

20. Tserenov I. V. et al. Efficiency of a lactulose-containing additive in growing rams. Agrarian and food innovations. 2024. Vol. 26. No 2. Pp. 27-36.

21. Zharikov Ya. A., Kaneva L. A. Alkaline phosphatase activity in the blood serum of young rams in relation to age and growth intensity. Genetics and Animal Breeding. 2021. No 1. Pp. 9-16.

Информация об авторах

Мыльников Дмитрий Дмитриевич, аспирант, ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» (Российская Федерация, 410050, г. Саратов, 1-й Институтский проезд, 4), e-mail: dmitrymylnikov21@mail.ru

Сазонова Ирина Александровна, главный научный сотрудник, ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» (Российская Федерация, 410050, г. Саратов, 1-й Институтский проезд, 4) <https://orcid.org/0000-0001-9844-5339>, e-mail: iasazonova@mail.ru

Батанов Степан Дмитриевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры, ФГБОУ ВО «Удмуртский ГАУ» (Российская Федерация, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11) <https://orcid.org/0000-0002-6662-2414>, e-mail: stepanbatanov@mail.ru

Николаев Сергей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, проспект Университетский, 26), e-mail: nikolaevvolgau@yandex.ru

Воронцова Елена Сергеевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, проспект Университетский, 26), e-mail: esvoronts@mail.ru

Каширина Лидия Григорьевна, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева, (Россия, 390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1), Author ID: 671505, e-mail: lg.kashirina@yandex.ru

Authors' Information

Mylnikov Dmitry Dmitrievich, Postgraduate student, RosNIISK Rossorgo Federal State Budgetary Scientific Institution (Russian Federation, 410050, Saratov, 1st Institutsky Ave., 4), e-mail: dmitrymylnikov21@mail.ru

Sazonova Irina Aleksandrovna, Chief Researcher, RosNIISK Rossorgo Federal State Budgetary Scientific Institution (Russian Federation, 410050, Saratov, 1st Institutsky Ave., 4), <https://orcid.org/0000-0001-9844-5339>, e-mail: iasazonova@mail.ru

Batanov Stepan Dmitrievich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department, Udmurt State Agrarian University (Russian Federation, 426069, Izhevsk, Studencheskaya Str., 11), <https://orcid.org/0000-0002-6662-2414>, e-mail: stepanbatanov@mail.ru

Nikolaev Sergey Ivanovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Universitetskiy Ave., 26), e-mail: nikolaevvolgau@yandex.ru

Vorontsova Elena Sergeevna, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Universitetskiy Ave., 26), e-mail: esvoronts@mail.ru

Kashirina Lidiya Grigorievna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (Russian Federation, 390044, Ryazan, Kostychev Str., 1), Author ID: 671505, e-mail: lg.kashirina@yandex.ru

DOI: 10.32786/2071-9485-2026-03-54

THE TEMPERATURE EFFECT ON THE *CHERAX QUADRICARINATUS* (VON MARTEN) CRAYFISH FUNCTIONAL STATE ASSESSED BY THE CARDIO ACTIVITY INDICATORS

¹Sladkova S. V., ²Lyubimtsev V. A., ²Kholodkevich S. V., ³Bakhareva A. A., ⁴Kravchenko Yu. V.

¹St. Petersburg State University
St. Petersburg, Russian Federation

²St. Petersburg Research Centre for Environmental Safety of the Russian Academy of Sciences – separate structural subdivision of the St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences
St. Petersburg, Russian Federation

³Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky (PKU)
Moscow, Russian Federation

⁴Volgograd State Agrarian University
Volgograd, Russian Federation

Corresponding author E-mail: sladkova_sv1@mail.ru

Received 31.03.2026

Submitted 28.05.2026

The work was carried out using the equipment of the Environmental Safety Observatory of the Science Park of St. Petersburg State University. St. Petersburg State University within the framework of grant 132392751 funded the work (S. V. Sladkova). The work was also financed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation "Development of methods for monitoring the state of ecosystems in the north-west of Russia", FFZF-2025-0018 (V. A. Lyubimtsev, S. V. Kholodkevich).

