролем согласно тесту Манна – Уитни, при $p < 0.05$, $n = 10$.

верной. В случае бугской дрейссены интенсивность дыхания при высоких уровнях меди ниже, чем в контроле ($p = 0.036$ и 0.012) и в других вариантах ($p = 0.011$ – 0.046).

Статистически значимая реакция (тест Краскела – Уоллиса, DP: $H = 13.48$, $p = 0.011$ и DB: $H = 18.26$, $p = 0.009$) на дыхательную активность отмечена у особей обоих видов дрейссен, экспонированных при концентрациях трибутилолова от 20 до 100 нг/л, а у бугской дрейссены также при 10 нг/л (рис. 4). Удельные величины потребления кислорода дрейссенами из всех вариантов с этим веществом были в 1.5–1.7 раза выше, чем у контрольных особей (тест Манна – Уитни, $p = 0.002$ – 0.007), кроме варианта 2 в случае речной дрейссены ($p > 0.05$). Бугская дрейссена оказалась более уязвима к присутствию трибутилолова в воде, чем речная дрейссена. Частота сердечных сокращений в контроле варьировала от 11 до 24 ударов/мин у обоих видов (*D. polymorpha* и *D. bugensis*), а в вариантах составила от 9 до 18 ударов/мин. Разница в этом показателе между контролем и вариантами была незначительной у обоих видов ($p > 0.05$).

Время восстановления пульса после теста на воздухе у обоих видов дрейссен увеличивалось по мере увеличения концентрации меди по сравнению с контролем (тест Краскела – Уоллиса, DP: $H = 12.43$; $p = 0.029$ и DB: $H = 21.57$, $p = 0.0002$) (рис. 5). Разница между контролем и вариантами 4 (тест Манна – Уитни, $p = 0.03$), 5 ($p = 0.04$) и 6 ($p = 0.02$) была

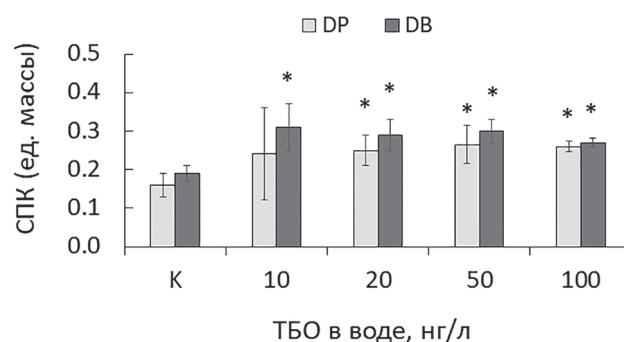


Рис. 4. Удельная скорость потребления кислорода (СПК, мг О/ч) на единицу массы (масса моллюска без раковины, г) дрейссен после воздействия разных концентраций трибутилолова в воде. Приведены значения медианы и абсолютное отклонение. Виды: DP – *Dreissena polymorpha*, DB – *D. bugensis*. Звёздочкой показаны значимые различия между вариантом и контролем согласно тесту Манна – Уитни при $p < 0.05$, $n = 10$.

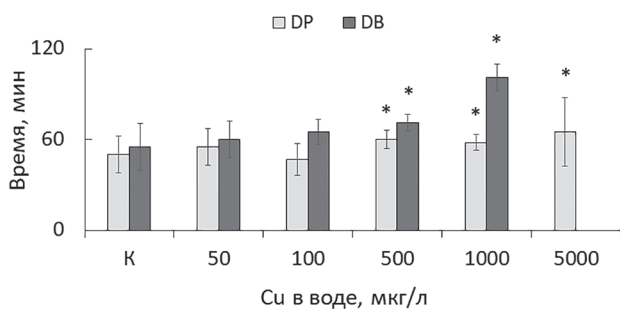


Рис. 5. Время восстановления частоты сердечных сокращений (Трес, минуты) у тестируемых дрейссен в контроле (К) и после воздействия разных концентрациях меди в воде. Приведены значения медианы и абсолютное отклонение. Виды: DP – *Dreissena polymorpha*, DB – *D. bugensis*. Звёздочкой показаны значимые различия между вариантом и контролем согласно тесту Манна – Уитни при $p < 0.05$, $n = 7$.

