

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОТВЕТА НА ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ ТЕСТ-НАГРУЗКУ КАРДИОСИСТЕМЫ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ *UNIO TUMIDUS*, ОБИТАЮЩИХ В ОЗЕРАХ С РАЗНЫМ ТРОФИЧЕСКИМ СТАТУСОМ

В. А. Любимцев<sup>1,\*</sup>, С. В. Холодкевич<sup>1,2,\*\*</sup>, Б. В. Адамович<sup>3</sup>, Ю. Н. Хотянович<sup>3</sup>, Г. М. Чуйко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, 197110 Санкт-Петербург, Корпусная ул., д. 18; e-mail: \*lyubimcev55@mail.ru

<sup>2</sup>Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук, 152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: \*\*kholodkevich@ibiw.ru

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет, 220030 Минск, Беларусь, пр-т Независимости, 4  
Поступила в редакцию 10.10.2024

Путем измерения частоты сердечных сокращений изучена реакция кардиосистемы пресноводного двустворчатого моллюска *Unio tumidus* на гипоксическую и солевую функциональную нагрузку в зависимости от трофического статуса среды его обитания. На примере двух его популяций, обитающих в литоральной зоне олиго-мезотрофного оз. Нарочь и эвтрофного оз. Баторино (Республика Беларусь), показано, что при обоих исследованных стресс-воздействиях значения одних показателей частоты сердечных сокращений демонстрируют выраженную тенденцию к повышению, других — к понижению с увеличением степени трофности озера, а некоторые остаются без изменений. Выявленные особенности следует учитывать при использовании показателей частоты сердечных сокращений для оценки экотоксикологического состояния водных объектов.

**Ключевые слова:** кардиоактивность, метод функциональной нагрузки, двустворчатые моллюски, *Unio tumidus*, оценка экотоксикологического состояния, пресноводный объект, трофический статус.

DOI: 10.47021/0320-3557-2025-31-39

### ВВЕДЕНИЕ

Понятие “здоровье водной экосистемы” включает в себя одновременно устойчивость протекающих в ней биологических процессов и наличие достаточной продуктивности (интенсивности трофических процессов), соответствующей конкретной климатической зоне и гидрохимическим характеристикам воды рассматриваемого водоема. Для контроля здоровья экосистемы водного объекта традиционно используются методы биоиндикации, основанные, с одной стороны, на изучении изменений видового разнообразия и видового богатства (оценки устойчивости) [Depledge, Galloway, 2005], а с другой — изменений биомассы, численности и скорости роста ключевых видов гидробионтов (оценка продуктивности). Как правило, для каждого водоема эти характеристики имеют свои границы нормы. В условиях Северо-Запада Российской Федерации и Беларуси в большинстве пресноводных водоемов скорость трофических процессов лимитируется, в основном, температурой воды. Однако ее вариабельность в течение одного вегетационного периода (май–октябрь) и межгодовая изменчивость делает крайне сложным оценку видового разнообразия и продуктивности по небольшому количеству наблюдений, особенно для планктонных форм гидробионтов (фито- и зоопланктон). Кроме того, методами биоиндикации фиксируются изменения в экосистеме, которые произошли после

длительного периода воздействия неблагоприятного фактора или их комплекса, что снижает их ценность для ранней и оперативной диагностики состояния здоровья водного объекта. Этим ограничений лишены методы, основанные на использовании биомаркеров морфофункционального состояния гидробионтов, регистрируемых на суборганизменном и организменном уровнях [Curtis et al., 2000; Лукьянова, 2001 (Luk'yanova, 2001); Чуйко и др., 2018 (Chuiiko et al., 2018); Холодкевич, 2022 (Kholodkevich, 2022)].

В качестве индикаторных тест-организмов для этой задачи хорошо подходят двустворчатые моллюски, например, *Unio tumidus* Philipsson, 1788 (сем. Unionidae). Этот моллюск обладает крупными размерами (длина раковины до 110 мм), отличается относительно долгой продолжительностью жизни (до 22 лет), в течение которой приурочен к одному месту локализации из-за малой подвижности, и является активным фильтратором. Так, по данным А.Ф. Алимова [1981 (Alimov, 1981)], одна взрослая особь *U. tumidus* в среднем фильтрует воду со скоростью 35.91 л/сут при фильтрационной активности 12 ч/сут. Источником пищи для моллюсков *U. tumidus* являются взвешенный в воде детрит и мелкие планктонные организмы. Вместе с водой и пищей в организм моллюска поступают загрязняющие вещества, которые интенсивно биоаккумулируются в нем.

При этом интенсивность фильтрации воды зависит от температуры, массы и размеров моллюска и снижается с повышением концентрации взвешенного вещества [Каратаев, Бурлакова, 1994 (Karataev, Burlakova, 1994)]. Все это позволяет по биомаркерам функционального состояния его организма оценивать текущее состояние экосистемы водоема или отдельных его участков.

Среди биомаркеров особого внимания заслуживает такой показатель организма моллюсков, как средняя интенсивность фильтрационной активности, регистрируемая по среднесуточным значениям частоты сердечных сокращений (ЧСС). Для повышения чувствительности ответа и информативности биомаркера его сочетают с функциональной нагрузкой на организм, в качестве которой используют кратковременное воздействие таких биологически значимых

факторов, как гипоксический или осмотический стресс, что позволяет оценивать функциональное состояние моллюсков и здоровья экосистемы на их основе [Kholodkevich et al., 2019; Холодкевич, 2022 (Kholodkevich, 2022)].

