

ИНТЕНСИВНОСТЬ ДЫХАНИЯ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ *DREISSENA POLYMORPHA* ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

С. В. Сладкова^{1, *}, С. В. Холодкевич^{1, 2}

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН,
197110 Санкт-Петербург, Корпусная ул., д. 18, e-mail: *sladkova_sv1@mail.ru

²Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н

Поступила в редакцию 11.10.2024

Проведено экспериментальное изучение воздействия тяжелых металлов — кадмия (Cd^{2+}), меди (Cu^{2+}) и цинка (Zn^{2+}), на интенсивность аэробного метаболизма (дыхания) двустворчатых моллюсков *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), количественно оцениваемое по скорости потребления кислорода. Установлено, что кратковременное токсическое воздействие тяжелых металлов на функциональное состояние моллюсков приводит к снижению ими скорости потребления кислорода, а при длительном — к замыканию створок раковины и полному угнетению аэробного дыхания. Наиболее токсичным для моллюсков является Cd^{2+} , для которого показан концентрационно-зависимый эффект. Изменение скорости потребления кислорода моллюсками предлагается использовать в качестве биомаркера функционального состояния моллюсков и экотоксикологической оценки качества среды их обитания.

Ключевые слова: интенсивность дыхания, скорость потребления кислорода, функциональное состояние, тяжелые металлы, *Dreissena polymorpha*.

DOI: 10.47021/0320-3557-2025-40-46

ВВЕДЕНИЕ

Способность изменять энергетический обмен в стрессовых условиях выработана у животных в процессе эволюции и является их важнейшей преадаптацией к изменению условий среды [Бигон и др., 1989 (Bigon et al., 1989)]. Изменение скорости аэробного метаболизма — один из наиболее общих физиологических ответов на стресс, вызванных загрязнением среды обитания, т.к. он интегрирует в себе изменения скорости обменных процессов на молекулярном уровне [Моисеенко, 2009 (Moiseenko, 2009)]. Поэтому интенсивность аэробного метаболизма гидробионтов, измеряемая по скорости дыхания (потребления кислорода) обитающих в водной экосистеме биоиндикаторных организмов, может служить интегральным показателем качества водной среды [Колупаев, 1992 (Kolupaev, 1992); Spicer, Weber, 1991; Martin et al., 2007; Yancheva et al., 2017]. Преимущество использования этого показателя, изменение которого, как правило, связано с попыткой организма избежать или компенсировать неблагоприятные воздействия, заключается в возможности обнаружения начальных эффектов влияния загрязнителей на живой организм. Подход, заключающийся в измерении потребления кислорода при максимальной физической нагрузке (V_{O_2max}), используется для оценки функциональных возможностей кардиореспираторной системы животных и человека [Dlugosz et al., 2013; Sharov et al., 2023]. Мак-

симальная скорость потребления кислорода (V_{O_2max}) обычно устанавливает верхний предел интенсивности работы (например, скорости передвижения), которую животное может выдерживать без усталости, и является критерием аэробной мощности. Например, для людей рекомендуется регулярно оценивать кардиореспираторную функцию, количественно измеряемую как V_{O_2max} , и использовать ее в качестве клинического показателя жизнедеятельности [Ross et al., 2016].

Находясь в условиях загрязнения среды обитания, двустворчатые моллюски демонстрируют две стратегии поведения. Одна заключается в попытке адаптироваться с помощью компенсаторных механизмов, которые требуют дополнительной энергии и, соответственно, увеличения скорости потребления кислорода. Вторая предполагает изолирование от внешней среды за счет закрытия створок и длительного нахождения в таком состоянии, что сопряжено с уменьшением скорости потребления кислорода. Выбор стратегии зависит от многих факторов, в том числе и от концентрации токсиканта в среде [Salánki et al., 2003; Molnar, Fong, 2012; Sladkova et al., 2019]. При этом обе стратегии приводят к истощению энергетических ресурсов организма, что сказывается на функциональном состоянии моллюсков. Это истощение выявляется с помощью дополнительной функциональной нагрузки, например, вынужденной физической активно-

сти, требующей повышенных затрат энергии. Для двустворчатых моллюсков *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) в качестве такой активности можно рассматривать двигательную активность раскрывания створок и активную фильтрацию при помещении их в воду после экспозиции на воздухе. При этом экспозиция на воздухе выполняет функцию стрессового фактора и приводит к закрытию створок, а последующее помещение в чистую воду приводит к открытию створок и активной фильтрации воды, что можно рассматривать в качестве вынужденной активности.