статистически значимой для речной дрейссены; время, необходимое для восстановления сердечного ритма этой дрейссены было на 10–25 мин больше, чем в контроле. При наибольшей концентрации меди возросла вариабельность показателя времени восстановления сердечного ритма у речной дрейссены (рис. 5).

В случае бугской дрейссены, содержащейся в 1000 мкг/л меди, время восстановления сердечного ритма возрастало почти в 2 раза, от 56 мин у контрольных моллюсков до 103 мин у моллюсков из этого варианта. У особей *D. bugensis*, взятых из концентрации меди 5 мг/л, была отмечена высокая смертность в ходе тестирования на воздухе: 80%, а у *D. polymorpha* она составила 20%, то есть два моллюска из 10 погибло.

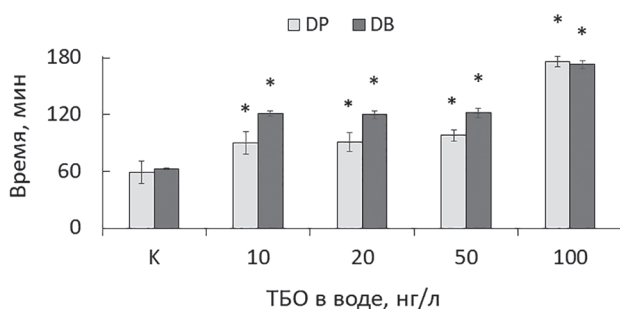


Рис. 6. Время восстановления частоты сердечных сокращений (Трес, минуты) у тестируемых дрейссен в контроле (К) и после воздействия разных концентрациях трибутиллолова (ТБО) в воде. Приведены значения медианы и абсолютное отклонение. Виды: DP – *Dreissena polymorpha*, DB – *D. bugensis*. Звёздочкой показаны значимые различия между вариантом и контролем согласно тесту Манна – Уитни при $p < 0.05$, $n = 7$.

Время восстановления сердечного ритма обоих видов дрейссен при воздействии трибутиллолова во всех вариантах (10–100 нг/л) было в 2 и более раз выше, чем в контроле (тест Краскела – Уоллиса, DP: $H = 24.58$, $p < 0.0001$, Манн – Уитни $p = 0.01–0.011$ и DB: $H = 27.48$, $p < 0.001$; тест Манна – Уитни, все $p < 0.001$, рис. 6). Наибольшие различия с контролем для обоих видов отмечены при содержании 100 нг/л трибутиллолова в воде. Разница между видами дрейссен по этому показателю также значительна, практически во всех вариантах (кроме последнего варианта) для восстановления сердечного ритма *D. bugensis* требовалось на 27–35 мин больше времени, чем *D. polymorpha*.

Обсуждение

Тенденция наибольшего накопления меди в тканях дрейссен прослеживалась при высоких концентрациях меди (0.5 и 1 мг/л). Эти концентрации меди в воде считаются летальными для моллюсков. Сублетальные концентрации для меди LC_{50} (96 ч) = 200–500 мкг/л [Pipe et al., 1999]. Накопление ионов меди у *D. bugensis* несколько выше, чем у *D. polymorpha*, что можно объяснить более высоким содержанием общих липидов у первого вида [Schäfer et al., 2012]. Кроме того, способность к аккумуляции металлов у *D. bugensis* может быть связана и с её более высокой скоростью фильтрации и эффективностью усвоения пищи, чем у речной дрейссены [Baldwin et al., 2002]. Также, выявлены различия в индексе массы тела между этими видами, что также отчасти может влиять на уровни аккумуляции меди.