Для полноценного использования биомаркеров прежде всего необходимо знать диапазон варьирования его значений в норме и в условиях адаптации к различным природным факторам [Чуйко и др., 2018 (Chuiiko et al., 2018)]. На функциональное состояние моллюсков может влиять также и трофический статус водоема, в котором они обитают.

Цель исследования — сравнение показателей динамики параметров кардиоактивности при различной функциональной тест-нагрузке у моллюсков *Unio tumidus*, обитающих в Нарочанских озерах (Республика Беларусь) с различным трофическим статусом.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моллюсков *Unio tumidus* для экспериментов отлавливали вручную в литоральной зоне озер Нарочь (54°51.144' с.ш., 26° 46.554' в.д.) и Баторино (54°50.918' с.ш., 26°57.208' в.д.), находящихся в исключительной природоохранной зоне Государственного Национального парка «Нарочанский» (Республика Беларусь) в период 12–16.07.2022 г. (рис. 1). Исходя из имеющихся данных, эти озера схожи основными гидрохимическими характеристиками и многолетним отсутствием источников техногенного загрязнения, но имеют различный трофический статус, который не изменился за последние 30 лет: оз. Нарочь — олиго-мезотрофное, оз. Баторино — эвтрофное [Каратаев и др., 1995 (Karataev et al., 1995); Бюллетень экологического..., 2021 (Byulleten' ekologicheskogo..., 2021)].

После отлова моллюсков в течение 30 мин доставляли в полиэтиленовых емкостях (50 л) в лабораторию Нарочанской биологической станции Белорусского государственного университета, расположенной непосредственно в береговой зоне оз. Нарочь. В лаборатории моллюсков извлекали из воды, измеряли стандартными методами длину, высоту и ширину ( $l$ ,  $h$  и  $b$ , мм) раковины, рассчитывали величину интегрального метрического индекса ЛНВ, который равен произведению этих метрических параметров и косвенно отражает объем раковины ( $\text{см}^3$ ), определяли возраст по числу годовых колец на раковине [Методы изучения..., 1994 (Metody izucheniya..., 1994)] и фиксировали на ней в области проекции сердца держатель волоконно-оптического зонда для регистрации кардиоактивности.

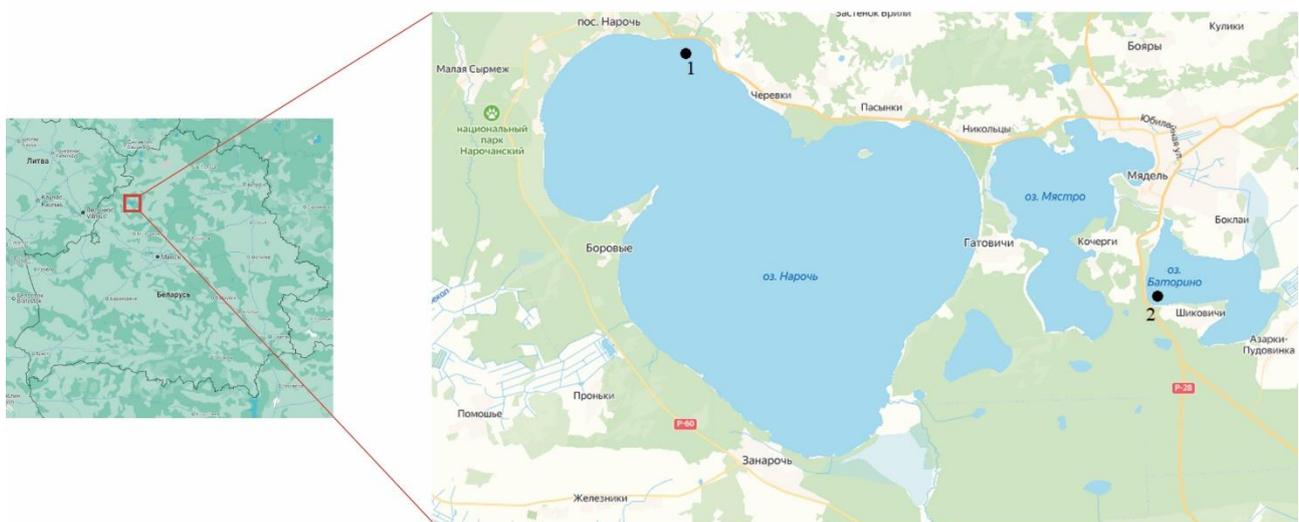


Рис. 1. Локализация исследуемых озер и места отлова моллюсков. 1 — оз. Нарочь, 2 — оз. Баторино.

Fig. 1. Localization of the studied lakes and places of catching mollusks. 1 — Lake Naroch, 2 — Lake Batorino.