Summary

The article examines the effect of temperature on the physiological state of Australian red-claw crayfish *Cherax quadricarinatus* under laboratory conditions using cardio activity parameters (heart rate, HR). An approach is proposed for determining the boundaries of the normal vital activity zone based on the analysis of temperature dependences of HR in resting state, during daytime and nighttime spontaneous activity, and under stress (maximum HR). In a long-term experiment with acclimation to sequentially increasing temperatures from 14 to 34 °C, the thermal comfort zone for these crayfish was established at 22-29 °C, and the upper boundary of thermotolerance was shown to be above 34 °C.

Abstract

Introduction. Temperature is a key abiotic factor affecting the physiology of aquatic organisms, including heart rate (HR), which can serve as a proxy for metabolic rate. Tropical crayfish *Cherax quadricarinatus* are widely used in aquaculture and as bioindicators, but data on their cardio activity in response to temperature changes are limited. **Object.** The aim is to assess the functional state of *Cherax quadricarinatus* by HR parameters at rest, during spontaneous and forced activity within and beyond the thermal comfort zone. **Materials and methods.** Six adult males (22.8±0.9 g, 102.7±4.1 mm) were used. HR was recorded non-invasively using laser fiber-optic photoplethysmographs (840 nm, 10-15 mW). Crayfish were kept at 26 °C for 7 days, then temperature was gradually changed to 14, 22, 26, 29, and 34 °C (3 days each). HR was measured during daytime rest (HRd), minimum resting HR (HRr), nighttime spontaneous activity (HRa), and under stress (HRT – forced activity test). **Results and conclusion.** The HR increased linearly with temperature for HRr, HRd, and HRT over the entire range ($R^2 \geq 0.98$). The difference (HRT–HRr) – the total HR reserve – increased monotonically. However, the range used for spontaneous nighttime activity (HRa–HRr) increased only up to 29 °C and then decreased at 34 °C. The proportion of the HR reserve used at night was maximal at 29 °C (31 %) and minimal at 14 °C (16 %). The ratio of nighttime to daytime activity increased up to 29 °C and then declined. The thermal comfort zone for adult *Cherax quadricarinatus* was determined as 22-29 °C, with an optimum near 29 °C; the upper survival boundary is above 34 °C.

Keywords: crayfish functional state, crayfish physiological indicators, red-clawed crayfish, thermal comfort zone, crayfish thermotolerance, crayfish cardio-activity, *Cherax quadricarinatus*, crayfish temperature adaptation.

Citation. Sladkova S. V., Lyubimtsev V. A., Kholodkevich S. V., Bakhareva A. A., Kravchenko Yu. V. The temperature effect on the *Cherax quadricarinatus* (von Marten) crayfish functional state assessed by the cardio activity indicators. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2026. 3(87). 479-492 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2026-03-54.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 639.517

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ РАКОВ
CHERAX QUADRICARINATUS (VON MARTEN) ОЦЕНИВАЕМОЕ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ
КАРДИОАКТИВНОСТИ**

¹Сладкова С. В., ведущий специалист

²Любимцев В. А., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

²Холодкевич С. В., доктор технических наук, главный научный сотрудник

³Бахарева А. А., доктор сельскохозяйственных наук, доцент

⁴Кравченко Ю. В., кандидат сельскохозяйственных наук

¹Санкт-Петербургский государственный университет

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН –
обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН»

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (ПКУ)

г. Москва, Российская Федерация

⁴ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ

г. Волгоград, Российская Федерация

Работа выполнена с использованием оборудования Обсерватории экологической безопасности Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Работа финансировалась Санкт-Петербургским государственным университетом в рамках гранта 132392751 (С. В. Сладкова). Работа также финансировалась в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Разработка методов мониторинга состояния экосистем на северо-западе России», ФФЗФ-2025-0018 (В. А. Любимцев, С. В. Холодкевич).

