

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 542—559.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):542—559.

Научная статья
УДК [556.535.8+556.555.8]:[502.175:594]
doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-542-559

**О возможности мониторинга загрязнения
пресноводных водоёмов Северо-Запада России
с использованием нового биоиндикатора —
переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus***

***Николай Николаевич Камардин^{1,2}, Татьяна Владимировна Кузнецова¹,
Александра Борисовна Манвелова¹***

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
nik-kamardin@yandex.ru

Аннотация. Проведено комплексное экологическое исследование трех локаций на реке Луге с использованием нового биоиндикатора — переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus*. Выполнен анализ качества вод, оценено содержание тяжелых металлов в донных отложениях и тканях моллюсков. Изучены реакции кардиосистемы моллюсков на реверсивное изменение температуры воды как функциональную нагрузку для выявления различий в адаптивных возможностях моллюсков из разных локаций. Обнаружены достоверные различия в реакциях кардиосистемы на нагревание и охлаждение между группами моллюсков из разных локаций. Показано, что реакции кардиосистемы *V. viviparus* могут применяться в оценке адаптивных возможностей моллюсков и, следовательно, характеризовать экологического состояние водных экосистем их обитания.

Ключевые слова: экологическое состояние водоема, экологический индикатор, моллюск-живородка, кардиоактивность, река Луга.

Благодарности: Данное исследование выполнено в рамках НПЦ «Научные основы оценки здоровья экосистем Северо-Запада России и предупреждения угроз экологической безопасности (FFZF-2022-0011)».

Для цитирования: Камардин Н. Н., Кузнецова Т. В., Манвелова А. Б. О возможности мониторинга загрязнения пресноводных водоёмов Северо-Запада России с использованием нового биоиндикатора — переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus* // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 542—559. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-542-559.

Original article

On the possibility of monitoring pollution of freshwater bodies of North-West Russia using a new bioindicator — the prosobranch mollusk *Viviparus viviparus*

Nikolai N. Kamardin^{1, 2}, *Tatiana V. Kuznetsova*¹,
*Alexandra B. Manvelova*¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center RAS, St. Petersburg, Russian Federation

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation, nik-kamardin@yandex.ru

Summary. Natural water bodies of the Leningrad Region, and in particular in the Luga River basin, are currently experiencing significant anthropogenic pressure associated with the active development of the territories of its catchment basin. As a result of large-scale works, the Luga River undergoes significant changes in hydrological (dredging works in the mouth of the river, reclamation works in the port of Ust-Luga) indicators, physical, chemical and ecological characteristics of water masses. A comprehensive environmental assessment of three sites on the Luga River (Luga and Kingiseppsky District) was carried out. It includes physicochemical analysis of water quality, the content of heavy metals in sediments and tissues of local mollusk *Viviparus viviparus*, and the reactions of the mollusk cardiac system to a reversible change in water temperature as a functional load to identify differences between mollusks from study sites. Differences in the content of heavy metals in sediments of study locations were revealed as well as in environmental water quality. Using method of critical temperature maximum significant differences were also found in cardiac responses to heating and cooling between groups of mollusks. The results indicate a healthy heart and a clear regulation of its work by the circuit of the autonomic nervous system in mollusks caught near the village Preobrazhenka and depressed physiological state of mollusks from the location of the beach of the city of Luga. The study indicates the vulnerability of viviparid mollusks to the pollution of their habitats with heavy metals. It has been shown that bivalve mollusk *Viviparus viviparus* is a good bioindicator of the ecological state of freshwater bodies and watercourses in the North-Western region of Russia. The reactions of the cardiac system can be used to assess the adaptive capabilities of mollusks and, therefore, characterize the state of aquatic ecosystems in their habitat.

Keywords: ecological state assessment, ecological indicator, mollusk, cardiac activity, the Luga River.

Acknowledgments: This study was carried out within the framework of the Scientific and Practical Center “Scientific Foundations for Assessing the Health of Ecosystems in North-West Russia and Preventing Threats to Environmental Safety (FFZF-2022-0011)”.

For citation: Kamardin N. N., Kuznetsova T. V., Manvelova A. B. On the possibility of monitoring pollution of freshwater bodies of North-West Russia using a new bioindicator — the prosobranch mollusk *Viviparus viviparus* // *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):542—559. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-542-559.

Введение

Природные водные объекты Ленинградской области, в том числе в бассейне реки Луги, в настоящее время испытывают существенную антропогенную нагрузку, связанную с активным освоением территорий ее водосборного бассейна. Развивается строительство объектов инфраструктуры, строящихся портовых сооружений (г. Усть-Луга, универсальный погрузочный комплекс «LugaPort», многопрофильный терминал «Ультрамар»). Продолжается строительство крупнейшего в Европе мусороперерабатывающего завода в Кингисеппском районе и

т. д. Существенное влияние на экологическое состояние реки оказывают и уже действующие многие годы промышленные объекты, основным из которых является предприятие ООО «ПГ» «Фосфорит» — один из ведущих производителей фосфорных удобрений и кормовых фосфатов на северо-западе России, а также фосфоритной муки, серной и фосфорной кислот. В результате этих масштабных работ река Луга претерпевает значительные изменения гидрологических показателей (дноуглубительные работы в устьевой части реки, намывные работы в порту Усть-Луга), физико-химических и экологических характеристик водных масс. Предприятиями, осуществляющими сброс загрязненных сточных вод в поверхностные воды в бассейне реки Луга, являются также АО «Кингисеппский водоканал», ГУП «Леноблводоканал», ОАО «Коммунальные системы Гатчинского района» (пос. Сиверский, Вырица, Рождествено и др.), а также предприятия пищевой, металлообрабатывающей промышленности и др. Значительные площади территории заняты сельскохозяйственными угодьями, что обуславливает повышенный сток биогенных элементов. Все это оказывает и будет оказывать влияние на биологические индикаторы состояния водной экосистемы реки Луги.

Известно, что гидробионты подвержены различным стрессам в своей среде обитания, которые могут отражаться на их адаптивных возможностях, рассматриваемых как мера «здоровья» животного. Например, температура воды, ее жесткость, доступность кислорода, концентрации загрязняющих веществ в воде, хищничество, конкуренция — все эти факторы могут оказывать негативное влияние на моллюсков [1—5].

Авторами предложено использовать переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus* в качестве биоиндикатора экологического состояния пресноводных объектов. У экзотермных организмов физиологические функции чувствительны к изменению температуры окружающей среды и тесно связаны с устойчивостью организма к температурным воздействиям, которые, в свою очередь, контролируют скорость большинства метаболических процессов. Механизмы регуляции различных физиологических показателей живых организмов при потеплении климата активно обсуждаются в современной научной литературе (например, [6]).

В последнее время биотехнологии достигли значительных успехов в анализе связи изменений, происходящих в окружающей среде, с геномом. Например, были проведены полнотранскриптомные исследования красного морского ушка (*Haliotis rufescens*) для трех экологически различающихся регионов и идентифицированы некоторые локусы, связанные с реакцией на тепловой стресс [7]. Оказалось, что семейство генов белка теплового шока HSP 70 тесно связано с тепловыми адаптациями у моллюсков [8]. Температура точки перелома Аррениуса (ТПА) в сердечной деятельности часто используется в качестве индикатора термоустойчивости у крабов (*Petrolisthes*) [9], морских улиток (*genus Tegula*) [10], морских блюдечек (*Cellana toreuma*) [11, 12], гребешка [13] и морского ушка [14, 15].