Для экспериментов отбирали моллюсков возрастом 3–4 года с диапазоном варьирования по длине раковины из озер Нарочь и Баторино соответственно 42.3–60.9 и 57.2–69.9 мм. Всего

для экспериментов было отобрано из оз. Нарочь 15 экз., из оз. Баторино — 9 экз. Индивидуальные и средние значения размерных характеристик приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Размеры раковин двустворчатых моллюсков *Unio tumidus* из озер Нарочь и Баторино, для которых были определены значения всех параметров ЧСС

**Table 1.** The size of the shells of the bivalve mollusks *Unio tumidus* from Lake Naroch and Lake Bathorino, for which the values of all heart rate (HR) parameters were determined

№ п.п.	оз. Нарочь / Naroch Lake				оз. Баторино / Bathorino Lake			
	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	LHB	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	LHB
1	42.3	15.4	20.9	13.6	58.1	21.7	26.3	33.1
2	45.4	14.5	21.2	13.9	57.2	21.7	30.3	37.6
3	47.5	16.6	22.1	17.4	61.5	23.3	31	44.4*
4	43.6	17.8	24.5	19.0	66.6	23.9	28.3	45.0*
5	45.1	18.6	23.4	19.6	63.5	24.1	32.5	49.7*
6	47.1	18.4	22.7	19.7	69.9	24.3	29.7	50.4
7	48.0	17.4	25.3	21.1	69	25.7	35.2	62.4
8	48.6	18.3	25.8	22.9	67.3	29.4	32.9	65.1*
9	50.1	18.4	24.9	23.0	63.7	29.5	34.8	65.4
10	48.3	20.4	24.9	24.5	—	—	—	—
11	46	18.4	29.9	25.3	—	—	—	—
12	50.2	18.5	29.8	27.7	—	—	—	—
13	54	18.8	37.9	38.5	—	—	—	—
14	59.7	22.7	29.8	40.4	—	—	—	—
15	60.9	18	37.1	40.7	—	—	—	—
$\bar{x} \pm SD$	49.1±5.4	18.1±1.9	26.7±5.3	24.5±8.9	64.1±4.5 <sup>a</sup>	24.8±2.9	31.2±2.9	50.3±11.8 <sup>a</sup>

**Примечание.** *l* — длина, *h* — высота, *b* — ширина, мм; LHB — интегральный метрический индекс, представляющий произведение  $l \times h \times b$  и косвенно характеризующий объем раковины моллюска, см<sup>3</sup>; “\*” — значение ЧСС не определялось из-за недостаточного оптического пропускания раковины моллюска.  $\bar{x} \pm SD$  — средние значения и стандартные отклонения. <sup>a</sup> — различия между соответствующими значениями у моллюсков из разных озер статистически значимы (Student t-test,  $p \leq 0.05$ ). “—” — нет данных.

**Note.** *l* — the length, *h* — the height, *b* — the width, mm; LHB — an integral metric index representing the product of  $l \times h \times b$  and indirectly characterizing the volume of the mollusk shell, cm<sup>3</sup>; “\*” — HR value was not determined due to insufficient optical transmittance of the mollusk shell.  $\bar{x} \pm SD$  — mean values and standard deviations. <sup>a</sup> — the differences between the corresponding values in mollusks from different lakes are statistically significant (Student t-test,  $p \leq 0.05$ ). “—” — not date.

Сбор моллюсков, определение их размеров и фиксация держателей волоконно-оптического зонда проводили с технической помощью и при непосредственном участии сотрудников Лаборатории водной экологии биологического факультета Белорусского государственного университета и Нарочанской биологической станции. В лаборатории процедура подготовки моллюсков к эксперименту вне воды (манипуляционно-гипоксический стресс) занимала ~1 ч. Затем группы подготовленных таким образом моллюсков помещали по 8 экз. индивидуально в пластиковые аквариумы с 2 л воды из места их вылова при  $t=23-25^\circ\text{C}$  и концентрации растворенного кислорода на уровне насыщения 7.8–8.3 мг/л, поддерживаемой с помощью принудительной аэрации. Кардиоритм одновременно по 16 моллюсков измеряли с использованием систем типа БиоАргус, производимых в Санкт-Петербурге фирмой ООО НПФ “Экоконтур” [<http://ecocontour.ru/>]. Регистрация

ЧСС начиналась сразу после помещения моллюсков в аквариумы и проводилась с помощью двух систем типа БиоАргус, содержащих по восемь лазерных волоконно-оптических фотоплетизмографов в каждой [Холодкевич, 2022 (Kholodkevich, 2022)]. Процедура от вылова и до начала измерения ЧСС завершалась в течение 2–3 ч, в этот период моллюски не успевали полностью профильтровать всю привезенную природную воду.