Актуальность. Температура является ключевым абиотическим фактором, влияющим на метаболизм гидробионтов. Частота сердечных сокращений (ЧСС) позволяет косвенно оценивать метаболические и физиологические функции. Тропические виды, такие как австралийский красноклешневый рак *Cherax quadricarinatus*, живут близко к верхнему температурному пределу и особенно уязвимы к дальнейшему повышению температуры. Данный вид широко используется в аквакультуре и как биоиндикатор, однако данные о его кардиоактивности в зоне теплового комфорта и на границах то-

лерантности ограничены. **Объект.** Объектом исследования являются взрослые самцы австралийского красноклешневого рака *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868) массой $22,8 \pm 0,9$ г и длиной $102,7 \pm 4,1$ мм. **Материалы и методы.** Для регистрации ЧСС использовали лазерные волоконно-оптические фотоплетизмографы (длина волны 840 нм, мощность 10-15 мВт) с волоконно-оптическим зондом, закрепляемым на карапаксе над сердцем. Эксперимент включал акклимацию раков (исходно культивируемых при 26 °С) к температурам 14, 22, 26, 29 и 34 °С (по 3 суток на каждую температуру). Оценивали: ЧСС в дневное время покоя (ЧССд), минимальную ЧСС покоя (ЧССп), ЧСС в ночной период спонтанной активности (ЧССа) и максимальную ЧСС при вынужденной активности (ЧССт – тест с подвешиванием на 3 мин). **Результаты и выводы.** Зависимости ЧССп, ЧССд и ЧССт от температуры носили линейный характер во всём диапазоне 14-34 °С ($R^2 \geq 0,98$), что указывает на расположение критического температурного максимума выше 34 °С. Резерв увеличения ЧСС (ЧССт–ЧССп) монотонно возрастал с температурой. Однако реально используемый диапазон для ночной активности (ЧССа–ЧССп) увеличивался только до 29 °С, а при 34 °С снижался. Доля используемого резерва ЧСС ночью была максимальна при 29 °С (31 %) и минимальна при 14 °С (16 %). Отношение ночной активности к дневной (Ан/Ад) росло до 29 °С (до 3,7), затем снижалось. Таким образом, зона теплового комфорта для взрослых *Cherax quadricarinatus* составляет 22-29 °С (оптимум ~29 °С), верхняя граница выживания находится выше 34 °С. Предложенный подход, основанный на анализе температурных зависимостей ЧСС в разных функциональных состояниях, может использоваться для определения границ температурной нормы у пресноводных раков.

Ключевые слова: функциональное состояние раков, физиологические показатели раков, красноклешневые раки, зона теплового комфорта, термотолерантность раков, кардиоактивность раков, *Cherax quadricarinatus*, температурная адаптация раков.

Цитирование. Сладкова С. В., Любимцев В. А., Холодкевич С. В., Бахарева А. А., Кравченко Ю. В. Влияние температуры на функциональное состояние раков *Cherax quadricarinatus* (von Marten) оцениваемое по показателям кардиоактивности. Известия НВ АУК. 2026. 3(87). 479-492. DOI: 10.32786/2071-9485-2026-03-54.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Температура является ключевым абиотическим фактором, оказывающим существенное влияние на поведение и физиологию гидробионтов, включая способность к физической нагрузке и репродуктивные функции, непосредственно воздействуя на скорость их метаболизма [1]. Частота сердечных сокращений (ЧСС) наряду со скоростью потребления кислорода может быть использована как мера метаболической и физиологической функции при изменении температуры [2-4], поскольку скорость потребления кислорода можно косвенно оценивать по скорости его доставки. Известно, что многие виды пресноводных раков, как и все эктотермы, весьма уязвимы к изменениям температуры водной среды [5-7]. Считается, что тропические виды живут очень близко к верхнему температурному пределу и поэтому более уязвимы к незначительному дальнейшему повышению температуры, чем эврибионтные виды [8]. Это обусловлено тем, что температурная зона выживания шире, чем зона температурного комфорта, в которой животные максимально проявляют свойственную виду суточную активность, необходимую для нормального роста и размножения [9, 10].

Австралийские красноклешневые раки *Cherax quadricarinatus* (C. q.) von Martens, 1868, получившие широкую известность в мире как объект тепловодной аквакультуры, родом из Северной Австралии и Папуа-Новой Гвинеи естественным образом адаптированы к диапазону температур от 23 до 31 °С [11]. В настоящее время в литературе приводятся различные данные экстремальных температурных границ этого вида от 10 до 30 °С [12], от 22 до 34 °С [13, 14] и до 40 °С [15].