Температура является основной переменной, контролирующей метаболизм экзотермных животных. У брюхоногих моллюсков способность поддерживать нормальный аэробный обмен при повышенных температурах воды во многом зависит от функции сердца и эффективности дыхания. По результатам

секвенирования РНК, обнаружен ген MYL4 (ген короткой цепи миозина), уровень которого снижается при повреждении сердца человека при тепловых воздействиях [16]. Показано, что у термочувствительных моллюсков максимальная частота сердечных сокращений ($ЧСС_{max}$) была ниже, чем ЧСС у термоустойчивых особей при той же температуре. Быстрая реакция белков теплового шока HSP на тепловой стресс является важной частью защитного механизма моллюсков. В термоустойчивых клетках это взаимодействие может повышать термоустойчивость белков и ускорять восстановление их после теплового повреждения [17—19]. Тепловой стресс может привести к окислительному стрессу в виде образования активных форм кислорода. Несколько генов белков (включая каталазу, супероксиддисмутазу, пероксиредоксин), связанных с антиоксидантной системой, играют важную роль, обеспечивая выживаемость организма при тепловом стрессе [20]. При анализе теплового стресса важно также учитывать активную роль нервной системы, поскольку температура влияет на работу нервной системы моллюска (ускоряет передачу сигналов между нервными клетками и скорость проведения по аксонам), контролирующей сердечную и дыхательную активность, что, в свою очередь, приводит к изменениям частоты сердцебиения и дыхания [21—23]. Реакция сердечной системы, активизация многих генов белков HSP и антиоксидантной системы (термоустойчивая реакция) является защитным механизмом, позволяющим организмам справляться с изменениями состояния окружающей среды. Так, величина температурного максимума (T_{max}) считается надежным показателем не только тепловой преференции водных организмов, но и общего функционального состояния животного [6].

Ранее предложено использовать определение уровня терморезистентности у двустворчатого пресноводного моллюска *Unio pictorum* по критерию критического температурного максимума, используя неинвазивный метод регистрации и on-line анализа кардиоактивности моллюсков [24]. Была выявлена поведенческая реакция — замыкание раковины моллюсками, коррелирующая с физиологической реакцией (резкое снижение величины ЧСС в момент наступления теплового шока, определяемого методом критического температурного максимума) [6].

Цель настоящей работы состоит в изучении возможности использования скорости прироста и скорости снижения ЧСС у *V. viviparus* при реверсивном изменении температуры воды для оценки адаптивных возможностей моллюсков к изменениям показателей окружающей среды. Если моллюски из разных мест обитания имеют различные реакции кардиосистемы на T_{max} , то это может свидетельствовать о различиях в их адаптациях к экстремальным изменениям в среде обитания. Достоверные различия в реакции ЧСС на максимально допустимую величину температуры T_{max} между моллюсками из разных акваторий могут указывать на различное экологическое состояние акваторий, в которых обитают эти организмы.

Материалы и методы исследования

Река Луга — самая протяженная река Ленинградской области (353 км). Минимальная ширина реки в среднем течении составляет 20 м, максимальная (ближе

к устьевому участку) — до 350 м. Минимальная глубина — 1,5 м, а максимальная — 8 м. В весенний период идет перераспределение стока реки в устьевой зоне и через р. Россонь часть весенних половодных вод попадает в р. Нарву. Направление течения р. Луги постоянно с юго-востока на северо-запад. Русло р. Луги сложное, непрямолинейное, слегка приближенное к параболической форме. Средние скорости течения воды на стрежне реки колеблются от 0,05 м/сек при малых расходах воды до 0,54 м/сек в период весенней большой водности.

Карта мест исследования в бассейне р. Луги (окрестности г. Луги и устьевой участок р. Луги) представлена на рис. 1. Изучаемые локации на р. Луге были выбраны по наличию в них устойчивых популяций моллюсков-вживипарид.

В полевых условиях определялась температура воды, pH, жесткость, растворенный кислород в воде соответствующими приборами (Оксиметр MV600 PRO, Smartsensors pH метр для воды цифровой) и вносилась в протокол. Данные по основным физико-химическим показателям качества природных вод реки Луги по изучаемым локациям, приближенным к постам наблюдения и ФГБУ «Северо-Западное УГМС» [25] за последние три года наблюдений, обобщены и приведены в разделе «Результаты исследований».

1. Физиологические методы определения функционального состояния моллюсков

Взрослых особей переднежаберного моллюска *Viviparus viviparus* собирали на мелководье реки Луги около трёх населенных пунктов: в черте г. Луга (городской пляж), п.г.т. Толмачево и дер. Преображенка в начале сентября 2023 г. Вместе с небольшим количеством природной воды моллюсков доставляли в изотермных пакетах в лабораторию. После трехдневной акклиматизации к лабораторным условиям (температура воздуха 18—20 °С) у нескольких моллюсков одновременно регистрировали ЧСС при реверсивном изменении температуры природной воды в аквариуме. Для этого использовали небольшую пластмассовую кювету объёмом 800 мл с укрепленным электронагревателем 800 Вт и термометром для измерения температуры воды. Скорость нагревания воды в экспериментальной кювете составляла 1,5 °/мин. Охлаждение воды достигалось добавлением кубиков льда. ЧСС записывали в режиме on-line, используя оригинальный неинвазивный оптоволоконный метод регистрации кардиоактивности [26]. Специальная авторская программа “VarPulse” позволяла визуализировать форму кардиопульсов и вычислять плавающую среднюю ЧСС в выборке из 50 кардиоинтервалов. Полученные значения сохраняли в памяти ПК в виде файлов текстового формата (TXT).

2. Аналитические методы анализа донных отложений

Донные отложения для анализа отбирались по стандартной процедуре в местах обитания моллюсков-вживипарид. Анализ проб из изучаемых локаций на содержание некоторых тяжелых металлов (ТМ) проводился в сертифицированном Региональном аналитическом центре «Механобр аналит инжиниринг» (Санкт-Петербург, Россия) атомно-эмиссионным методом с индукционно связанной плазмой на атомно-эмиссионном спектрометре ICP7200duo (США) с двумя повторениями. Погрешность измерения составляла не более 10 %.