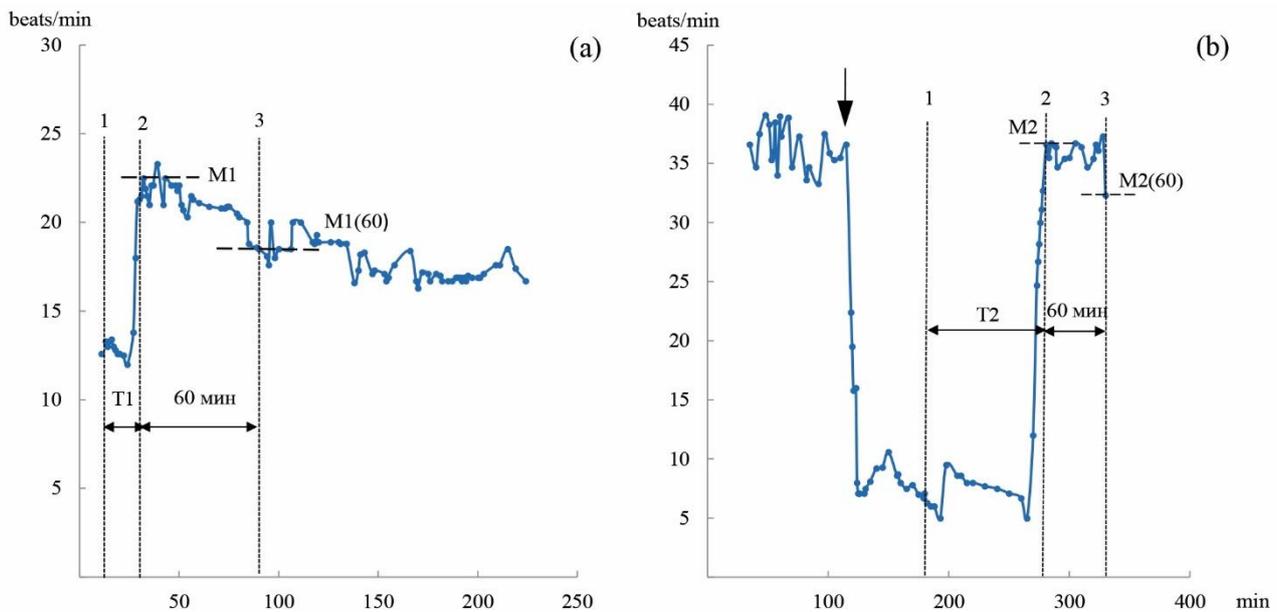
Эксперименты с функциональной нагрузкой начинали после стабилизации ЧСС, проходившей у большинства моллюсков после их акклимации к лабораторным условиям в течение 2–12 ч. О завершении периода акклимации после нахождения моллюсков на воздухе в процессе прикрепления держателей зондов и перемещения их в экспериментальные аквариумы судили по повышению ЧСС с 5–10 до 17–30 уд/мин и стабилизации на этом уровне, когда они открывали створки, выдвигали наружу

сифоны и переходили к активной фильтрации воды и дыханию.

В качестве тест-воздействия при тестировании моллюсков было использовано кратковременное (60 мин) повышение солёности до 10 г/л (10‰) за счёт добавления небольшого объема (0.2 л) концентрированного (100 г/л) раствора хлорида натрия. Возврат к исходной солёности также проводился без дополнительного механического стрессирования моллюсков (слив всей воды из аквариума с помощью сифона и наполнение аквариума исходной природной водой). В течение 2–12 ч от времени возвращения моллюсков в воду и до дозирования соли большинство моллюсков переходило к активной фильтрации воды, что приводило к повышению ЧСС от 5–10 до 17–30 уд/мин. В результате повышения солёности до 10‰ через 10–20 мин наблюдалось снижение ЧСС до значений 5–10 уд/мин, связанное с закрытием его створок (аналог реакции избегания у подвижных организмов, обусловленный стрессовым

воздействием), а при смене воды на исходную — такие же изменения, как и при первоначальном погружении в воду после приблизительно одночасовой экспозиции моллюсков вне воды в процессе процедуры фиксации держателей волоконно-оптических датчиков. В ходе эксперимента, кроме ЧСС, регистрировали следующие показатели, отражающие разные стороны динамики ответа кардиосистемы моллюска на различные тест-воздействия (рис. 2):

T1 — период времени от момента помещения моллюсков в воду после их нахождения вне воды, на протяжении которого у них закрыты створки раковины и ЧСС = 5–10 уд/мин, до начала быстрого (примерно за 1 мин) повышения ЧСС до 17–30 уд/мин и открытия створок; характеризует период времени, необходимый для восстановления нормальной фильтрационной активности и перехода на внешнее дыхание после нахождения моллюска на воздухе в течение 60 мин.



**Рис. 2.** Пример динамики изменения ЧСС у моллюска *Unio tumidus* из оз. Нарочь: (а) — в течение первых 3.5 ч при возврате моллюска в природную воду после проведения манипуляций вне воды; (б) — при солевой функциональной нагрузке (солевой тест). Вертикальная стрелка — начало солевого теста. Вертикальные точечные линии: 1 — момент возврата моллюска в воду после 60 мин нахождения вне воды (а) или после солевого теста (б); 2 — момент достижения максимального значения ЧСС, 3 — момент через 60 мин после достижения максимального значения ЧСС. Горизонтальная пунктирная линия: M1 и M2 — уровень среднего за 5 мин регистрации максимального значения ЧСС, M1(60) и M2(60) — уровень значения ЧСС, наблюдаемый через 60 мин после регистрации максимального значения ЧСС. T1 и T2 — время задержки стадии быстрого роста ЧСС относительно времени возвращения моллюска в природную воду после нахождения вне воды (а) и при солевом тесте (б).

**Fig. 2.** Example of the dynamics of HR changes in the mollusk *Unio tumidus* from Lake Naroch: (a) — during the first 3.5 hours when the mollusk is returned to natural water after manipulation out of water; (b) — with a salt functional load (salt test). Vertical arrow — the beginning of the salt test. Vertical dotted lines: 1 — the moment the clam returns to the water after 60 min being out of water (a) or after the salt test (b); 2 — the moment when the maximum HR value is reached, 3 — the moment 60 min after the maximum HR value is reached. Horizontal dotted line: M1 and M2 — the level of the average for 5 min of registration of the maximum HR value, M1(60) and M2(60) — the level of the HR value observed 60 min after registration of the maximum HR value. T1 and T2 are the delay time of the stage of rapid HR growth relative to the time of return of the mollusk to natural water after being out of water (a) and during the salt test (b).

M1 — среднее максимальное за 5 мин непрерывной регистрации значение ЧСС (гиперкомпенсация), достигаемое в течение 3–40 мин в результате быстрого увеличения ЧСС после его стабильно низкого уровня во время нахождения моллюска на воздухе в течение 1 ч; характеризует максимальное значение ЧСС, которое каждая особь способна показать в данных условиях при возврате в природную воду.