Содержание меди в тканях моллюсков возрастало с повышением концентрации меди в водной среде, что подтверждает, что именно воздействие меди и стало причиной наблюдаемых отклонений в изученных физиологических показателях обоих дрейссен, которых не было выявлено у моллюсков в контроле. Максимальные уровни накопления в случае *D. polymorpha* и *D. bugensis* за 96 ч составили 43 и 54 мкг/г сухой массы, соответственно. Эти величины примерно в 4 раза превышали уровни меди в контрольных моллюсках. Возможно, накопление меди

моллюсками будет достигать и больших величин при увеличении времени экспозиции. Например, по данным Г.А. Колючкиной и А.Д. Исмаилова [2011] в случае эксперимента с моллюском-вселенцем – анадарой (*Anadara cf. inaequalis*), уровень накопления меди в тканях составил 130–152 мкг/г сухой массы на 7-е сут воздействия ионов этого металла, а при экспонировании моллюсков в сходных с нашими концентрациями уровни накопившейся меди в их тканях были в 20 раз выше, чем в контроле (7.72 мкг/г). В загрязнённых водоёмах Франции концентрации содержания меди в тканях *D. polymorpha* варьировало от 30 до 240 мкг/г сухой массы [Mersch et al., 1996]. В мидиях (*Mytilus edulis*) медь при низких концентрациях в воде сначала вызвала небольшое снижение содержания этого металла в теле, но при концентрациях меди > 10 мкг/л накапливалась пропорционально содержанию в воде; степенная функция может быть применена для описания связи между концентрациями во внешней среде и содержанием биоаккумулированной меди в тканях моллюсков при воздействии меди в пределах от 10 до 1000 мкг/л [Amiard et al., 1987].

Стандарты качества для оловоорганических соединений, а также минимальные концентрации трибутилолова, при которых происходит воздействие на жизнедеятельность водных организмов, ещё не выяснены. Предыдущие исследования токсического воздействия трибутилолова выявили значительное воздействие на все функции организмов при экспериментальном воздействии трибутилолова в микрограммах на литр [Sousa et al., 2005]. Летальные концентрации этого вещества находятся в диапазоне от 40 нг/л до 16 мкг/л при кратковременном воздействии, в зависимости от видовой принадлежности организма [WHO..., 1990]. Острый 10-й процентиль для пресноводных видов составил 103 нг/л [Hall et al., 2000]. Обнаруживаемые аналитическими методами в природной воде количества ТБО составляли 20–25 нг/л [Kurrijanov et al., 2021].

Накопление дрейссенами трибутилолова за период экспозиции (96 ч) было низким, от 20 до 30 нг/г сухой массы, что связано с коротким временем воздействия. Например,

при длительном 40 сут воздействии 100 нг/л трибутилолова, это вещество накапливалось в моллюсках в больших концентрациях, до 130 нг/г сухой массы моллюска [Berezina et al., 2024]. Было обнаружено, что в тканях *D. polymorpha*, обитающей в загрязнённых озёрах, может содержаться от 200 нг/г до 9 мкг/г сырой массы трибутилолова [Fent, Hunn, 1995].

Различия в реакции на токсичные вещества между видами наблюдались по таким показателям, как выживаемость, потребление кислорода и время восстановления частоты сердечных сокращений. Также наблюдалось снижение индекса массы тела (похудение) у обеих дрейссен при воздействии медью, а у речной дрейссены – также в присутствии трибутилолова, что свидетельствует об отрицательном влиянии этих загрязняющих веществ на функционирование всего организма. Оценку уровня потребляемого кислорода можно считать хорошим показателем для оценки физиологического состояния моллюсков, подвергшихся воздействию загрязняющих веществ, и важным показателем их активности. Когда дрейссены подвергались воздействию средних концентраций меди (100–500 мкг/л) и всех концентраций трибутилолова (10–100 нг/л), у обоих видов наблюдалось увеличение уровня потребляемого кислорода, что демонстрировало признаки стресса, а также способность моллюсков в таких условиях контролировать свой метаболизм за счёт увеличения дыхательной активности. Однако при высоких уровнях меди (1 и 5 мг/л) интенсивность дыхания дрейссен резко снижалась, свидетельствуя об угнетении дыхания, снижении метаболизма и необратимом токсическом действии вещества. Другие исследования выявили такое же влияние воздействия высоких концентраций меди на дыхательную активность моллюсков *Corbicula striatella* [Mahajan, Zambare, 2001]. Механизм действия избыточных количеств меди (>500 мкг/л) на моллюсков заключается в ингибировании ферментов, содержащих сульфгидрильные группы (глутатион, липоевая кислота) и угнетении активности цитохромоксидазы и аминоксидазы [Peters, Blumenstock 1967; Simkiss, Mason, 1983]. Такие изменения при-