Тяжелые металлы (ТМ) являются токсичными, не поддающимися биологическому разложению стойкими загрязнителями окружающей среды. На сегодняшний день загряз-

нение природных экосистем ТМ, особенно кадмием, остается одной из серьезных экологических проблем во всем мире [Моисеенко, 2019 (Moiseenko, 2009)]. Моллюски, в том числе двустворчатые, часто используются в качестве подходящих “биомониторов” загрязнения среды ТМ, поскольку они ведут малоподвижный образ жизни и являются активными фильтраторами [Naimo, 1995; Camusso et al., 2001; Ogunola, 2017; Klimova et al., 2020].

Цель работы — экспериментальное изучение влияния разных концентраций ТМ на функциональное состояние двустворчатых моллюсков *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), оцениваемое по интенсивности аэробного дыхания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моллюсков *Dreissena polymorpha* для эксперимента отлавливали в южной части Волжского плеса Рыбинского водохранилища вблизи пос. Борок (58°02.4' с.ш., 38°17.4' в.д.) в июне 2020 г. Одинакового размера моллюсков массой 1.1 ± 0.2 г по 20 экз. помещали в 12 пластиковых контейнеров (20 л) с отстоянной водопроводной водой и акклимировали к лабораторным условиям в течение 7 сут в климатической комнате при температуре 17°C и режиме освещенности 12 ч света/12 ч темноты. На 8-е сут в десять контейнеров из расчета двух повторностей были добавлены соли следующих ТМ в соответствующих концентрациях, рассчитанных по иону металлу: CdCl_2 — 0.1 и 0.5 мг/л, CuCl_2 — 0.035 и 0.35 мг/л, ZnCl_2 — 0.2 и 2 мг/л. Минимальные значения меди и цинка выбирались исходя из содержания по данным многолетних наблюдений этих металлов в сточных водах мегаполиса (на примере г. Санкт-Петербург). Кадмий использован в качестве модельного токсиканта. Контролем служили моллюски, находящиеся в двух контейнерах без добавления ТМ. В течение периода акклимации и во время проведения эксперимента моллюсков кормили суспензией одноклеточных водорослей *Chlorella vulgaris* Beijer, 1890 из лабораторной культуры, добавляя раз в трое суток 1 мл суспензии плотностью $\sim 5 \times 10^7$ кл./л. На следующий день после кормления воду с заданными концентрациями ТМ меняли на аналогичную, тем самым постоянно поддерживая расчетную концентрацию металлов в растворах.

Через 24, 72 ч и 10 сут экспозиции к ТМ и в контроле у моллюсков индивидуально определялась скорость потребления кислорода. Для этого по 6 моллюсков изымали из экс-

периментальных контейнеров и по одному размещали в пластиковые прозрачные респирометры объемом 100 мл. В течение 5 мин моллюсков выдерживали без воды для стимуляции последующей дыхательной активности, а затем респирометр заполняли аэрированной (до насыщения) отстоянной водопроводной водой без пузырьков воздуха и герметично закрывали крышкой, в которую вставлены полярографический электрод кислородомера и лопасть для механического перемешивания воды (рис. 1). Респирометры опускали в емкость с водой во избежание возможного попадания воздуха при перемешивании и измеряли концентрации растворенного в воде кислорода. Длительность нахождения моллюсков в респирометре составляла 120 мин, концентрация кислорода в респирометре в течение 30 мин измерялась каждые 5 мин, а далее — каждые 10 мин. Концентрацию кислорода измеряли портативным оксиметром HI 9142 (Hanna Instruments, Германия) с автоматической температурной компенсацией и погрешностью измерения 2.5% (рис. 1). В момент измерения воду перемешивали для равномерного распределения растворенного кислорода в респирометре в течение 2 мин. За это время показания оксиметра полностью стабилизировались. Предварительно, в качестве фона, аналогичным образом измеряли динамику концентрации кислорода в респирометре без моллюска.