M1(60) — среднее за 5 мин регистрации значение ЧСС через 60 мин после достижения им величины M1. Выбор интервала времени в 60 мин, после которого начинается регистрация величин M1(60) обусловлен тем, что в течение этого периода в подавляющем большинстве случаев наблюдалось более или менее значимое монотонное снижение ЧСС.

T2 — показатель, аналогичный T1, но при возврате моллюсков в природную воду после солевой функциональной нагрузки (10% NaCl); характеризует период времени, необходимый для раскрытия створок и восстановления нормальной фильтрационной и дыхательной активности после нахождения моллюска в условиях солевой функциональной нагрузки в течение 1 ч.

M2 — показатель, аналогичный M1, но регистрируемый при возврате моллюсков в природную воду после солевой функциональной нагрузки (10% NaCl); характеризует максимальное значение ЧСС, которое каждая особь способна показать в данных условиях при возврате в природную воду.

M2(60) — показатель, аналогичный M1(60), но регистрируемый при возврате моллюсков в природную воду после солевой функциональной нагрузки.

По результатам измерений для каждого моллюска индивидуально рассчитывали значения безразмерных величин  $(M1-M1(60))/M1$  и  $(M2-M2(60))/M2$ . Эти величины характеризуют долю, на которую снижается ЧСС моллюска в течение первых 60 мин после раскрытия створок и восстановления нормальной фильтрационной и дыхательной активности после нахождения на воздухе или после солевой функциональной нагрузки, т.е. косвенно показывает, как быстро моллюск переходит в оптимальный режим расходования энергии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты измерения кардиоактивности моллюсков показали, что ЧСС в норме равняется 17–30 уд/мин, а при экстремальных воздействиях (нахождение на воздухе во время процедуры фиксирования держателя оптоволоконного зонда, солевая функциональная нагрузка и др.) снижается до 5–10 уд/мин

Особенность регистрации ЧСС у моллюсков состоит в изменении во времени формы импульсов, вызванных периодическими изменениями интенсивности рассеянного света в различных фазах циклов сокращения сердца. Это связано с различиями взаимного положения разных тканей, расположенных в зоне сердца при различных углах раскрытия створок у двустворчатых моллюсков. При изменении угла раскрытия наблюдаются значительные изменения формы этих импульсов даже в течение нескольких минут при хорошей повторяемости формы импульсов в периоды, когда угол раскрытия створок не изменялся. Поэтому обработка сигналов с визуальным контролем повторяемости этой формы проводилась в течение последовательных 20-секундных интервалов на основе определения длительности целого количества таких повторяющихся импульсов (2–12 циклов) и вычисления среднего значения времени междарного интервала для каждого из последовательных 20-секундных интервалов. При сравнении средних значений междарного интервала для последовательных 20-секундных интервалов в периоды хорошей повторяемости формы импульсов достигалась повторяемость полученных “мгновенных” значений ЧСС ( $\pm 0.5$  уд/мин).

Поскольку выборки моллюсков из двух озер при одинаковом возрасте (3 г.) отличались по размерным характеристикам (табл. 1), это могло быть причиной возможных различий в средних значениях исследуемых показателей ЧСС. С целью проверки этой гипотезы для значений показателей ЧСС, демонстрирующих статистически значимые различия у моллюсков из двух озер, на их объединенной выборке был проведен регрессионный анализ.

Результаты эксперимента представлены в виде средних арифметических значений и стандартных отклонения ( $\bar{x} \pm SD$ ). Статистическую значимость различий между средними оценивали методом t-критерия Стьюдента для независимых величин при  $p = 0.05$ . Для расчетов использовали программный пакет Microsoft Excel.

в связи с закрытием створок раковины (аналог реакции избегания у активных животных) независимо от озера, где они обитают. Однако анализ других характеристик выявил некоторые различия (табл. 2).

Так, для величин T1 и T2 наблюдается тенденция к повышению у моллюсков из оз. Нарочь

(олиго-мезотрофное) по сравнению с таковыми из оз. Баторино (эвтрофное). Однако эти различия для T1 не являются статистически значимыми. Вместе с тем, у моллюсков из обоих озер средние значения T1 после их нахождения на воздухе статистически значимо ниже, чем T2 после солевой функциональной нагрузки.

**Таблица 2.** Показатели ЧСС моллюсков из озер Нарочь и Баторино после их пребывания на воздухе и солевой нагрузки

**Table 2.** Heart rate indicators of mollusks from the lakes Naroch and Batorino after their exposure to air and salt load

Параметры ЧСС Heart rate parameters	оз. Нарочь Lake Naroch (n = 15)	оз. Баторино Lake Batorino (n = 5)
Нахождение вне воды (манипуляционно-гипоксический стресс) Being out of water (manipulation-hypoxic stress)		
T1	8.4±4.2	17.2±8.6
M1	25.4±1.0	21.5±1.2 <sup>a</sup>
M1(60)	26.9±1.4	21.2±1.0 <sup>a</sup>
(M1-M1(60))/M1	-0.06±0.04	0.04±0.02
Солевая функциональная нагрузка Salt functional load		
T2	99±16 <sup>b</sup>	135±22 <sup>b</sup>
M2	27.1±0.58	18.8±2.0 <sup>a</sup>
M2(60)	23.8±1.3 <sup>b</sup>	16.6±2.0 <sup>a</sup>
(M2-M2(60))/M2	0.120±0.04 <sup>b</sup>	0.142±0.10 <sup>b</sup>

**Примечание.** Представлены средние значения и стандартных отклонений ( $\bar{x} \pm SD$ ); n — число моллюсков в выборке, экз.; T1 и T2 выражены в минутах, а M1, M1(60), M2 и M2(60) — в единицах сокращения сердца в минуту (уд/мин). Различия статистически значимы (Student t-test,  $p \leq 0.05$ ) между значениями аналогичных показателей при сравнении моллюсков: <sup>a</sup> — из двух озер, <sup>b</sup> — после нахождения вне воды и солевого теста.