водят к нарушению энергетического обмена клеток и общей адаптивности моллюсков.

При высоких концентрациях меди (5 мг/л) выявлена высокая смертность и долгое восстановление сердечного ритма после воздействия для бугской дрейссены, что свидетельствует о её слабой адаптивности к загрязнению воды. Как правило, загрязнение медью окружающей среды вызывает острую реакцию со стороны кардиосистемы двустворчатых моллюсков [Depledge et al., 1995; Curtis et al., 2000; Braby, Somero, 2006; Kholodkevich et al., 2017]. На первый взгляд удивительно, что частоты сердечных сокращений моллюсков при воздействии загрязняющих веществ существенно не отличались от контроля в нашем случае и в других исследованиях [Bakhtmet et al., 2012]. Это объясняется тем, что избыток меди или других загрязнителей не оказывает прямого влияния на сократительные функции сердечных мышц [Curtis et al., 2000], а главным образом снижает общую адаптивность организма к стрессу. Например, показано, что высокие концентрации меди в воде влияли на активность ряда физиологических функций, компенсируя стабильность частоты сердечных сокращений [Curtis et al., 2001]. При стресс-тестировании моллюсков наблюдалась реакция не со стороны частоты сердечных сокращений, а времени восстановления сердечного ритма до исходного уровня. Поскольку исследование ответной реакции кардиосистемы дрейссен на различные концентрации меди проведено впервые, можно рекомендовать использование применённого подхода для оценки физиологического состояния дрейссен и других моллюсков при изучении влияния на них разных внешних воздействий.

Ранее была выявлена бóльшая чувствительность к обоим веществам бугской дрейссены, чем речной дрейссены не только на организменном уровне, но и на биохимическом [Berezina et al., 2024]. Также были обнаружены различия между двумя видами в стратегиях регуляции активных форм кислорода [Evariste et al., 2018], которые могут влиять на реакцию видов, испытывающих стресс от загрязнения. Наблюдаемые различия между видами дрейссен, вероятнее всего, связаны и

с более высоким окислительно-восстановительным метаболизмом бугской дрейссены по сравнению с речной. Активность антиоксидантных ферментов у *D. bugensis* статистически значимо выше, чем у *D. polymorpha*: каталазы – в 2 раза, и глутатион-S-трансферазы – в 3.6 раза, а содержание малонового диальдегида – в 3 раза, что указывает на более высокую интенсивность процессов перекисного окисления липидов в её тканях [Климова, Чуйко, 2015]. Эти данные подтверждаются и тем, что у *D. bugensis* в нормальных условиях потребление кислорода в 1.2 раза выше, чем у *D. polymorpha* [Алимов и др., 1994]. В контроле уровень потребления кислорода у бугской дрейссены был существенно выше, чем у речной дрейссены и в наших экспериментах.

Таким образом, с одной стороны, чтобы не вносить систематическую ошибку при изучении реакции дрейссен на загрязнения важно разделять эти два вида. С другой стороны, наши данные показывают лучшую адаптивность речной дрейссены к выбранным токсикантам, которые обнаруживаются в природных водах, что может способствовать дальнейшей экспансии вида и давать ей преимущества в конкурентном сосуществовании с бугской дрейссеной. В то же время, по-видимому, для целей биоиндикации более эффективным видом при исследовании загрязнения воды медью и оловоорганическими соединениями будет бугская дрейссена.