На сегодняшний день австралийский красноклешневый рак широко распространен, главным образом, в тропических и субтропических регионах. Его дикие популяции обнаруживают в водоемах различных стран Азии, Африки, Европы и Америки [16, 17], и количество мест, где раки этого вида появляются, продолжает расти. Так, этот вид недавно был обнаружен в разных штатах Мексики [18]. В водоемах зоны умеренного климата его еще не зарегистрировали, поскольку, как было показано при длительном содержании в воде с температурой 1-4 °С, красноклешневые раки не могут выживать [19]. Однако этот вид может выжить там, где есть подогретые стоки, и потепление климата может этому способствовать. Несмотря на имеющиеся сведения о температурной толерантности и механизмах физиологической компенсации резких температурных изменений у пресноводных раков [20], а также работы по выращиванию и культивированию австралийских красноклеш-

невых раков [13, 21-24,] в литературе нет данных о влиянии температуры на кардиоактивность красноклешневых раков в области «теплового комфорта» и, особенно, при приближении к границам зоны температурной толерантности.

Основной целью данной работы является оценка функционального состояния раков *Cherax quadricarinatus* по показателям их кардиоактивности (значения ЧСС) в покое, при спонтанной и вынужденной активности для зоны «теплового комфорта» и при выходе за ее границы. Исследование имеет и практическую значимость, поскольку этот вид является перспективным объектом аквакультуры. Красноклешневые раки используются для оценки качества биологически очищенных сточных вод в условиях высоких температур [25] и как индикаторные организмы теплых эвтрофных водоемов [26]. Это связано с возможностью взрослых раков длительное время жить в условиях аномальных концентраций кислорода и биогенов в воде [27, 28], а также с высокой чувствительностью к хроническому загрязнению воды тяжелыми металлами, например никелем и медью [29]. Все это позволяет использовать их в качестве биоиндикаторов в биологических системах раннего предупреждения. В этой связи важно учитывать способность этих видов акклиматизироваться к условиям, зачастую сильно отличающимся от естественной среды.

Материалы и методы. Красноклешневые раки культивируются в лабораторных условиях ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» научного парка СПбГУ при температуре 26 °С. Поддерживались следующие параметры воды: pH 7,2-7,4, оксигенация выше 90 %, общая жесткость 40-42 мг/л. Экспериментальная группа состояла из 6 перелинявших половозрелых самцов весом $22,8 \pm 0,9$ г и длиной $102,7 \pm 4,1$ мм. Для регистрации сигнала кардиоактивности раков использовались лазерные волоконно-оптические фотоплетизмографы (далее – ЛВОФ) с длиной волны лазерного света 840 нм и мощностью светового потока 10-15 мВт. Для подведения света к зоне карапакса над областью сердца рака и отведения рассеянного светового потока к ЛВОФ использовался волоконно-оптический зонд [30], который прикреплялся к карапаксу рака. Это обеспечивает полную неинвазивность процедуры определения частоты сердечных сокращений (ЧСС). Кроме того, благодаря своей эластичности зонд не влияет на подвижность животного. В наших предыдущих исследованиях не было замечено негативного влияния лазерного света указанной мощности на выживаемость, питание и подвижность половозрелых самцов раков различных видов [31-33]. Отводимый световой поток, изменяющийся по интенсивности в такт с биением сердца рака, преобразовывался в электрический сигнал. Сигналы с 6 ЛВОФ поступали на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Получающийся при этом ряд значений сохранялся в виде отдельного файла (фотоплетизмограмма). При обработке фотоплетизмограммы в режиме реального времени с помощью оригинальной программы VarPulse [30] определялся временной интервал между последовательными ударами и рассчитывалось среднее значение ЧСС (рисунок 1).