**Note.** The average values and standard deviations ( $\bar{x} \pm SD$ ) are presented; n is the number of mollusks in the sample, ind.; T1 and T2 are expressed in minutes, M1, M1(60), M2 and M2(60) are in units of heart contraction per minute (beats/min). The differences are statistically significant (Student t-test,  $p \leq 0.05$ ) between the values of similar indicators when comparing mollusks: <sup>a</sup> — from two lakes, <sup>b</sup> — after being out of water and test to salt exposure.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что анализ динамики кардиоактивности моллюсков после солевого функционального теста позволяет оценить степень антропогенной нагрузки в местах их обитания [Kholodkevich et al., 2019]. Вместе с тем, природные факторы неантропогенного происхождения также потенциально могут влиять на кардиоактивность моллюсков. В нашем случае антропогенное влияние на экологическое состояние исследуемых озер может быть исключено, т.к. они

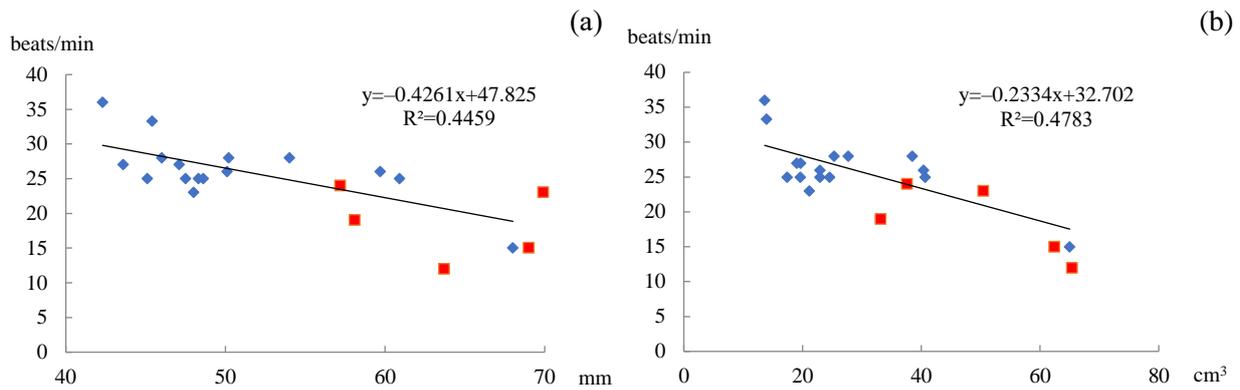
Аналогичное сравнение значений M1 (нахождение на воздухе) и M2 (солевая нагрузка) у моллюсков из обоих озер выявило, что первый показатель у них статистически значимо не различается, а второй — значимо выше у особей из оз. Нарочь (t-критерий Стьюдента = 4.23,  $p \leq 0.05$ ). Остальные показатели кардиоактивности моллюсков не имели статистически значимых различий ни между озерами, ни между разными условиями действия стресс-факторов (нахождение на воздухе, солевая нагрузка).

В то же время значения (M1-M1(60))/M1 и (M2-M2(60))/M2, показывающие как быстро моллюск переходит в оптимальный режим расходования энергии, между озерами не различались. Однако после солевого теста этот показатель у моллюсков из обоих озер был статистически значимо выше, чем после их пребывания на воздухе.

Выборки моллюсков из двух озер при одинаковом возрасте (3 г.) отличались по размерным характеристикам: в олиго-мезотрофном оз. Нарочь средние значения всех показателей были статистически значимо ниже, чем в эвтрофном оз. Баторино. Это могло быть причиной выявленных различий в средних значениях показателя M2. Для проверки этой гипотезы на объединенной выборке моллюсков из обоих озер был проведен регрессионный анализ зависимости индивидуальных значений показателя M2 от длины раковины (l) и интегрального метрического индекса ЛНВ (рис. 3).

Анализ показал, что значение параметра M2 снижается пропорционально увеличению размерных характеристик моллюсков (l, ЛНВ) независимо от озера их обитания. Эта зависимость хорошо описывается одним уравнением линейной регрессии для каждого параметра со средним значением коэффициента детерминации ( $R^2 = 0.46-0.48$ ) для моллюсков из обоих озер. Полученные результаты свидетельствуют о том, что размер моллюсков влияет на величину показателя M2.

расположены в природоохранной зоне Государственного Национального парка “Нарочанский” (Республика Беларусь), где ограничена хозяйственная деятельность и отсутствуют источники техногенного загрязнения. Поэтому содержание основных загрязняющих веществ в них не различается [Каратаев и др., 1995 (Karataev et al., 1995); Бюллетень экологического..., 2021 (Byulleten' ekologicheskogo..., 2021)].