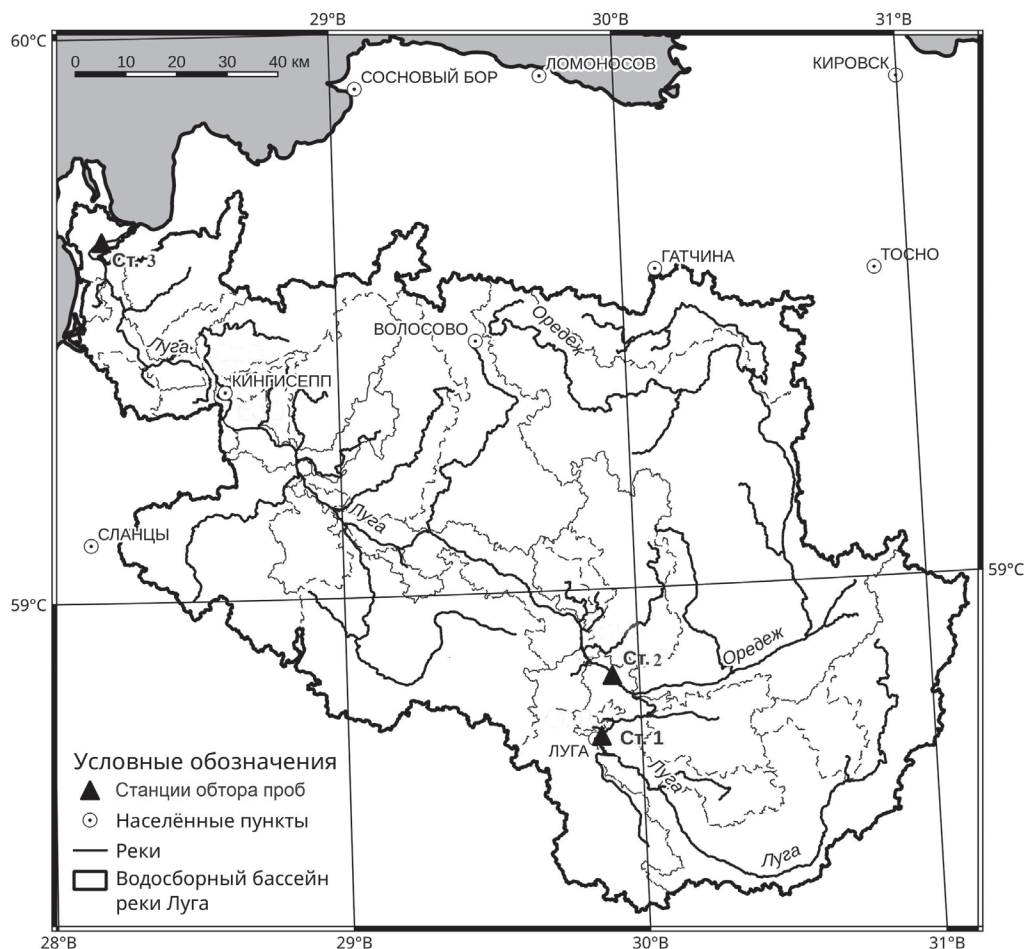


Рис. 1. Карта мест отбора моллюсков, донных отложений и воды на реке Луге (ст. 1 — пляж г. Луги), Толмачево (ст. 2) и в устьевой части реки Луга (ст. 3 — дер. Преображенка). Изучаемые локации отмечены черными треугольниками.

Fig. 1. Map of sampling sites of mollusks, sediments and water on the Luga River (st. 1 — Luga beach), Tolmachevo (st. 2) and at the mouth of the Luga River (st. 3 — Preobrazhenka village). The studied locations are marked with dark triangles.

Аналогично для анализа содержания ТМ из тех же локаций были отобраны моллюски-вивипариды 3 лет. Образцы раковин и мягких тканей (тотально) были высушены в течение двух дней при температуре 24 °С, перетерты в агатовой ступке до мелкой пыли, просеяны через фильтр в 1 мм и переданы для анализа в лабораторию, указанную выше.

3. Статистическая обработка данных

Данные о ЧСС моллюсков *Viviparus viviparus*, собранных из различных локаций р. Луги, транспортировали в программный пакет *Excel*, где для полученных кривых изменения ЧСС при возрастании и снижении температуры в экспериментальной камере строили графики изменения ЧСС, вычисляли уравнения скорости изменения ЧСС. Полученные значения скорости возрастания и снижения обрабатывались статистически с помощью программы *Prizma 6.0*. Для средних арифметических значений вычислялась ошибка выборочной средней (*SEM*), достоверные различия по *t*-критерию Стьюдента с коррекцией Уэлча и по непараметрическому критерию Фарадея. Различия считались достоверными (значимыми) при $p > 0,95$.

Результаты исследований

Моллюски вида *Viviparus viviparus* (Mollusca, Gastropoda) собирались вручную на мелководье р. Луги в Ленинградской области. Были использованы моллюски, собранные в разных локациях: первая группа была собрана на песчаном городском пляже г. Луги, вторая — выше пос. Толмачево и третья выше деревни Преображенка, выше впадения р. Выбья, в 11 км от Усть-Луги. После трехдневной акклимации к лабораторным условиям у моллюсков регистрировали ЧСС при реверсивном изменении температуры воды. Скорость изменения ЧСС моллюсков определяли из уравнения линии тренда ЧСС, полученного в программе *Excel*.

Известно, что температура воды оказывает влияние на сердечный ритм моллюсков. При быстром нагревании воды в экспериментальном аквариуме с моллюсками с 15 до 55 °С моллюски продолжают оставаться в активном состоянии и увеличивают ЧСС с 18 до 60 уд/мин. После достижения ЧСС_{max}, отслеживаемой по началу падения ЧСС, вслед за достижением максимальных значений, происходило выключение нагревателя и добавлялся лед, что приводило к снижению ЧСС в течение примерно двух часов. На рис. 2 представлен типичный пример изменения ЧСС моллюска из локации дер. Преображенка при вариации температуры воды.

При повышении температуры воды с постоянной скоростью 1,5 °/мин наблюдалось увеличение ЧСС до определенного момента (ЧСС_{max}), после которого ЧСС начинала снижаться. Максимальное значение температуры воды (T_{max}), после которого начинается снижение ЧСС у моллюсков, было принято в качестве маркера их термоустойчивости.

Проведенные эксперименты показали, что моллюски, собранные из трех разных локаций: I группа — моллюски с пляжа г. Луги, II — выше п.г.т. Толмачева, III из локации вблизи дер. Преображенка, по течению реки Луги отличаются по средней величине ЧСС при T_{max} (т.е. по термоустойчивости). Так, в I-ой группе ЧСС было равно $36,9 \pm 2,5$ уд/мин при T_{max} 29,5 °С, во II-группе — $48,3 \pm 3,7$ уд/мин при T_{max} 36,4 °С и в III — $53,0 \pm 7,4$ уд/мин при T_{max} 41,5 °С. Полученные величины ЧСС для локаций в черте г. Луги и для локаций у деревни Преображенки (Кингисеппского района) различаются по непараметрическому критерию Фарадея (*F*-тест) ($p > 95\%$), по непарному *t*-критерию с коррекцией по Уэлчу (*t*-test Student with Welch's correction). Данные представлены на рис. 3.