После окончания экспериментов моллюсков обсушивали на фильтровальной бумаге, а затем мгновенно умерщвляли путем помещения на несколько минут в жидкий азот. Далее мягкие ткани моллюсков извлекали из раковины и измеряли их влажную массу. Интенсивность потребления кислорода каж-

дым моллюском рассчитывалась в $\text{мгO}_2/\text{ч}\times\text{г}$ влажной массы по формуле:

$$V_{\text{O}_2} = 60[\text{C}_{\text{O}_2}(t_1) - \text{C}_{\text{O}_2}(t_2)]V/(t_1 - t_2)W,$$

где V_{O_2} — скорость потребления кислорода ($\text{мгO}_2/\text{ч}\times\text{г}$), t_1, t_2 — время начала и конца интервала (мин), $\text{C}_{\text{O}_2}(t)$ — концентрация кислорода в среде в момент времени t (мг/л), V — объем сосуда (л), W — влажная масса (г). $\text{C}_{\text{O}_2}(t_2)$ — корректируется на величину фона, если величина фона превышает 5%.

Все полученные данные обрабатывали статистически и представляли в виде среднего арифметического \pm стандартная ошибка ($\bar{x} \pm \text{SD}$). Для анализа различий использовали t-критерий Стьюдента для независимых величин. За достоверные принимались различия средних значений при уровне значимости $p \leq 0.05$.



Рис. 1. Блок-схема (а) и общий вид экспериментальной установки для измерения скорости потребления кислорода одновременно у трех моллюсков (б).

Fig. 1. Measuring the rate of oxygen consumption in zebra mussels: block diagram of the method (a) and general view of the experimental setup for measuring respiration simultaneously in three mollusks (b).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы типичной динамики концентрации кислорода в респирометре с моллюсками из контроля и после экспонирования в растворах с разными концентрациями ТМ представлены на рис. 2.

Во время измерения концентрации кислорода у моллюсков из контроля створки их раковин были открыты и сифоны выдвинуты наружу. Динамика снижения концентрации кислорода в воде респирометра в течение всего времени измерения носила линейный характер, из чего следует, что скорость потребления кислорода моллюсками была стабильно равномерной. Интенсивность потребления кислорода у них равнялась $0.413\text{--}0.448 \text{ мгO}_2/\text{ч}\times\text{г}$, мало изменяясь в течение 10 сут эксперимента (см. таблицу).

Через 24 ч экспозиции во всех вариантах солей ТМ линейность динамики снижения концентрации кислорода в респирометре с моллюсками сохранялась, однако угол наклона ли-

нии тренда уменьшался (рис. 2). При этом интенсивность потребления ими кислорода снижалась пропорционально увеличению концентрации металла (см. таблицу). Однако статистически значимо это снижение было только в растворах кадмия, а для остальных металлов — на уровне устойчивой тенденции.

Через 72 сут экспозиции моллюсков в обеих концентрациях кадмия при их тестировании в респирометре створки раковины оставались закрытыми во время измерения, и концентрация кислорода в воде практически не изменялась (рис. 2). Потребление кислорода у них отсутствовало (см. таблицу). При экспозиции в разных концентрациях солей меди и цинка моллюски сохранили пониженный уровень потребления кислорода, сходный с тем, что они демонстрировали через 24 ч. Статистическая значимость снижения, в основном, была на уровне тенденции.