Рисунок 1 –Красноклешневый рак *Cherax quadricarinatus* с оптоволоконным зондом, размещенным на карапаксе над сердцем для измерения кардиоактивности, типичная кривая которой показана внизу рисунка

Figure 1 – Red-claw crayfish *Cherax quadricarinatus* with an optical fiber probe placed on the carapace over the heart for measuring cardio activity; the typical recording curve is shown at the bottom of the figure

После закрепления зонда раков помещали в отдельные аквариумы с непрозрачными стенками и кварцевой крошкой на дне. Укрытием для животного («убежищем») служил горизонтально расположенный в углу аквариума кусок полимерной трубки диаметром 80 мм с прорезью наверху для пропуска оптического зонда. Толщина слоя воды в аквариумах составляла 9 см. Аквариумы были подключены к системе рециркуляции воды, включающей в себя накопительный бак с погруженным циркуляционным насосом. 6 аквариумов размещались на закрытом стеллаже с локальным освещением люминесцентными лампами, управляемыми таймером, установленным на 12 часов света/ 12 часов темноты: с 7:30 до 19:30 светло и с 19:30 до 7:30 темно. В экспериментах была использована отстоянная водопроводная вода с низкой минерализацией 50 мг/л. Животных кормили один раз в трое суток личинками хирономид в количестве примерно 2 % от общей массы. На следующий день остатки еды удалялись. При ежедневной замене примерно 30 % общего объема воды (100 л) в системе рециркуляции на отстоянную водопроводную воду той же температуры концентрация нитратов изменялась в диапазоне 12-30 мг/л. В эксперименте температура изменялась от 14 до 34 °С. Температуру воды в диапазоне от 14 до 20 °С поддерживали за счет охлаждения воздуха (климатическая камера – холодильник), а от 21 до 34 °С – за счет подогрева воды в накопительной емкости погружными электронагревателями (Тетра НТ 25-300).

Раки после помещения в аквариумы содержались семь дней при начальной температуре 26 °С, которая в течение трех последующих дней постепенно снижалась до 14 °С. Такая температура сохранялась стабильной в течение семи дней, и в конце этого периода измерялись характеристики ЧСС; затем температуру воды постепенно повышали в течение 5-6 ч. Далее каждую температуру (22, 26, 29, 34 °С) поддерживали неизменной в течение трёх дней. Изменяли температуру воды всегда после 20:00. Еду давали также в 20:00, но на следующий день после изменения температуры. Значения ЧСС в разных функциональных состояниях (покой, спонтанная и вынужденная активность) измеряли в последние сутки экспозиции при каждой температуре. Такая дискретность была выбрана из соображений протестировать как можно большее количество температур и избежать линьки раков, поскольку известно, что повышение температуры может стимулировать линочный процесс.

При анализе непрерывной динамики ЧСС, выбирались следующие величины:

1. ЧСС_д – значение, полученное при усреднении значений ЧСС за период с 12.00 до 16.00 – время минимальной активности раков в эксперименте при искусственном освещении.

2. ЧСС_п – минимальное значение, полученное усреднением ЧСС за 10 минут в течение периода времени с 12.00 ч до 16.00 ч. Такие значения ЧСС регистрируются в период естественной неподвижности раков и характерны для метаболического уровня наиболее близкого к стандартному обмену.

2. ЧСС_а – значение, полученное при усреднении ЧСС за период с 21.00 до 3.00 – время максимальной активности раков в эксперименте в темноте.

3. ЧСС_т – максимальное значение, полученное усреднением ЧСС во время вынужденной активности при тестировании раков. Тестирование проводилось следующим образом: раков за оптический зонд датчика извлекали из укрытия и подвешивали на оптоволлокне в воде на высоте 5 см над дном аквариума на 3 мин, после чего отпускали. ЧСС усредняли в течение подвешивания и в течение 10 мин после. Похожая процедура применялась для оценки максимального аэробного энергообмена *Carcinus maenas* [34].

Данные о частоте сердечных сокращений оценивали с помощью программ VarPulse и STATISTICA для Windows. Для построения графиков значений ЧСС_п, ЧСС_д, ЧСС_т, ЧСС_н от температуры использованы средние значения для групп $n = 6$. Вариация представлена как стандартная ошибка среднего значения (среднее $\pm$ SE). Достоверность различий проверяли с помощью t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Различия считались достоверными при $P < 0,05$.