**Рис. 3.** График зависимости показателя кардиоактивности M2 от размерных характеристик раковины моллюска *U. tumidus* из оз. Нарочь (синие ромбы) и из оз. Баторино (красные квадраты): (a) — длина раковины, мм; (b) — показатель ЛНВ ( $l \times h \times b$ ),  $\text{cm}^3$ .

**Fig. 3.** A graph of the dependence of the cardioactivity index M2 on the dimensional characteristics of the shell of the mollusk *U. tumidus* from Lake Naroch (blue diamonds) and from Lake Batorino (red squares): (a) — the length of the shell, mm; (b) — the LHV index ( $l \times h \times b$ ),  $\text{cm}^3$ .

Тем не менее, анализ полученных результатов показывает, что после обоих исследованных стресс-воздействий на моллюсков (нахождение на воздухе, солевой тест) значения показателей T1 и T2 при регистрации динамики их ЧСС демонстрируют выраженную тенденцию к повышению, а M1 и M2, M1(60) и M2(60) — к понижению с увеличением степени трофности озера, а остальные показатели не различаются. После прекращения стресс-воздействия и перемещения в исходную природную воду моллюски, обитающие в эвтрофных условиях с высокой обеспеченностью пищей (высокая концентрация одноклеточных микроводорослей, детрита и бактерий) и имеющие высокую скорость роста в связи с интенсивным питанием, могут оставаться с закрытыми створками раковин более длительный период времени (T1, T2), а уровень гиперкомпенсации (M1, M2) и последующего снижения ЧСС за 60 мин (M1(60), M2(60)) у них ниже, чем у особей из олиго-мезотрофных условий. Физиологическими причинами такой реакции моллюсков из эвтрофного оз. Баторино могут быть пониженная пищевая мотивация в связи с их большей упитанностью, что выражается в более крупных размерах особей при одинаковом возрасте

по сравнению с моллюсками из олиго-мезотрофного оз. Нарочь. Можно предположить, что моллюски, обитающие в олиго-мезотрофных условиях с пониженной обеспеченностью пищей, после любого стресс-воздействия быстрее переходят к активной фильтрации, т.к. пищевая мотивация и пищевая активность у них будет выше, что и отражается в соответствующих показателях ЧСС.

В то же время по размерным характеристикам моллюски из эвтрофного оз. Баторино были крупнее, чем из олиго-мезотрофного оз. Нарочь, что могло дополнительно снизить у них величину M2. Тенденция снижения величины ЧСС с увеличением размеров животных — общая закономерность и не только для моллюсков [Xing et al., 2019]. Однако в рамках данного исследования разделить влияние на показатели ЧСС размера моллюсков и трофического статуса озера не представляется возможным. Однако можно с большой уверенностью говорить, что первичной причиной различий в показателях ЧСС являются особенности пищевого поведения моллюсков, обусловленных разницей их физиологического состояния в озерах с разным трофическим статусом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенный методический подход к экспресс-оценке текущего функционального состояния (фильтрационной активности) по кардиоактивности показал, что для обитающих в идентичной климатической зоне популяций пресноводных двустворчатых моллюсков *Unio tumidus* наблюдаются различные стратегии пищевых поведенческих адаптаций, связанные с меньшей обеспеченностью пищей в олиго-мезотрофном оз. Нарочь и с большей — в эвтрофном оз. Баторино.

Наблюдаемые различия регистрируемых в ходе солевого теста значений показателя M2 ЧСС у одновозрастных моллюсков связаны с разницей их средних размеров, вызванных неодинаковой скоростью роста и упитанностью в озерах с разным трофическим статусом. Данную особенность реакции кардиосистемы моллюсков следует учитывать при ее использовании для оценки экотоксикологического состояния водных объектов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по темам № г.р. FFZF-2022-0011, 121050500046-8 и 124032500015-7.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алимов А.Ф. Функциональная экология пресноводных двустворчатых моллюсков. Л.: Наука, 1981. 248 с.  
 Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясстро, Баторино / Под ред. Михеевой Т.М. Минск: БГУ, 2021. 95 с.  
 Каратаев А.Ю., Бурлакова Л.Е. Питание. Скорость фильтрации // Место вида в биоценозах. II. Дрейссена. *Dreissena polymorpha* (Pall.) (Bivalvia, Dreissenidae). Систематика, экология, практическое значение. М.: Наука, 1994. С. 132–137.  
 Каратаев А.Ю., Самойленко В.М., Бурлакова Л.Е., Карташевич З.К., Рачевский А.Н. Рекомендации по восстановлению озер, подверженных интенсивному антропогенному воздействию. Минск: БГУ, 1995. 73 с.  
 Лукьянова О.Н. Молекулярные биомаркеры: Оценка состояния морских беспозвоночных при хроническом загрязнении среды. Владивосток: Изд-во ДВГАЭУ, 2001. 192 с.  
 Методы изучения двустворчатых моллюсков // Труды Зоологического института АН СССР. 1994. Т. 219. 208 с.  
 Холодкевич С.В. Опыт скрининговых исследований здоровья экосистем морских и пресноводных акваторий на основе оперативной оценки состояния обитающих в них двустворчатых моллюсков методом функциональной нагрузки. Проблемы и перспективы развития // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2022. Вып. 100(103). С. 97–118. DOI: 10.47021/0320-3557-2022-97-118.  
 Чуйко Г.М., Томилина И.И., Холмогорова Н.В. Комплексная оценка биологических и химических систем: учебное пособие. Ярославль: ЯрГУ, 2018. 140 с.  
 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 // *Mar. Biol.* 2000. Vol. 136. P. 837–846.  
 Depledge M.H., Galloway T.S. Healthy animals, healthy ecosystems // *Front. Ecol. Environ.* 2005. Vol. 3(5). P. 251–258. DOI: 10.2307/3868487.  
 Kholodkevich S.V., Sharov A.N., Chuiko G.M. et al. Quality assessment of freshwater ecosystems by the functional state of bivalve mollusks // *Water Resour.* 2019. Vol. 46. № 2. P. 249–257. DOI: 10.1134/S0097807819020064.  
 Xing Q., Zhang L., Li Y. et al. Development of Novel Cardiac Indices and Assessment of Factors Affecting Cardiac Activity in a Bivalve Mollusc *Chlamys farreri* // *Front. Physiol.* 2019. Vol. 10. Art. 293. DOI: 10.3389/fphys.2019.00293.