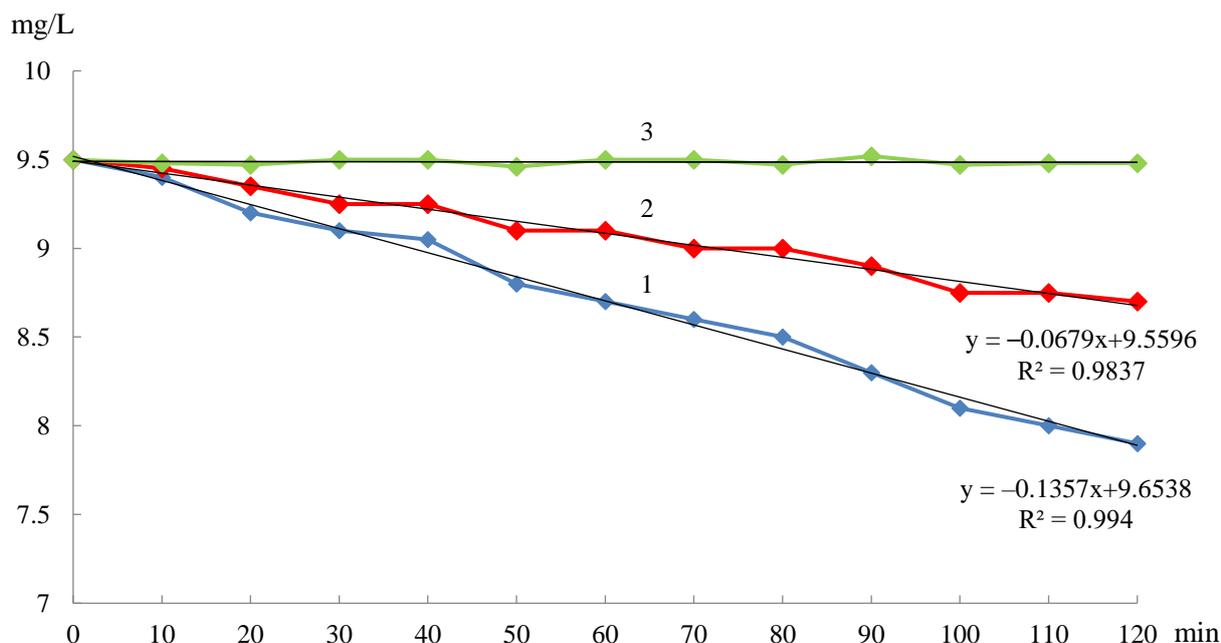


Рис. 2. Типичная динамика концентрации кислорода в воде респирометра: 1 (синяя линия) — с моллюском из контроля, 2 (красная линия) — с моллюском, экспонированном в растворе с солью металла (на примере моллюска №1, содержащегося 24 ч в воде с концентрацией 0.5 мг/л Cd^{2+}), 3 (зеленая линия) — без моллюска и с моллюском с закрытыми створками при разных вариантах экспозиции к растворам солей металлов. Даны также сплошные прямые линии тренда зависимости концентрации кислорода от времени и уравнения их аппроксимации.

Fig. 2. Typical dynamics of oxygen concentration in a respirometer. The blue line (1) is the change in oxygen concentration in the control water with the mollusk, the red line (2) is in water containing metals (using the example of mollusk №1, kept for 24 hours in water with a concentration of 0.5 mg/L Cd^{2+}) the green line (3) is in the control water without the mollusk and in water contaminated with metals with the mollusk with closed valves. The black lines show the trend lines.

Скорость потребления кислорода моллюсками *D. polymorpha* при экспозиции в течение 10 сут в растворах солей ТМ

Oxygen consumption rate of mollusks *D. polymorpha* during exposure for 10 days in solutions of ТМ

Вариант эксперимента Experiment option	Концентрация, мг/л Concentration, mg/L	V_{O_2} , мг O_2 /ч \times Г _{в.в}		
		24 ч	72 ч	10 сут
Контроль	0	0.45±0.11	0.44±0.09	0.41±0.02
Cd	0.1	0.35±0.12	0	0
	0.5	0.25±0.03	0	0
Cu	0.035	0.38±0.15	0.41±0.11	0
	0.35	0.22±0.11	0.29±0.12	0
Zn	0.2	0.41±0.13	0.32±0.07	0
	2	0.22±0.11	0.16±0.12	0

Через 10 сут экспонирования во всех вариантах растворов солей исследованных металлов моллюски в респирометре оставались с закрытыми створками раковин в течение все-

го времени тестирования, концентрации кислорода практически не изменялась (рис. 2). Потребление кислорода у них отсутствовало (см. таблицу).