Результаты и обсуждение. Динамика изменений ЧСС раков при 26 °С на начальном этапе экспериментов показала, что уже через 4 суток акклимация раков к условиям эксперимента в основном завершается. ЧСС в дневное время снижается от максимальных значений 145-165 уд/мин, вызванных стрессом от крепления датчика и перемещения раков в аквариумы, до минимальных 50-55 уд/мин и в дальнейшем стабилизируется на этом уровне. На рисунке 2 показан типичный пример полностью обусловленного режимом искусственного освещения суточного ритма ЧСС красноклешневых раков, культивируемых в лабораторных условиях при 26 °С.

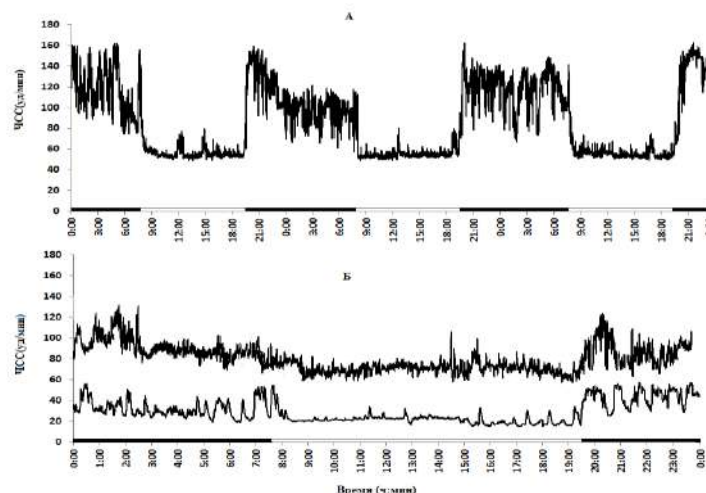


Рисунок 2 – (А) Типичная динамика ЧСС раков в течение 3 суток при 26 °С.
(Б). Суточная динамика ЧСС для одного из раков при температурах 14 °С (нижняя кривая) и 34 °С.
(верхняя кривая) Черные участки временной шкалы показывают темный период
Figure 2 – (A) Typical dynamics of crayfish heart rate over 3 days at 26 °C.
(B) Daily dynamics of heart rate for one of the crayfish at temperatures of 14 °C (lower curve) and 34 °C
(upper curve). Black segments on the time scale indicate the dark period

Визуальное наблюдение показало, что большую часть дня раки оставались неподвижными в своих убежищах и активно перемещались за пределы укрытий в ночное время, что сопровождалось повышением ЧСС. При этом ЧСС в светлое время суток, как правило, более стабильна, а в период темноты – более вариабельна. Такой суточный характер изменения ЧСС наблюдается при всех исследованных температурах. При температурах значительно ниже температуры первичной акклимации (26 °С) разница между величинами ЧСС в дневной и ночной периоды (ЧССд – ЧССн) уменьшалась при снижении температуры за счет большего падения ЧСС в ночное время (ЧССа). Причем наблюдалось как уменьшение максимальных значений (ЧССа), так и сокращение продолжительности периодов ночного повышения ЧСС. При температурах выше температуры первоначальной акклимации (26 °С) увеличивалась ЧСС как днем, так и ночью, но разница между ними уменьшалась за счет более значительного роста ЧСС днем. Как видно из рисунка 2, при крайних температурах 14 °С и 34 °С проявление суточного ритма менее выражено, а при температуре 34 °С наблюдается большая вариабельность ЧСС не только в ночные часы, но и в дневное время.