## REFERENCES

- Alimov A.F. Funkcional'naya ekologiya presnovodnyh dvustvorchatykh mollyuskov [Functional ecology of freshwater bivalves]. Leningrad, Nauka, 1981. 248 p. (In Russian).  
 Byulleten' ekologicheskogo sostoyaniya ozer Naroch', Myastro, Batorino [Bulletin of the ecological state of lakes Naroch, Myastro, and Batorino (ed. T.M. Miheeva)]. Minsk, BGU, 2021. 95 p. (In Russian).  
 Chuiko G.M., Tomilina I.I., Kholmogorova N.V. Comprehensive assessment of biological and chemical systems: a textbook. Yaroslavl, YaGU, 2018. 140 p. (In Russian).  
 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. *Mar. Biol.*, 2000, vol. 136, pp. 837–846.  
 Depledge M.H., Galloway T.S. Healthy animals, healthy ecosystems. *Front. Ecol. Environ.*, 2005, vol. 3(5), pp. 251–258. doi: 10.2307/3868487.  
 Karataev A.Yu., Burlakova L.E. Mesto vida v biocenozah. II. Drejssena. *Dreissena polymorpha* (Pall.) (Bivalvia, Dreissenidae). Sistematika, ekologiya, prakticheskoe znachenie Pitaniye. *Skorost' fil'tracii* [Filtration rate]. Moscow, Nauka, 1994, pp. 132–137. (In Russian).  
 Karataev A.Yu., Samojlenko V.M., Burlakova L.E. et al. Rekomendacii po vosstanovleniyu ozer, podverzhennyh intensivnomu antropogennomu vozdejstviyu [Recommendations for restoration of the lakes exposed to intense anthropogenic impact]. Minsk, BGU, 1995. 73 p. (In Russian).  
 Kholodkevich S.V. The experience of screening studies on the marine and freshwater ecosystem “health” based on an operational state assessment of bivalves by the method of functional load. Problems and prospects of development. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2022, is. 100(103), pp. 97–118. doi: 10.47021/0320-3557-2022-97-118.  
 Kholodkevich S.V., Sharov A.N., Chuiko G.M. et al. Quality assessment of freshwater ecosystems by the functional state of bivalve mollusks. *Water Resour.*, 2019, vol. 46, no. 2, pp. 249–257. doi: 10.1134/S0097807819020064.  
 Luk'yanova O.N. Molecular biomarkers: Assessment of the state of marine invertebrates in chronic environmental pollution. Vladivostok, Publishing house of DVFU, 2001. 192 p. (In Russian).  
 Metody izucheniya dvustvorchatykh mollyuskov (eds. G.L. Shkorbatova, Ya.I. Starobogatova). *Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR*, 1994, vol. 219. 208 p.  
 Xing Q., Zhang L., Li Y. et al. Development of Novel Cardiac Indices and Assessment of Factors Affecting Cardiac Activity in a Bivalve Mollusc. *Chlamys farreri*. *Front. Physiol.*, 2019, vol. 10, art. 293. doi: 10.3389/fphys.2019.00293.

**COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE RESPONSE TO THE FUNCTIONAL TEST-LOAD OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM OF *UNIO TUMIDUS* BIVALVE MOLLUSKS LIVING IN LAKES WITH DIFFERENT TROPHIC STATUS**

**V. A. Lyubimtsev<sup>1,\*</sup>, S. V. Kholodkevich<sup>1,2,\*\*</sup>, B. V. Adamovich<sup>3</sup>, Yu. N. Khotyanovitch<sup>3</sup>, G. M. Chuiko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety of the RAS,  
197110 St. Petersburg, e-mail: \*lyubimcev55@mail.ru*

<sup>2</sup>*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences,  
152742 Borok, Russia, e-mail: \*\*kholodkevich@ibiw.ru*

<sup>3</sup>*The Belarusian State University, 220030 Minsk, Belarus*

Revised 10.10.2024

The response of the cardiac system of the freshwater bivalve *Unio tumidus* to hypoxic and salt functional loads depending on the trophic status of its habitat was studied by measuring the heart rate (HR). Using the example of two of its populations inhabiting the littoral zone of the oligo-mesotrophic Lake Naroch and the eutrophic Lake Batorino (Republic of Belarus), it was shown that under both studied stress effects, the values of some HR indicators demonstrate a pronounced tendency to increase, others to decrease with an increase in the trophic state of the lake, and some remain unchanged. The identified features should be taken into account when using HR indicators to assess the ecotoxicological state of water bodies.

*Keywords:* cardioactivity, functional load test, bivalves, *Unio tumidus*, ecotoxicological assessment, freshwater bodies, trophic status