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что экспонированные в растворах ТМ моллюски на фоне функциональной нагрузки, связанной с их извлечением из воды и нахождением в течении 5 мин на воздухе, демонстрируют биологический ответ, проявляющийся в снижении интенсивности их дыхания в чистой

воде. Проявление этого эффекта зависит от концентрации и длительности экспозиции в растворах ТМ, но концентрационно-зависимый эффект наблюдается только при воздействии Cd^{2+} .

В целом можно сделать вывод, что острое (до 72 ч), а особенно длительное

(10 сут) воздействие ТМ может приводить к ухудшению функционального состояния моллюсков, что проявляется в снижении интенсивности их аэробного дыхания вплоть до полного его прекращения и невозможности оценить его при полном смыкании створок раковины. Полное смыкание створок у моллюсков связано не с физиологическими реакциями адаптации или защитной поведенческой реакцией. Вероятно, это является результатом токсического воздействия металлов на молекулярном уровне, вызывающим нарушения систем регуляции и угнетение аэробного метаболизма, поскольку дальнейшее пребывание в растворах металлов привело к гибели моллюсков. В работе [Salánki, 1992] показано, что ТМ (Cu^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}) влияют на проницаемость различных ионных каналов, приводя к выраженному изменению активности аддуктора приводящих мышц, которые поддерживают фильтрующую активность, закрывая и открывая раковины. Анализ всех полученных нами результатов позволяет сказать, что кадмий наиболее токсичен для двустворчатых моллюсков, что согласуется с литературными данными. Показано, что пороговая концентрация, приводящая к полному смыканию створок у перловицы обыкновенной *Unio pictorum* в течение 2 ч, составляет для кадмия и меди 1.8 и 68 мг/л соответственно [Попов и др., 2011 (Pоров et al., 2011)]. Возможно, это объясняется тем, что атомный радиус кадмия

практически полностью совпадает с ионным радиусом двухвалентного кальция (Ca^{2+}), поэтому кадмий, “маскируясь” под кальций (важнейший регулятор многих внутриклеточных процессов) осуществляет свое блокирующее воздействие на кальциевые потоки в нейронах и мышцах моллюсков [Kits, Mansvelde, 1996]. Кроме того, во многих работах показано, что ТМ оказывают ингибирующее влияние на отдельные группы участвующих в транспорте кислорода ферментов, приводящее к глубокой перестройке метаболизма в целом [Naimo, 1995; Love et al., 1995; Molnar, Fong, 2012]. Катион Cd^{2+} может воздействовать на дыхательную систему на всех уровнях организации, включая само клеточное дыхание [Spicer, Weber, 1991]. Под воздействием Cd^{2+} в схожих концентрациях 0.1 и 1.0 мг/л выявлялись нарушения энергетического обмена у моллюсков, в том числе ингибирование активности цитохромоксидазы [Mizrahi, Achituv, 1989; Neuberger-Cywiak et al., 2005].

Отсутствие дозозависимого эффекта скорости потребления кислорода при воздействии Cu^{2+} и Zn^{2+} подтверждает гипотезу, что в сублетальных концентрациях эссенциальные металлы действуют на дыхательную систему преимущественно за счет нарушения функции жабр. Это нарушение приводит к развитию внутренней гипоксии, однако репарация может быть осуществлена даже при “высоких” сублетальных концентрациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что ТМ оказывают угнетающее воздействие на функциональное состояние моллюсков *D. polymorpha*, которое можно выявлять по изменению интенсивности аэробного метаболизма, количественно определяемому по интенсивности потребления кислорода при активной фильтрации. Токсическое воздействие ТМ (кадмия, меди, цинка) на