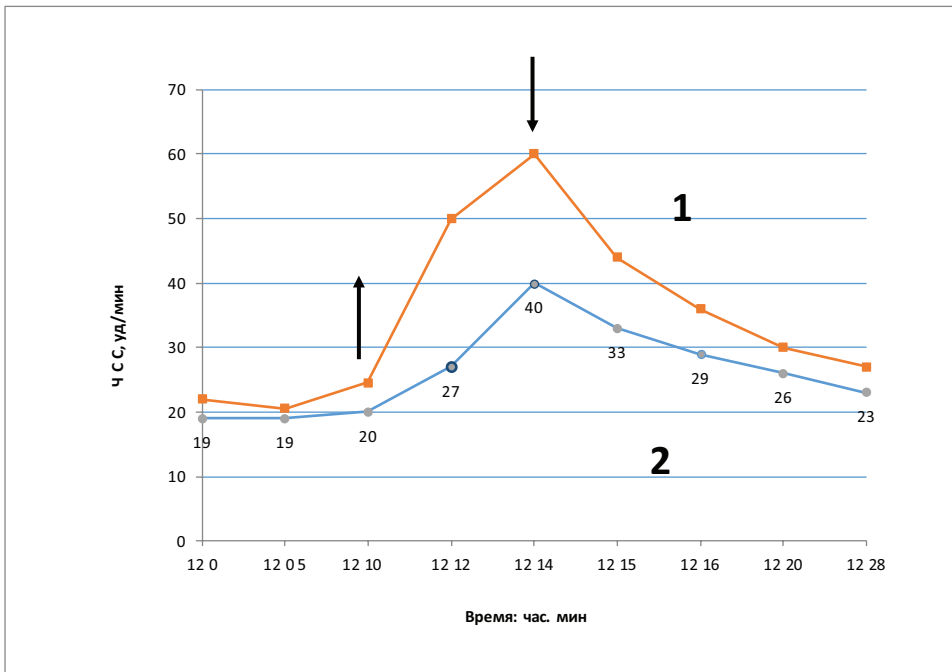


Рис. 2. Изменение ЧСС *Viviparus viviparus* при последовательном нагревании и охлаждении воды у моллюсков из локации дер. Преображенка. Моменты начала изменения температуры указаны стрелками. 1 — ЧСС, 2 — температура.

Fig. 2. Changes in the heart rate of *Viviparus viviparus* when water is sequentially heated and cooled in mollusks from the village of Preobrazhenka. The moments of the beginning of the temperature change are indicated by arrows. 1 — HR, 2 — temperature.

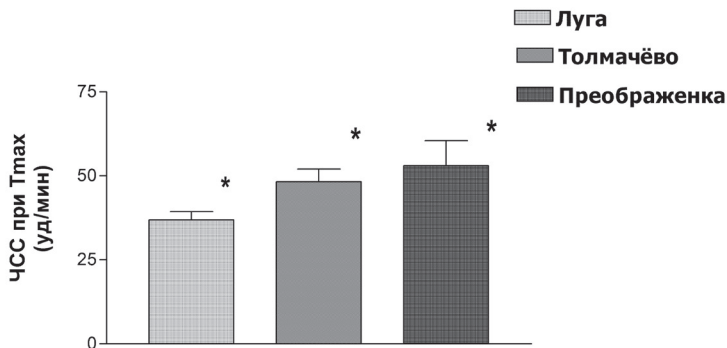


Рис. 3. ЧСС при T_{max} (терморезистентности) для моллюсков из 3-х разных локаций по течению реки Луги. Достоверность различий при $p > 0,95$ указана звездочкой *.

Fig. 3. Heart rate at T_{max} (thermal resistance) for mollusks from 3 different study locations along the Luga River. Significance differences at $p > 0,95$ is indicated *.

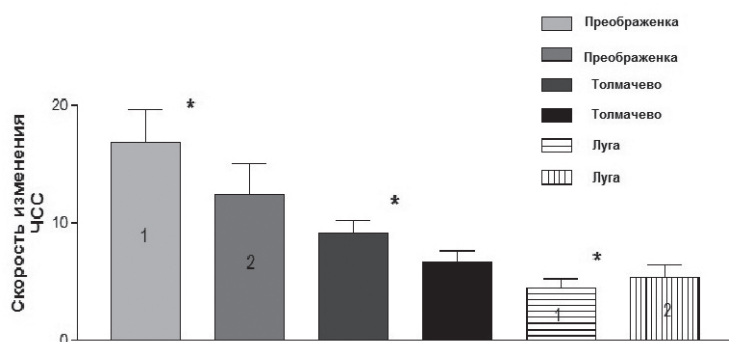


Рис. 4. Скорости прироста (1) и скорости снижения (2) сердечного ритма моллюсков из 3-х локаций по течению р. Луги. 1 и 2 — скорости нарастания и скорости снижения ЧСС в процессе нагрева и охлаждения соответственно. Доверительная вероятность различий значений между станциями при $p > 0,95$ отмечена звездочкой (*). Вертикальные линии на гистограмме — значения ошибки среднего.

Fig. 4. Rates of increase (1) and decrease (2) in the heart rate of mollusks from 3 study locations along the river Luga. 1 — rate of increase and 2 — rate of decrease in heart rate during heating and cooling respectively. The significance of differences in values between stations at $p > 0,95$ is marked with an asterisk (*). The vertical bars on the histogram are the errors of the mean.

В то же время скорость нарастания ЧСС значительно различалась для этих групп: для I-ой группы — $4,4 \pm 0,8$, для II-ой группы — $9,1 \pm 1,6$ и для III-ей группы — $16,7 \pm 4,1$ с доверительной вероятностью $p > 0,95$ по непарному t -критерию с коррекцией по Уэлчу (*t-test with Welch's correction*). На графиках представлены данные по скорости изменения ЧСС для моллюсков из изучаемых локаций (рис. 4).

Тренд скорости прироста и скорости снижения сердечного ритма вместе с анализом хода изменения температуры воды позволяет оценить адаптивные возможности моллюска к изменениям окружающей среды и общее здоровье животного. Во время кратковременного нагревания до T_{max} сердечная активность моллюска обычно повышается. Однако по достижению T_{max} ЧСС понижается, а при последующем охлаждении происходит снижение ЧСС. Процесс может варьироваться, что зависит от индивидуальной терморезистентности животного. Если моллюск имеет высокую устойчивость и обладает способностью быстро восстанавливаться после нагревания, то ЧСС может вернуться к исходным значениям или даже стать ниже нормы в результате охлаждения. Это свидетельствует о способности моллюска поддерживать нормальное функционирование своей сердечной системы даже после теплового шока.

Если моллюск имеет низкий порог терморезистентности или страдает от повреждений вследствие нагревания, ЧСС может не восстановиться полностью или оставаться повышенной даже при охлаждении. Это может указывать на нарушение сердечной функции и негативное влияние нагревания на организм моллюска,

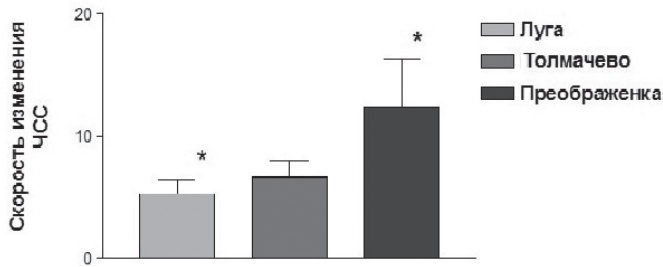


Рис. 5. Скорости снижения сердечного ритма моллюсков из трех локаций р. Луги при охлаждении. Обозначения как на рис. 4

Fig. 5. Decrease in the heart rate of mollusks from 3 study sites on the Luga River under cooling. Designations as in Fig. 4.