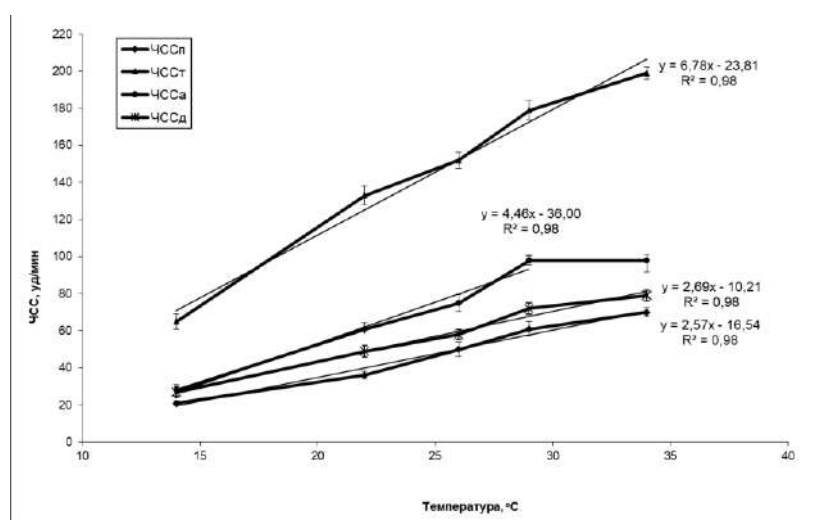


Рисунок 3 – Температурные зависимости ЧСС (средние значения по группе) и их линейные аппроксимации раков *Cherax quadricarinatus* в состоянии покоя (ЧССн), ЧССд в дневной период, в ночной период спонтанной активности (ЧССа) и вынужденной активности при тестировании (ЧССт)
Figure 3 – Temperature dependences of heart rate (group mean values) and their linear approximations in *Cherax quadricarinatus* at rest (HRr), during daytime (HRd), during nighttime spontaneous activity (HRa), and during forced activity under testing (HRT)

Зависимость ЧСС раков от температуры в разных функциональных состояниях в диапазоне температур от 14 °С до 34 °С представлены на рисунке 3. Кривые ЧССп и ЧССт имеют монотонный рост на протяжении всего исследованного диапазона температур и достаточно хорошо аппроксимируются линейной зависимостью (коэффициенты детерминации $R^2 \geq 0,98$).

Кривая зависимости ЧССа от температуры монотонно растет в интервале температур от 14 до 29 °С и также может быть аппроксимирована линейной зависимостью (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9806$), а далее ее рост практически прекращается. Следует иметь в виду разность (ЧССт-ЧССп) представляет собой весь возможный резерв увеличения ЧСС для обеспечения адекватной доставки кислорода органам и тканям для нормальной жизнедеятельности, а разность (ЧССа-ЧССп) – диапазон увеличения ЧСС, реально используемый для спонтанной локомоторной активности и питания. Из рисунка видно, что у красноклешневых раков разность (ЧССт-ЧССп) монотонно увеличивается с ростом температуры во всем исследованном диапазоне температур. Но реально используемый раками для ночной локомоторной активности диапазон ЧСС, между кривыми (ЧССа-ЧССп), значительно меньший, чем резерв, увеличивается с повышением температуры только до 29 °С, а далее, в диапазоне от 29 до 34 °С, наблюдается уменьшение использования энергетических ресурсов на активность, при том, что энергетические возможности продолжают увеличиваться. Доля реализуемого диапазона значений ЧСС в период «ночной» активности от максимально возможного, которую можно вычислить как $K = (ЧССа - ЧССп) / (ЧССт - ЧССп) \cdot 100 \%$, наибольшая при 29 °С и составляет чуть больше 30 %, а минимальная – в районе 14 °С и составляет 16 % (рисунок 4).

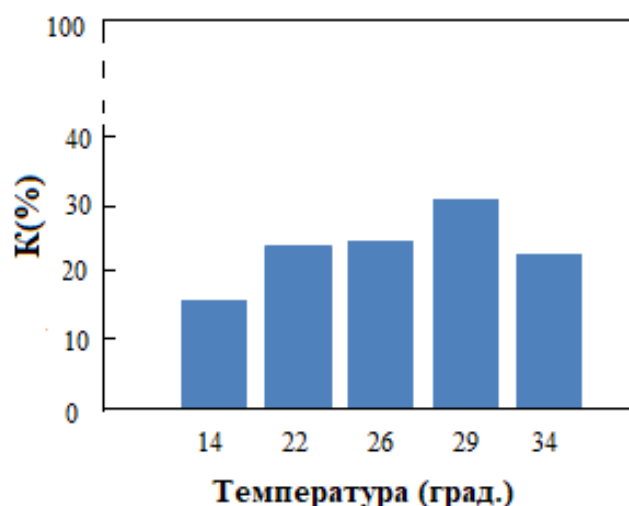


Рисунок 4 – Доля от резерва увеличения ЧСС, которую раки используют в ходе «спонтанной» ночной активности ($K(\%) = (ЧССа - ЧССп) / (ЧССт - ЧССп) \cdot 100 \%$) при различных температурах от 14 и до 34 °С

Figure 4 – Proportion of the heart rate reserve used by crayfish during spontaneous nighttime activity ($K(\%) = (HRa - HRp) / (HRt - HRp) \cdot 100 \%$) at various temperatures from 14 to 34 °С.