функциональное состояние моллюсков, оцениваемое по интенсивности аэробного энергообмена, зависит от конкретного металла и его концентрации, а также от длительности воздействия. Показатель снижения скорости потребления кислорода моллюсками можно использовать в качестве биомаркера для оценки токсичности среды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122041100085-8) “Научные основы оценки здоровья экосистем Северо-Запада России и предупреждения угроз экологической безопасности”, а также в рамках плановой темы № 121050500046-8 при частичной поддержке приоритетного проекта “Оздоровление Волги” по теме № АААА-А18-118052590015-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бигон М., Хартер Дж., Таунсенд Дж. Экология: Особи, популяции и сообщества. М.: Мир, 1989. Т. 1. 667 с.
 Колупаев Б.И. Дыхание гидробионтов в токсичной среде. Казань: КГУ, 1992. 127 с.
 Моисеенко Т.И. Водная экотоксикология. Теоретические и прикладные аспекты. М.: Наука, 2009. 400 с.
 Моисеенко Т.И. Биодоступность и экотоксичность металлов в водных системах: критические уровни загрязнения // Геохимия. 2019. Т. 64. № 7. С. 675–688. DOI: 10.1134/S0016702919070085.
 Попов А.Н., Фоминых А.С., Ушакова О.С. и др. Определение чувствительности моллюсков, инсталлированных в системе оперативного мониторинга токсичности воды “Simbio” к воздействию загрязняющих веществ.

- Сообщение 1. Ионы тяжелых и цветных металлов в интервале концентраций 0–20 ПДК для культурно-бытовых водных объектов // Водное хозяйство России. 2011. № 2. С. 72–82.
- Camusso M., Balestrini R., Binelli A. Use of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) to assess trace metal contamination in the largest Italian subalpine lakes // *Chemosphere*. 2001. Vol. 44. P. 263–270.
- Dlugosz E.M., Chappell M.A., Meek T.H. et al. Phylogenetic analysis of mammalian maximal oxygen consumption during exercise // *J. Exp. Biol.* 2013. Vol. 216, № 24. P. 4712–4721. DOI: 10.1242/jeb.088914.
- Kits K.S., Mansvelder H.D. Voltage gated calcium channels in molluscs: classification, Ca²⁺ dependent inactivation, modulation and functional roles // *Invert. Neurosci.* 1996. Vol. 2. P. 241–250.
- Klimova Ya.S., Chuiko G.M., Pesnya D.S., Ivanova E.S. Biomarkers of Oxidative Stress in Freshwater Bivalve Mollusks (Review) // *Inland Water Biology*. 2020. Vol. 13. № 4. P. 681–690. DOI: 10.1134/S1995082920060073.
- Lowe D.M., Fossato V.U., Depledge M.H. Contaminant induced lysosomal membrane damage in blood cells of mussels *Mytilus galloprovincialis* from the Venice Lagoon: an in vitro study // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1995. Vol. 129. P. 189–196.
- Martin J.S., Saker M.L., Teles L.F., Vasconcelos V.M. Oxygen consumption by *Daphnia magna* Strauss as a marker of chemical stress in the aquatic environment // *Environ. Toxicol. Chem.* 2007. Vol. 26. № 9. P. 1987–1991.
- Mizrahi L., Achituv Y. Effect of heavy metals ions on enzyme activity in the mediterranean mussel, *Donax trunculus* // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1989. Vol. 42. P. 854–859.
- Molnar N., Fong P.P. Toxic effects of copper, cadmium, and methoxychlor shown by neutral red retention assay in two species of freshwater mollusks // *Open Environ. Pollut. Toxicol. J.* 2012. Vol. 3. P. 65–71.
- Naimo T.J. A review of the effects of heavy metals on freshwater mussels // *Ecotoxicology*. 1995. Vol. 4. P. 341–362.
- Neuberger-Cywiak L., Achituv Y., Garcia E.V. Sublethal Effects of Zn⁺⁺ and Cd⁺⁺ on Respiration Rate, Ammonia Excretion, and O:N Ratio of *Donax trunculus* (Bivalvia; Donacidae) // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2005. Vol. 75. P. 505–514.
- Ogunola O.S. Physiological, Immunological, Genotoxic and Histopathological Biomarker Responses of Molluscs to Heavy Metal and Water-Quality Parameter Exposures: A Critical Review // *J. Oceanogr. Mar. Res.* 2017. Vol. 5. P. 158. DOI: 10.4172/2572-3103.1000158.
- Ross R., Blair S. N., Ross A. et al. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: A case for fitness as a clinical vital sign: a scientific statement from the American Heart Association // *Circulation*. 2016. Vol. 134. P. e653–e699. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000461.
- Salánki J. Heavy metal induced behaviour modulation in mussels: possible neural correlates // *Acta Biol. Hungarica*. 1992. № 43. P. 375–386.
- Salánki J., Farkas A., Kamardina T., Rózsa K. S. Molluscs in biological monitoring of water quality // *Toxicol. Lett.* 2003. Vol. 140–141. P. 403–410.
- Sharov A.N., Sladkova S.V., Kamardin N.N. et al. Cadmium in the Eastern Gulf of Finland: Concentrations and Effects on the Mollusk *Limecola balthica* // *Geochemistry Int.* 2022. Vol. 60. № 7. P. 702–710. DOI: 10.1134/S0016702922060076.
- Sladkova S.V., Kamardin N.N., Sharov A.N. The effect of Cd on the respiratory activity of *Limecola balthica* (Linnaeus, 1758) of the Koporye Bay of the Gulf of Finland. 2019. <http://www.gulfoffinland.fi/>
- Spicer J.I., Weber R.E. Respiratory impairment in crustaceans and molluscs due to exposure to heavy metals // *Comp. Biochem. Physiol. C.* 1991. Vol. 100. № 3. P. 339–342.
- Yancheva V., Mollov I., Velcheva I. et al. Lysosomal membrane stability and respiration rate in zebra mussel (*Dreissena polymorpha* Pallas, 1771) as biomarkers for ex situ heavy metal exposure // *Period. Biol.* 2017. Vol. 119. № 4. P. 229–237. DOI: 10.18054/pb.v119i4.4715.