Выводы

Результаты показали различия в физиологических реакциях на загрязнение водной среды между изученными видами дрейссен (*D. polymorpha* и *D. bugensis*). Бугская дрейссена была более уязвима к воздействию токсических веществ (меди и трибутилолова) по показателям смертности, сердечным и метаболическим биомаркерам. Кроме того, в большинстве случаев её реакции были менее выражены (из-за высокой вариабельности величин), хотя и совпадали с закономерностями, наблюдаемыми у речной дрейссены. Одновременное использование комплекса биомаркеров здоровья на уровне организма, отражающих различные функции, таких, как

индекс массы тела, метаболическая активность (скорость потребления кислорода), резистентность кардиосистемы (восстановление частоты сердечных сокращений после стрессовой нагрузки) показало хороший подход к экспериментальному изучению токсичности загрязняющих веществ по отношению к дрейссенам, перспективный для дальнейших исследований их толерантности к неблагоприятным факторам окружающей среды.

Благодарности

Выражаем благодарность администрации ИБВВ РАН за предоставление судна для сбора дрейссен и З.А. Жаковской за ценные рекомендации.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по госзаданиям № 122031100274-7, 122041100085-8, 121050500046-8 и 124032500015-7, а также Программой приграничного сотрудничества России и Эстонии, проект ER90 HAZLESS (2019–2022 гг.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

При экспериментах с животными соблюдались этические нормы. Разрешение № 1-5/19-02-2024 предоставлено Комиссией по биоэтике ЗИН РАН в рамках проекта: «Влияние тяжёлых металлов, оловоорганических соединений, фенолов и нефтепродуктов на физиологические показатели амфипод и моллюсков в экспериментах».

Литература

- Алимов А.Ф., Андреев Н.И., Андреева С.И. и др. Дрейссена: *Dreissena polymorpha* (Pall.) (Bivalvia, Dreissenidae): Систематика, экология, практическое значение / Отв. ред. Я.И. Старобогатов. М.: Наука, 1994. 238 с.
- Богатов В.В., Богатова Л.В. Аккумуляция тяжёлых металлов пресноводными гидробионтами в горнорудном районе юга Дальнего Востока России // Экология. 2009. № 3. С. 202–208.
- Климова Я.С., Чуйко Г.М. Антиоксидантный статус пресноводных двустворчатых моллюсков *Dreissena polymorpha* и *D. bugensis* (Dreissenidae, Bivalvia) из волжского плёса Рыбинского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2015. 1. С. 33–41.
- Колочкина Г.А., Исмаилов А.Д. Морфофункциональные особенности двустворчатых моллюсков при экспериментальном загрязнении среды тяжёлыми металлами // Океанология. 2011. 51 (5). С. 857–866.
- Петухова Г.А. Моллюски как чувствительные тест-индикаторы состояния перифитона при действии антропогенного пресса загрязнителей // Вестник Тюменского государственного университета. 2005. 5. С. 97–100.
- ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Методика выполнения измерений содержания металлов в твёрдых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1998.
- Шулькин В.М., Кавун В.Я. Долговременный мониторинг загрязнения прибрежной акватории Уссурийского залива металлами на примере «зелёных» устриц *Magallana gigas* (= *Crassostrea gigas*) (Thunberg, 1793) // Биология моря. 2023. 49 (2). С. 105–113. 10.31857/S0134347523020079.
- Amiard J.C., Triquet C., Berthet B., Metayer C. Comparative study of the patterns of bioaccumulation of essential (Cu, Zn) and non-essential (Cd, Pb) trace metals in various estuarine and coastal organisms // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 1987. 106. 73–89.
- Bakhmet I.N., Kantserova N.P., Lysenko L.A., Nemova N.N. Effect of copper and cadmium ions on heart function and calpain activity in blue mussel *Mytilus edulis* // Journal of Environmental Science and Health. Part A. 2012. 47. 1528–1535.
- Baldwin B.S., Mayer M.S., Dayton J., Pau N., Mendilla J., Sullivan M., Moore A., Ma A., Mills E.L. Comparative growth and feeding in zebra and quagga mussels (*Dreissena polymorpha* and *Dreissena bugensis*): implications for North American lakes // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2002. 59 (4). 680–694. <https://doi.org/10.1139/f02-043>
- Berezina N., Maximov A., Sharov A., Gubelit Y., Kholodkevich S. Environmental assessment with cage exposure in the Neva estuary, Baltic Sea: metal bioaccumulation and physiologic activity of bivalve molluscs // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. 11 (9). 1756. <https://doi.org/10.3390/jmse11091756>
- Berezina N.A., Sharov A.N., Yurchenko V.V., Morozov A.A., Malysheva O.A., Kukhareva G.I., Zhakovskaya Z.A. Responses of zebra and quagga mussels to copper and tributyltin exposure: bioconcentration, metabolic and cardiac biomarkers // Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Toxicology & Pharmacology. 2024. 283. 109967. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2024.109967>
- Braby C., Somero G. Following the heart: Temperature and salinity effects on heart rate in native and invasive species of blue mussels (genus *Mytilus*) // The Journal of experimental biology. 2006. 209. 2554–2566. <https://doi.org/10.1242/jeb.02259>