который испытывал функциональное напряжение вследствие обитания в неблагоприятных условиях существования, что требовало напряжения основных функциональных систем организма моллюска. В опытах с *Viviparus viviparus* скорость снижения ЧСС достоверно отличалась для этих групп: для I-ой группы — $5,39 \pm 1,1$, для II-ой группы — $6,6 \pm 0,9$ и для III-ей группы — $12,3 \pm 2,6$ по критерию Фарадея для непарных дисперсий *F*-тест при $p > 0,95$ (рис. 5).

Результаты косвенно указывают на термоустойчивость за счет включения молекулярных защитных механизмов (белков HSP и противодействию окислительному стрессу), а также четкую регуляцию его работы контуром автономной нервной системы у моллюсков, выловленных в районе дер. Преображенка. Такая же картина наблюдается при охлаждении моллюсков до комнатной температуры 22 °С для данной группы, что свидетельствует о хорошем физиологическом состоянии (здоровье) моллюсков и может характеризовать этот биотоп как относительно здоровый по сравнению с экологической обстановкой в районе городского пляжа г. Луги.

По данным мониторинга качества вод в разных створах реки Луги, класс вод в изучаемых створах за период 2020—2022 гг. колеблется от 3 «а» до 3 «б», т. е. классифицируется как «загрязненные» и «очень загрязненные» (РД 52.24.643-2002). Данные по основным физико-химическим показателям качества природных вод реки Луги по изучаемым локациям, приближенным к постам наблюдения ФГБУ «Северо-Западное УГМС» за последние три года наблюдений, обобщены и приведены ниже.

В полевых условиях в каждой из трех изучаемых локаций реки Луги было проведено измерение некоторых характеристик поверхностных вод. Результаты представлены в табл. 1.

Измерения растворенного кислорода в воде на пляже г. Луги показали самые низкие значения по сравнению с другими локациями (табл. 1). Высокие показатели рН выше р. Выбья в деревне Преображенка (10,6 км до устья реки Луги) могут быть объяснены илистыми отложениями, свойственными устьевым зонам

рек. Данные по основным физико-химическим показателям качества природных вод в створах реки Луги представлены в табл. 2.

Таблица 1

Физико-химические показатели речных вод в изучаемых локациях реки Луги
Common characteristics of the surface waters in the studied locations of the Luga River

Место расположения створа на р. Луга	<i>pH</i>	Растворенный кислород	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	Жесткость, Среднее
	2023 г.	2023 г.	2023 г.	2023 г.
В черте г. Луга (222 км от устья)	7,1	5,3	23,7	3,75
Выше пгт Толмачево (187 км от устья)	7,2	8,1	21,9	4,06
Выше деревни Преображенка (10,6 км от устья)	8,1	12,0	24,6	4,04

Таблица 2

Основные гидрохимические показатели воды в исследуемых локациях р. Луги [25]
Basic hydrochemical parameters of water in the studied locations on the Luga River [25]

Показатель	Единицы измерения	В черте города Луга	Выше пгт Толмачево	Преображенка
Взвешенные вещества	мг/дм ³	7,39	7,61	2,51
Растворённый кислород	мг/дм ³	6,09	7,09	9,04
ХПК	мг/дм ³	34,6	34,5	35,05
БПК ₅	мг/дм ³	1,17	1,19	1,48
NO ₂ (по N)	мг/дм ³	0,049	0,034	0,030
NO ₃ (по N)	мг/дм ³	0,57	0,45	0,48
Фосфаты (P)	мг/дм ³	0,024	0,017	0,016
Железо общее	мг/дм ³	0,093	0,18	0,36
Медь	мкг/дм ³	8,29	7,29	3,63
Свинец	мкг/дм ³	0,086	0,23	0,16
Кадмий	мкг/дм ³	0,32	0,35	0,37
Марганец	мкг/дм ³	2,54	3,02	20,46

Примечание: данные по постам в черте г. Луга и выше Толмачево за период 2020—2022 гг., по посту в д. Преображенка — 2020—2021 гг.

Содержание некоторых тяжелых металлов в донных отложениях и тканях моллюсков

Для изучения экологической обстановки в трех изучаемых локациях реки Луги были проведены аналитические исследования донных отложений на содержание тяжелых металлов (табл. 3).

Результаты содержания некоторых биологически важных ТМ в моллюсках (раковины и мягкие ткани) моллюсков-вивипарид из локации пляж реки Луги в черте города представлены в табл. 4.

Таблица 3

Содержание некоторых тяжелых металлов
в донных отложениях (мкг/г) исследуемых станций на реке Луге
Content of some heavy metals in bottom sediments ($\mu\text{g/g}$, dry weight)
of the study locations of the Luga River

Станция наблюдения	Pb	Cu	Zn	Cd
Выше д. Преображенка	8,02	2,59	8,74	0,047
В черте г. Луга	8,56	4,6	10,6	0,09
Выше пгт Толмачево	4,16	2,09	9,2	0,034

Таблица 4

Содержание некоторых тяжелых металлов
в моллюсках *Viviparus viviparus* (мкг/г, сух. веса) в локации пляж г. Луги
Content of some heavy metals
in the mollusks *Viviparus viviparus* ($\mu\text{g/g}$, dry weight) in the Luga

Металлы	Моллюски <i>Viviparus</i>	BCF (донные отложения) городской пляж г. Луги
Pb	7,3	2,2
Zn	100	10
Cu	46,4	9,8
Ni	1,7	0,6
Cd	0,14	1,5

Известно, что моллюски способны накапливать без заметного вреда для своего физиологического состояния тяжелые металлы из окружающей среды в концентрациях, часто во много раз превышающих исходные в воде или в донных отложениях. Особенно это касается необходимых для жизнедеятельности моллюсков микроэлементов Cu, Zn, Fe. Подобное наблюдается у *Viviparus viviparus* особенно в акватории р. Луги (городской пляж) в районе одноименного города, где коэффициент накопления в тканях моллюсков был высок для Zn и Cu. Кроме того, в тканях моллюсков в акватории города Луги обнаружены антропогенные металлы Cd, Hg в концентрациях, превосходящих в других исследованных локациях. Таким образом, по содержанию тяжелых металлов в седиментах и тканях моллюсков станция городской пляж г. Луги выделяется среди остальных станций мониторинга.