REFERENCES

- Bigon M., Harter J., Townsend J. Ecology: Individuals, Populations and Communities. Moscow, Mir, 1989, vol. 1. 667 p. (In Russia)
- Camusso M., Balestrini R., Binelli A. Use of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) to assess trace metal contamination in the largest Italian subalpine lakes. *Chemosphere*, 2001, vol. 44, pp. 263–270.
- Dlugosz E.M., Chappell M.A., Meek T.H. et al. Phylogenetic analysis of mammalian maximal oxygen consumption during exercise. *J. Exp. Biol.*, 2013, vol. 216, no. 24, pp. 4712–4721. doi: 10.1242/jeb.088914.
- Kits K.S., Mansvelder H.D. Voltage gated calcium channels in molluscs: classification, Ca²⁺ dependent inactivation, modulation and functional roles. *Invert. Neurosci.*, 1996, vol. 2, pp. 241–250.
- Klimova Ya.S., Chuiko G.M., Pesnya D.S., Ivanova E.S. Biomarkers of Oxidative Stress in Freshwater Bivalve Mollusks (Review). *Inland Water Biol.*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 681–690. doi: 10.1134/S1995082920060073.
- Kolupaev B.I. Respiration of hydrobionts in a toxic environment. Kazan, KSU, 1992. 127 p. (In Russia)
- Lowe D.M., Fossato V.U., Depledge M.H. Contaminant induced lysosomal membrane damage in blood cells of mussels *Mytilus galloprovincialis* from the Venice Lagoon: an in vitro study. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1995, vol. 129, pp. 189–196.
- Martin J.S., Saker M.L., Teles L.F., Vasconcelos V.M. Oxygen consumption by *Daphnia magna* Strauss as a marker of chemical stress in the aquatic environment. *Environ. Toxicol. Chem.*, 2007, vol. 26, no. 9, pp. 1987–1991.
- Mizrahi L., Achituv Y. Effect of heavy metals ions on enzyme activity in the mediterranean mussel, *Donax trunculus*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1989, vol. 42, pp. 854–859.
- Moiseenko T.I. Aquatic ecotoxicology. Theoretical and applied aspects. Moscow, Nauka, 2009. 400 p. (In Russia)