- Curtis T.M., Williamson R., Depledge M.H. The initial mode of action of copper on the cardiac physiology of the blue mussel, *Mytilus edulis* // *Aquatic Toxicology*. 2001. 52. 29–38.
- Curtis T.M., Williamson R., Depledge M.H. Simultaneous, long-term monitoring of valve and cardiac activity in the blue mussel *Mytilus edulis* exposed to copper // *Marine Biology*. 2000. 136. 837–846.
- Cuthbert R.N., Pattison Z., Taylor N.G., Verbrugge L., Diagne C., Ahmed D.A., Leroy B., Angulo E., Briski E., Capinha C., Catford J.A., Dalu T., Essl F., Gozlan R.E., Haubrock P.J., Kourantidou M., Kramer A.M., Renault D., Wasserman R.J., Courchamp F. Global economic costs of aquatic invasive alien species // *Science of the Total Environment*. 2021. 775. e145238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145238>
- Depledge M.H., Aagaard A., Györkös P. Assessment of trace metal toxicity using molecular, physiological and behavioral biomarkers // *Marine Pollution Bulletin*. 1995. 31. 19–27.
- Evariste L., David E., Cloutier P.L., Brousseau P., Auffret M., Desrosiers M., Emilie Groleau P., Fournier M., Betoulle S. Field biomonitoring using the zebra mussel *Dreissena polymorpha* and the quagga mussel *Dreissena bugensis* following immunotoxic responses. Is there a need to separate the two species? // *Environmental Pollution*. 2018. 238. 706–716. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.098>
- Fent K., Hunn J. Organotins in freshwater harbors and rivers: temporal distribution, annual trends and fate // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1995. 14. 1123–1132.
- Hall L.W., Scott M.C., Killen W.D., Unger M.A. A probabilistic ecological risk assessment of tributyltin in surface waters of the Chesapeake Bay watershed // *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2000. 141–179.
- Higgins S.N., Vander Zanden M.J. What a difference a species makes: a meta-analysis of dreissenid mussel impacts of freshwater ecosystems // *Ecological Monographs*. 2010. 80. 179–96.
- ISO 17353:2004. International Organization for Standardization. Water quality – Determination of selected organotin compounds – Gas chromatographic method.
- ISO 3696:1995. Water for analytical laboratory use – Specification and test methods.
- Karatayev A.Y., Burlakova L.E., Padilla D.K. Zebra versus quagga mussels: a review of their spread, population dynamics, and ecosystem impacts // *Hydrobiologia*. 2015. 746. 97–112.
- Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Sharov A.N., Sharov A.N., Kurakin A.S., Lips U., Kolesova N., Lehtonen K.K. Applicability of a bioelectronic cardiac monitoring system for the detection of biological effects of pollution in bioindicator species in the Gulf of Finland // *Journal of Marine Systems*. 2017. 171. 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.12.005>
- Klimova Y.S., Chuiko G.M., Gapeeva M.V., Pesnya D.S. The use of biomarkers of oxidative stress in zebra mussel *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) for chronic anthropogenic pollution assessment of the Rybinsk Reservoir // *Contemporary Problems of Ecology*. 2017. 10. 178–183.
- Knoll L., Sarnelle O., Hamilton S., Kissman C., Wilson A., Rose J., Morgan M. Invasive zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) increase cyanobacterial toxin concentrations in low-nutrient lakes // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2008. 65. 448–455. <https://doi.org/10.1139/F08-182>.
- Kuprijanov I., Väli G., Sharov A., Berezina N., Liblik T., Lips U., Kolesova N., Maanio J., Junttila V., Lips I. Hazardous substances in the sediments and their pathways from potential sources in the eastern Gulf of Finland // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. 170. 112642.
- LabGroup, Санкт-Петербург // (<http://ecolabspb.ru>). Accessed 3. 03.2024.
- Mersch J., Wagner P., Pihan J.-C. Copper in indigenous and transplanted zebra mussels in relation to changing water concentrations and body weight // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1996. 15. 886–893.
- Metelkova L., Zhakovskaya Z., Kukhareva G., Voskoboinikov G., Zimina O. Organotin compounds (OTs) in surface sediments, bivalves and algae from Russian coast of the Barents Sea (Kola Peninsula) and the Fram Strait (Svalbard Archipelago) // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. 29. 34659–34669. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18091-0>
- PAST // (<https://past.en.lo4d.com/>). Accessed 3. 03.2024.
- Peters T.Jr., Blumenstock F.A. Copper-binding properties of bovine serum albumin and its aminoterminal peptide fragment // *Journal of Biological Chemistry*. 1967. 242 (7). 1574–1578.
- Pipe R.K., Coles J.A., Carissan F.M.M., Ramanathan K. Copper induced immunomodulation in the marine mussel, *Mytilus edulis* // *Aquatic Toxicology*. 1999. 46. 43–54.
- Raikow D.F., Sarnelle O., Wilson A.E., Hamilton S.K. Dominance of the noxious cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in low-nutrient lakes is associated with exotic zebra mussels // *Limnology & Oceanography*. 2004. 49. 482–487.
- Reynolds S.A., Aldridge D.C. Impacts of invasive quagga mussels (*Dreissena rostriformis bugensis*) on reservoir water quality, as revealed by progressive-change BACIPS analysis // *Water Research*. 2021. 197. 117105. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117105>
- Schäfer S., Hamer B., Treursić B., Möhlenkamp C., Spira D., Korlević M., Reifferscheid G., Claus E. Comparison of bioaccumulation and biomarker responses in *Dreissena polymorpha* and *D. bugensis* after exposure to resuspended sediments // *Archives of environmental contamination and toxicology*. 2012. 62. 614–27.
- Simkiss K., Mason A.Z. Metal ions: metabolic and toxic effects // *The Mollusca* / Ed. P.W. Hochachka. New York: Academic Press, 1983. P. 101–164.
- Sousa A., Génio L., Mendo S., Barrosi C. Comparison of the acute toxicity of tributyltin and copper to veliger larvae of *Nassarius reticulatus* (L.) // *Applied Organometallic Chemistry*. 2005. 19. 324–328.
- Vanderploeg H.A., Liebig J.R., Carmichael W.W., Agy M., Johengen T.H., Fahnenstiel G.L., Nalepa T.F. Zebra