По данным Северо-Западного Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, качество природных вод реки Луги на всем ее протяжении оценивается как 3 «а» и 3 «б» («загрязненные» и «очень загрязненные»). Обширный водосборный бассейн реки Луги развивается в тесной взаимосвязи физико-географических условий территории и ее активным хозяйственным использованием, особенно в последнее десятилетие. Исследования позволили выявить различия в основных гидрохимических показателях поверхностных вод в трех изученных локациях на реке Луге, а также в ответных реакциях моллюсков из этих локаций на изменение температуры среды. Результаты показали большую

терморезистентность моллюсков, выловленных в районе деревни Преображенка (устьевая часть реки Луги), что свидетельствует об их высоких адаптивных возможностях к изменению условий среды. Достоверные различия в реакции ЧСС на максимально допустимую величину температуры T_{\max} между моллюсками из разных акваторий их обитания могут, на наш взгляд, указывать на различное экологическое состояние этих акваторий. Реакция ЧСС (термоустойчивая реакция), как положительная, так и отрицательная, является защитным механизмом, позволяющим организмам справляться с изменениями температуры окружающей среды. Падение термоустойчивости моллюсков, как известно, отражает нарушения в системе защитных белков клетки – белков теплового шока. Эта система изучена на человеке, когда повышение температуры тела вызывает увеличение ЧСС, секрецию гормонов и повышение внутриклеточной концентрации белков теплового шока (HSP75) [27]. Очевидно, она сохраняет свою эффективность у моллюсков из чистых акваторий обитания и нарушается в урбанизированных, подвергшихся антропогенному воздействию [16].

Повышение сердечного ритма у *Viviparus viviparus* является защитной реакцией на стрессовые ситуации, и оно отражает изменения факторов окружающей среды, запускающие другие защитные системы организма. Например, показано, что моллюск *Viviparus contectus* может увеличивать скорость фильтрации воды и увеличивать скорость дыхания при повышении температуры окружающей среды [23]. Дыхание и работа сердечной системы у моллюсков регулируются мотонейронами ЦНС и автономным контуром регуляции [21].

Скорость прироста и скорость снижения сердечного ритма *V. viviparus* могут использоваться как показатели здоровья моллюска, особенно в ходе его адаптации при изменении температуры среды. Такие характеристики уточняют данные о температурной точке перелома Аррениуса (ТПА) в сердечной активности, а именно: частоте сердцебиений и амплитуде сокращений [14, 28]. Эти показатели могут предоставить информацию об адаптивности сердца моллюска к изменениям условий окружающей среды. Повышение температуры снижает растворимость кислорода в воде и повышает скорость метаболизма. Это требует усиленной прокачки гемолимфы, которая зависит от сократительной активности сердца — ЧСС. Тяжелые металлы, такие как Pb, Cd и Hg, могут иметь токсическое воздействие на организмы [29] и вызывать различные патологические изменения, включая нарушение сердечной деятельности у разных животных, в частности, у моллюсков. Так, обнаружено, что высокая концентрация Cd в воде оказывает негативное влияние на сердечную активность моллюска *Limecola baltica* [30]. У моллюсков, находившихся в воде с повышенным содержанием этого металла, наблюдались нарушения ритма сердца и другие патологические изменения сердца. Результаты исследований свидетельствуют об уязвимости моллюсков-випарид к загрязнению их местообитания тяжелыми металлами.

Выводы

В работе показано, что переднежаберный моллюск *Viviparus viviparus* может служить объективным биоиндикатором экологического состояния пресноводных

водоемов и водотоков. Исследование позволило выявить различия в ответах кардиосистемы моллюсков-вивипарид из разных локаций реки Луги при температурных воздействиях. Выявлено различное накопление ТМ в донных отложениях и тканях моллюсков из локаций исследования. Данные могут послужить базовыми для дальнейших сравнительных исследований в области экологической безопасности в активно промышленно развивающемся регионе Ленинградской области.

Показано, что использование в качестве биоиндикаторов состояния водной экосистемы значений скорости прироста и скорости снижения сердечного ритма в зависимости от температуры воды поможет точнее оценить экологическое состояние водных объектов, а местные брюхоногие моллюски-вивипариды могут быть удобными индикаторами при диагностике состояния мест их обитания. Для корректной оценки экологического состояния водной экосистемы и его биотической составляющей (ключевые виды моллюсков) необходимо проводить комплексное исследование, включающее не только измерение сердечного ритма, но и анализ других физиологических и морфологических параметров, указывающих на альтерации, связанные с неблагоприятными изменениями в окружающей среде. Только такой подход позволит сделать достоверные выводы о состоянии моллюска и его адаптациях к окружающим условиям, а также оценить состояние (здоровье) водной экосистемы обитания этих моллюсков.

Работа по регистрации кардиоактивности моллюсков выполнена на оборудовании Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности».

Список литературы

1. Widdows J., Donkin P. Mussels and environmental contaminants: bioaccumulation and physiological aspects. In: Gosling E. (eds). *The mussel Mytilus: ecology, physiology, genetics and aquaculture*. 1992. Elsevier. Amsterdam. P. 383—424.
2. Немова Н. Н. Биохимические эффекты накопления ртути у рыб. М.: Наука, 2005. 168 с.
3. Фокина Н. Н., Нефедова З. А., Немова Н. Н. Липидный состав мидий *Mytilus edulis* L. Белого моря. Влияние некоторых факторов среды обитания. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 243 с.
4. Моисеенко Т. И. Биодоступность и экотоксичность металлов в водных системах: критические уровни загрязнения // *Геохимия*. 2019. Т. 64. № 7. С. 675—688. doi: 10.31857/S0016-7525647675-688.
5. Михайлов Р. А. Особенности пространственного распределения *Viviparus (Viviparus viviparus)* (Mollusca, Gastropoda, Viviparidae) равнинной реки Нижней Волги // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2020. Vol. 5(3). P. 1—10. doi: 10.21685/2500-0578-2020-3-1.
6. Somero G. N. The physiology of climate change: How potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine ‘winners’ and ‘losers’ // *J. Exp. Biol.* 2010. Vol. 213. No. 6. P. 912—920.
7. De Wit P., Palumbi S.R. Transcriptome-wide polymorphisms of red abalone (*Haliotis rufescens*) reveal patterns of gene flow and local adaptation // *Molecular Ecology*. 2013. Vol. 22. No. 11. P. 2884—2897. doi: 10.1111/mec.12081.
8. De Wit P., Rogers-Bennett L., Kudela R.M. et al. Forensic genomics as a novel tool for identifying the causes of mass mortality events // *Nature Communications*. 2014. Vol. 5. P. 3652. doi: 10.1038/ncomms4652.
9. Stillman J. H., Somero G. N. Adaptation to temperature stress and aerial exposure in congeneric species of intertidal porcelain crabs (genus *Petrolisthes*): correlation of physiology, biochemistry and morphology with vertical distribution // *The Journal of Experimental Biology*. 1996. Vol. 199. No. 8. P. 1845—1855. doi: 10.1242/jeb.199.8.1845.