- Moiseenko T.I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aquatic systems: critical pollution levels. *Geochemistry Int.*, 2019, vol. 64, no. 7, pp. 675–688. doi: 10.1134/S0016702919070085.
- Molnar N., Fong P.P. Toxic effects of copper, cadmium, and methoxychlor shown by neutral red retention assay in two species of freshwater mollusks. *Open Environ. Pollut. Toxicol. J.*, 2012, vol. 3, pp. 65–71.
- Naimo T.J. A review of the effects of heavy metals on freshwater mussels. *Ecotoxicology*, 1995, vol. 4, pp. 341–362.
- Neuberger-Cywiak L., Achituv Y., Garcia E.V. Sublethal Effects of Zn⁺⁺ and Cd⁺⁺ on Respiration Rate. Ammonia Excretion. and O:N Ratio of *Donax trunculus* (Bivalvia; Donacidae). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2005, vol. 75, pp. 505–514.
- Ogunola O.S. Physiological, Immunological, Genotoxic and Histopathological Biomarker Responses of Molluscs to Heavy Metal and Water-Quality Parameter Exposures: A Critical Review. *J. Oceanogr. Mar. Res.*, 2017, vol. 5, p. 158. doi: 10.4172/2572-3103.1000158.
- Popov A.N., Fominykh A.S., Ushakova O.S. et al. Determination of sensitivity of mollusks installed in the operational water toxicity monitoring system “Symbio” to the effects of pollutants. Message 1. Ions of heavy and non-ferrous metals in the concentration range of 0–20 MAC for cultural and domestic water bodies. *Water management of Russia*, 2011, no. 2, pp. 72–82. (In Russia)
- Ross R., Blair S.N., Ross A. et al. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: A case for fitness as a clinical vital sign: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 2016, vol. 134, pp. e653–e699. doi: 10.1161/CIR.0000000000000461.
- Salánki J. Heavy metal induced behaviour modulation in mussels: possible neural correlates. *Acta Biol. Hungarica*, 1992, no. 43, pp. 375–386.
- Salánki J., Farkas A., Kamardina T., Rózsa K.S. Molluscs in biological monitoring of water quality *Toxicol. Let.*, 2003, vol. 140–141, pp. 403–410.
- Sharov A.N., Sladkova S.V., Kamardin N.N. et al. Cadmium in the Eastern Gulf of Finland: Concentrations and Effects on the Mollusk *Limecola balthica*. *Geochemistry Int.*, 2022, vol. 60, no. 7, pp. 702–710. doi: 10.1134/S0016702922060076.
- Sladkova S.V., Kamardin N.N., Sharov A.N. The effect of Cd on the respiratory activity of *Limecola balthica* (Linnaeus, 1758) of the Koporye Bay of the Gulf of Finland. 2019. <http://www.gulfoffinland.fi/>
- Spicer J.I., Weber R.E. Respiratory impairment in crustaceans and molluscs due to exposure to heavy metals. *Comp. Biochem. Physiol. C.*, 1991, vol. 100, no. 3, pp. 339–342.
- Yancheva V., Mollov I., Velcheva I. et al. Lysosomal membrane stability and respiration rate in zebra mussel (*Dreissena polymorpha* Pallas, 1771) as biomarkers for ex situ heavy metal exposure. *Period. Biol.*, 2017, vol. 119, no. 4, pp. 229–237. doi: 10.18054/pb.v119i4.4715.

RESPIRATORY INTENSITY AS AN INDICATOR OF THE FUNCTIONAL STATE OF BIVALVE MOLLUSKS *DREISSENA POLYMORPHA* UNDER THE IMPACT OF HEAVY METALS

S. V. Sladkova^{1,*}, S. V. Kholodkevich^{1,2}

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety of the RAS, 197110 St. Petersburg, Russia, e-mail: *sladkova_sv1@mail.ru

²Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, 152742 Borok, Russia

Revised 11.10.2024

An experimental study of the effect of heavy metals cadmium (Cd²⁺), copper (Cu²⁺) and zinc (Zn²⁺) on the physiological state of the bivalve mollusks *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) was conducted. assessed by the intensity of aerobic metabolism (respiration). determined quantitatively by the rate of oxygen consumption. It was found that short-term toxic effects of heavy metals on the functional state of mollusks lead to a decrease in the rate of oxygen consumption. and with a long-term effect — to closure of the shell and complete inhibition of aerobic respiration. The most toxic for mollusks is Cd²⁺ for which a dose-dependent effect has been shown. The indicator of a decrease in the rate of oxygen consumption by mollusks is used in the work as a biomarker for assessing the toxicity of the environment.

Keywords: respiratory rate, oxygen consumption rate, functional state, heavy metals, *Dreissena polymorpha*