- mussel (*Dreissena polymorpha*) selective filtration promoted toxic *Microcystis* blooms in Saginaw Bay (Lake Huron) and Lake Erie // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2001. 58. 1208–1221.
- Vanderploeg H.A., Sarnelle O., Liebig J.R., Morehead N.R., Robinson S.D., Johengen T.H., Horst G.P. Seston quality drives feeding, stoichiometry and excretion of zebra mussels // Freshwater Biology. 2017. 62. 664–680. <https://doi.org/10.1111/fwb.12892>
- Waller D., Pucherelli S., Barbour M., Tank S., Meulemans M., Wise J., Dahlberg A., Aldridge D.C., Claudi R., Cope W.G., Gillis P.L., Kashian D.R., Mayer D., Stockton-Fiti K., Wong W.H. Review and development of best practices for toxicity tests with dreissenid mussels // Environmental Toxicology and Chemistry. 2023. 42. 1649–1666.
- WHO. World Health Organization, Tributyltin Compounds, UNEP, WHO, Environmental Health Criteria. Geneva, Switzerland, 1990.
- Zambare S., Mahajan A.Y. Heavy metal (copper and mercury) induced alterations in the enzyme secretory activity of hepatopancreas of a freshwater bivalve *Corbicula striatella* // Pollution Research. 2001. 20. 143–146.