10. Stenseng E., Braby C. E., Somero G. N. Evolutionary and acclimation-induced variation in the thermal limits of heart function in congeneric marine snails (genus *Tegula*): Implications for vertical zonation // *Biological Bulletin*. 2005. Vol. 208. No. 2. P. 138—144.
11. Dong Yw., Williams G. A. Variations in cardiac performance and heat shock protein expression to thermal stress in two differently zoned limpets on a tropical rocky shore // *Marine Biology*. 2011. Vol. 158. P. 1223—1231. doi: 10.1007/s00227-011-1642-6.
12. Han G. D., Zhang S., Marshall D. J. et al. Metabolic energy sensors (AMPK 487 and SIRT1), protein carbonylation and cardiac failure as biomarkers of thermal stress in an 488 intertidal limpet: linking energetic allocation with environmental temperature during aerial 489 emersion // *The Journal of Experimental Biology*. 2013. Vol. 216. No. 17. P. 3273—3282. doi: 10.1242/jeb.084269.
13. Xing Q., Li Y., Guo H. et al. Cardiac performance: a thermal tolerance indicator in scallops // *Mar. Biol.* 2016. Vol. 163. P. 244. doi: 10.1007/s00227-016-3021-9
14. Chen N., Luo X., Gu Y. et al. Assessment of the thermal tolerance of abalone based on cardiac performance in *Haliotis discus hannai*, *H. gigantea* and their interspecific hybrid // *Aquaculture*. 2016. Vol. 465. P. 258—264. doi: 10.1016/j.aquaculture.2016.09.004
15. Alter K., Andrewartha S. J., Morash A. J. et al. Hybrid abalone are more robust to multi-stressor environments than pure parental species // *Aquaculture*. 2017. Vol. 478. P. 25—34. doi: 10.1016/j.aquaculture.2017.04.035
16. Li W., Rong R., Zhao S. et al. Proteomic analysis of metabolic, cytoskeletal and stress response proteins in human heart failure // *J. Cell. Mol. Med.* 2012. Vol. 16. No.1. P. 59—71. doi: 10.1111/j.1582-4934.2011.01336.x
17. Gebauer M., Zeiner M., Gehring U. Proteins interacting with the molecular chaperone hsp70/hsc70: physical associations and effects on refolding activity // *FEBS Lett.* 1997. Vol. 417. No.1. P. 109—113. doi: 10.1016/S0014-5793(97)01267-2
18. Terada K., Kanazawa M., Bukau B., Mori M. The human DnaJ homologue dj2 facilitates mitochondrial protein import and luciferase refolding // *J. Cell Biol.* 1997. Vol. 139. No. 5. P. 1089—1095. doi: 10.1083/jcb.139.5.1089
19. Gleason L. U., Burton R.S. RNA-seq reveals regional differences in transcriptome response to heat stress in the marine snail *Chlorostoma funebris* // *Mol. Ecol.* 2015. Vol. 24. No. 3. P. 610—627. doi: 10.1111/mec.13047
20. Chen N., Luo X., Lu C. et al. Effects of artificial selection practices on loss of genetic diversity in the Pacific abalone, *Haliotis discus hannai* // *Aquac. Res.* 2017. Vol. 48. No. 9. P. 4923—4933. doi: 10.1111/are.13311
21. Сафонова Т. А., Журавлев В. Л., Ноздрачев А. Д. Кардиореспираторная система моллюсков: структура, функции, механизмы регуляции. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2008. 242 с.
22. Uvaeva O. I. The influence of heavy metals ions on filtering work of freshwater molluscs // *Вопросы биоиндикации и экологии*. 2011. № 16-2. С. 161—168.
23. Уваева О. И. Фильтрационная активность живородки болотной (Mollusca: Opisthobranchia, Viviparidae) при действии различных абиотических факторов водной среды // *Вестник Львовского университета. Серия биологическая*. 2012. Вып. 58. С. 144—149.
24. Вербицкий В. В., Шаров А. Н., Холодкевич С. В. Определение терморезистентности двусторчатых моллюсков *Unio pictorum* по кардиоактивности // *Труды Института биологии внутренних вод*. 2020. № 89(92). С. 50—57. doi: 10.24411/0320-3557-2020-10005.
25. Ежегодники качества поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям на территории деятельности ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (Ленинградская область) за 2020—2022 гг. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды».
26. Kholodkevich S., Kuznetsova T., Sharov A., et al. Applicability of a bioelectronic cardiac monitoring system for the detection of biological effects of pollution in bioindicator species in the Gulf of Finland // *J. Mar. Syst.* 2017. Vol. 171. P. 151—158. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.12.005
27. Xing Q., Zhang L., Li Yu. et al. Development of novel cardiac indices and assessment of factors affecting cardiac activity in a bivalve mollusk *Chlamys farreri* // *Frontiers Physiol.* 2019. Vol. 10. P. 293. doi: 10.3389/fphys.2019.00293

28. Chen N., Huang Z., Lu C. et al. Different responses to thermal stress in heat-tolerant and heat-sensitive Pacific abalones indicated by cardiac performance // *Front. Physiol.* 2019. Vol. 9. P. 1895. doi: 10.3389/fphys.2018.01895
29. Rahman Z., Singh V.P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview // *Environ Monit Assess.* 2019. Vol. 191. P. 419. doi: 10.1007/s10661-019-7528-7.
30. Шаров А. Н., Березина Н. А., Куприянов И. И и др. Кадмий в восточной части Финского залива: содержание и воздействие на моллюсков *Limecola balthica* // *Геохимия.* 2022. Т. 67. № 7. С. 686—695. doi: 10.31857/S0016752522060073

References

1. Widdows J., Donkin P. Mussels and environmental contaminants: bioaccumulation and physiological aspects. *The mussel Mytilus: ecology, physiology, genetics and aquaculture.* Elsevier, 1992: Amsterdam. 383—424.
2. Nemova N. N. *Biokhimicheskiye efekty nakopleniya rtuti u ryb = Biochemical effects of mercury accumulation in fish.* M.: Science, 2005: 168 p. (In Russ.).
3. Fokina N. N., Nefedova Z. A., Nemova N. N. *Lipidnyy sostav midiy Mytilus edulis L. Belogo morya. Vliyaniye nekotorykh faktorov sredi obitaniya = Lipid composition of the mussels Mytilus edulis L. from the White Sea. The influence of some environmental factors.* Petrozavodsk. Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2010: 243 p. (In Russ.).
4. Moiseenko T. I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aquatic systems: critical levels of pollution. *Geokhimiya = Geochemistry.* 2019; (64):(675—688). (In Russ.).
5. Mikhailov R. A. Features of the spatial distribution of Viviparus (*Viviparus viviparus*) (Mollusca, Gastropoda, Viviparidae) of the lowland river of the Lower Volga. *Rossiyskiy zhurnal ekosistemnoy ekologii = Russian Journal of Ecosystem Ecology.* 2020;5(3):(1—10). doi: 10.21685/2500-0578-2020-3-12 (In Russ.).
6. Somero G. N. The physiology of climate change: How potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine ‘winners’ and ‘losers’. *J. Exp. Biol.* 2010;213(6):912—920.
7. De Wit P., Palumbi S. R. Transcriptome-wide polymorphisms of red abalone (*Haliotis rufescens*) reveal patterns of gene flow and local adaptation. *Molecular Ecology.* 2013;22(11):2884—2897. doi: 10.1111/mec.12081.
8. De Wit P., Rogers-Bennett L., Kudela R. M. et al. Forensic genomics as a novel tool for identifying the causes of mass mortality events. *Nature Communications.* 2014;(5):3652. doi: 10.1038/ncomms4652.
9. Stillman J. H., Somero G. N. Adaptation to temperature stress and aerial exposure in congeneric species of intertidal porcelain crabs (genus *Petrolisthes*): correlation of physiology, biochemistry and morphology with vertical distribution. *The Journal of Experimental Biology.* 1996;199(8):1845—1855. doi: 10.1242/jeb.199.8.1845.
10. Stenseng E., Braby C. E., Somero G. N. Evolutionary and acclimation-induced variation in the thermal limits of heart function in congeneric marine snails (genus *Tegula*): Implications for vertical zonation. *Biological Bulletin.* 2005;208(2):138—144.
11. Dong Yw., Williams G. A. Variations in cardiac performance and heat shock protein expression to thermal stress in two differently zoned limpets on a tropical rocky shore. *Marine Biology.* 2011;(158):1223—1231. doi: 10.1007/s00227-011-1642-6.
12. Han G. D., Zhang S., Marshall D. J. et al. Metabolic energy sensors (AMPK 487 and SIRT1), protein carbonylation and cardiac failure as biomarkers of thermal stress in an intertidal limpet: linking energetic allocation with environmental temperature during aerial emersion. *The Journal of Experimental Biology.* 2013;216(17):3273—3282. doi: 10.1242/jeb.084269.
13. Xing Q., Li Y., Guo H. et al. Cardiac performance: a thermal tolerance indicator in scallops. *Marine Biology.* 2016;(163):244. doi: 10.1007/s00227-016-3021-9.
14. Chen N., Luo X., Gu Y. et al. Assessment of the thermal tolerance of abalone based on cardiac performance in *Haliotis discus hannai*, *H. gigantea* and their interspecific hybrid. *Aquaculture.* 2016;(465):258—264. doi: 10.1016/j.aquaculture. 2016.09.004.