INFLUENCE OF WATER POLLUTION WITH COPPER AND TRIBUTYLTIN ON THE PHYSIOLOGICAL INDICATORS OF TWO DREISSENIIDS (*DREISSENA POLYMORPHA* AND *D. BUGENSIS*)

© 2024 Berezina N.A.^{a, *}, Sharov A.N.^{b, c, **}, Kholodkevich S.V.^{b, c, ***}, Kukhareva G.I.^c

^a Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199034, Russia

^b Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences, Borok, 152742, Russia

^c St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russia
e-mail: *nadezhda.berezina@zin.ru, **sharov@ibiw.ru, ***kholodkevich@mail.ru

This research focuses on the physiological indicators of zebra and quagga mussels, such as metabolic activity (oxygen consumption level), body mass index and cardiac resistance (restoration of the heart rhythm after exercise), when water is polluted with copper and tributyltin compounds. The results revealed differences in the physiological responses of two zebra mussel species (*Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) and *D. bugensis* (Andrusov, 1897)) to pollution of the aquatic environment with these substances. Quagga mussels were more vulnerable than zebra mussels to copper and tributyltin in terms of mortality, heart rate biomarkers, and metabolic activity. Exposure to these compounds has also led to a decrease in body mass index in zebra mussels in some cases. Both dreissenid species exposed to copper exhibited similar levels of respiratory activity, with a dose-dependent bell-shaped response. Mollusks from the treatment with the lowest copper concentration (50 µg/l) and the control did not differ in the level of respiratory activity. However, at average copper concentrations of 100 µg/l and 500 µg/l, zebra mussels showed a statistically significant increase in respiration intensity, and at high copper levels (1 and 5 mg/l) – a significant decrease. Exposure to organotin compounds also significantly affected the respiratory activity of both zebra mussel species, leading to an increase in oxygen consumption by 1.5–1.7 times compared to the control. Quagga mussels were more sensitive to the presence of tributyltin than zebra mussels. As a result of the study, zebra mussel heart rate recovery time increased with increasing copper concentration (from 100 µg/l to 5 mg/l), such that mussels required 10–25 minutes longer to recover heart rate than controls. In the case of quagga mussels, the time for recovery of heart rate at high copper concentrations (1000 µg/l) almost doubled (up to 103 minutes) compared to the control (56 minutes). Both dreissenid species showed significantly longer heart rate recovery times when exposed to tributyltin (10–100 ng/l) than controls. The largest differences were observed at 100 ng/l tributyltin, with *D. bugensis* taking 27–35 minutes longer to recover heart rate than *D. polymorpha*. Our data showed that the better resistance of the zebra mussels to toxicants in water can contribute to its further expansion and successful competition with quagga mussels. However, quagga mussels may be a more effective as an indicator species at monitoring of water pollution with copper and organotin compounds.

Key words: mollusks, oxygen consumption rate, energy metabolism, heart rate, body weight, water pollution.