15. Alter K., Andrewartha S. J., Morash A. J. et al. Hybrid abalone are more robust to multi-stressor environments than pure parental species. *Aquaculture*. 2017;(478):25—34. doi: 10.1016/j.aquaculture.2017.04.035.
16. Li W., Rong R., Zhao S. et al. Proteomic analysis of metabolic, cytoskeletal and stress response proteins in human heart failure. *J. Cell. Mol. Med.* 2012;16(1):59—71. doi: 10.1111/j.1582-4934.2011.01336.x.
17. Gebauer M., Zeiner M., Gehring U. Proteins interacting with the molecular chaperone hsp70/hsc70: physical associations and effects on refolding activity. *FEBS Lett.* 1997;417(1):109—113. doi: 10.1016/S0014-5793(97)01267-2.
18. Terada K., Kanazawa M., Bukau B. et al. The human DNAj homologue dj2 facilitates mitochondrial protein import and luciferase refolding. *J. Cell Biol.* 1997;139(5):1089—1095. doi: 10.1083/jcb.139.5.1089.
19. Gleason L. U., Burton R. S. RNA-seq reveals regional differences in transcriptome response to heat stress in the marine snail *Chlorostoma funebris*. *Mol. Ecol.* 2015;24(3):610—627. doi: 10.1111/mec.13047.
20. Chen N., Luo X., Lu C. et al. Effects of artificial selection practices on loss of genetic diversity in the Pacific abalone, *Haliotis discus hannai*. *Aquac. Res.* 2017;48(9):4923—4933. doi: 10.1111/are.13311.
21. Safonova T. A., Zhuravlev V. L., Nozdrachev A. D. *Kardiorespiratornaya sistema mollyuskov: stroyneniye, funktsii, mekhanizmy regulyatsii = Cardiorespiratory system of mollusks: structure, functions, regulatory mechanisms*. St. Petersburg University Publishing House, 2008: 242 p. (In Russ.).
22. Uvaeva O. I. The influence of heavy metals ions on filtering work of freshwater molluscs. *Bioindikatsiya i voprosy ekologii = Bioindication Issues and Ecology*. 2011;16(2):(161—168).
23. Uvaeva O. Filtration activity of the marsh viviparous (Mollusca: Opisthobranchia, Viviparidae) in action of various abiotic factors of aquatic environment. *Vestnik L'vovskogo universiteta. Seriya biologicheskaya = Bulletin of Lviv University. Series biological*. 2012;(58):(144—149).
24. Verbitsky V. V., Sharov A. N., Kholodkevich S. V. Determination of thermoresistance of the bivalves *Unio pictorum* by cardioactivity. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod = Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters*. 2020;89(92):(50—57). doi: 10.24411/0320-3557-2020-10005. (In Russ.).
25. *Yezhegodniki kachestva poverkhnostnykh vod sushi po gidrokhimicheskim pokazatelyam na territorii deyatel'nosti FGBU «Severo-Zapadnoye UGMS» (Leningradskaya oblast') za 2020—2022 gg. = Yearbooks of the quality of terrestrial surface waters by hydrochemical indicators in the territory of activity of the Federal State Budgetary Institution “North-West UGMS” (Leningrad Region) for 2020—2022*. St. Petersburg. Federal State Budgetary Institution “North-Western Department for Hydro-meteorology and Environmental Monitoring”. (In Russ.).
26. Kholodkevich S., Kuznetsova T., Sharov A. et al. Applicability of a bioelectronic cardiac monitoring system for the detection of biological effects of pollution in bioindicator species in the Gulf of Finland. *J. Mar. Syst.* 2017;(171):151—158. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.12.005.
27. Xing Q., Zhang L., Li Yu. et al. Development of Novel cardiac indices and assessment of factors affecting cardiac activity in a bivalve mollusk *Chlamys farreru*. *Frontiers Physiol.* 2019;(10):293. doi: 10.3389/fphys.2019.00293.
28. Chen N., Huang Z., Lu C. et al. Different responses to thermal stress in heat-tolerant and heat-sensitive Pacific abalones indicated by cardiac performance. *Front. Physiol.* 2019;(9):1895. doi: 10.3389/fphys.2018.01895.
29. Rahman Z., Singh V. P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview. *Environ Monit Assess.* 2019;(191):419. doi: 10.1007/s10661-019-7528-7.
30. Sharov A. N., Berezina N. A., Kupriyanov I. et al. Cadmium in the eastern part of the Gulf of Finland: content and impact on the mollusks *Limecola balthica*. *Geokhimiya = Geochemistry*. 2022;67(7):(686—695). doi: 10.31857/S0016752522060073. (In Russ.).

Информация об авторах

Камардин Николай Николаевич, доктор биологических наук, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, ведущий научный сотрудник, nik-kamardin@yandex.ru.

Кузнецова Татьяна Владимировна, кандидат биологических наук, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, старший научный сотрудник, kuznetsova.tv@spcras.ru.

Манвелова Александра Борисовна, научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, manvelova.a@spcras.ru.

Information about authors

Kamardin Nikolai Nikolaevich, Doctor Biol. Sci., Saint-Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety, Leading Scientist.

Kuznetsova Tatiana Vladimirovna, Ph.D. Biol. Sci., Saint-Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety, Senior Scientist.

Manvelova Aleksandra Borisovna, Saint-Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety, Researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 27.04.2024

Принята в печать после доработки 26.08.2024

The article was received on 27.04.2024

The article was accepted after revision on 26.08.2024