Похожим образом изменяется и спонтанная дневная активность для этих же температур. Но наиболее явно влияние температуры на активность раков в ночное (Ан) и дневное (Ад) время видно при прямом сравнении этих величин в соответствии с формулой $Ан/Ад = (ЧССа - ЧССп) / (ЧССд - ЧССп)$ (рисунок 5).

После акклимации к экспериментальным условиям, которая проявлялась в стабилизации ЧСС в дневное время, раки при температуре культивирования (26 °С) демонстрировали отчетливо выраженный, типичный для вида суточный кардиоритм с чередованием дневного периода с низкими значениями ЧСС и ночного – с более высокими значениями, что является показателем снижения уровня стресса и восстановления естественного суточного цикла. (Сладкова и др., 2017). Такое соотношение количественных характеристик кардиоактивности в течение суток отражает изменения в поведении раков, соответствующие переходу при наступлении темноты из состояния покоя в активное состояние, связанное с их сумеречной активностью и особенностями организации пищедобывательного поведения. Суточный ритм ЧСС, наблюдаемый нами у тропических красноклешневых раков, без сомнения, является проявле-

нием характерного для *Decapoda* циркадианного ритма, синхронизированного с режимом искусственного освещения «день-ночь» (12C:12T) [31, 35]. Такой характер суточного ритма ЧСС является показателем минимального стрессирования раков в процессе длительного эксперимента, что служит необходимым условием для исследований кардиоактивности в различных функциональных состояниях в искусственных условиях [36].

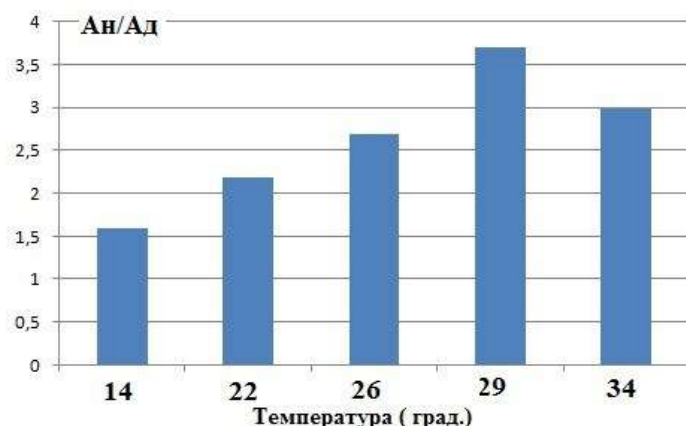


Рисунок 5 – Соотношение ночной (Ан) и дневной (Ад) активностей раков при температурах 14-34 °С, оцениваемое по различию температурной зависимости величин ЧССа, ЧССд и ЧССп в соответствии с формулой; $(An/Ad) = (ЧССа - ЧССп) / (ЧССд - ЧССп)$

Figure 5 – Ratio of nighttime (An) to daytime (Ad) activity in crayfish at temperatures of 14-34 °C, estimated from the difference in temperature dependences of HRa, HRd and HRp according to the formula:
 $(An/Ad) = (HRa - HRp) / (HRd - HRp)$

При температуре культивирования, равной 26 °С, суточный ритм кардиоактивности проявляется наиболее отчетливо. Из литературы известно, что температура 26 °С соответствует диапазону температур, в котором наиболее интенсивно идет рост и сохраняется высокая выживаемость молоди красноклешневых раков [13, 37]. Выраженность суточного ритма нивелируется как при высоких, так и при низких температурах, причем при низких температурах это связано с уменьшением активности в ночное время, а при высоких – с увеличением активности в дневное время, возможно, связанной с попыткой избежать неблагоприятных условий.

Для оценки функционального (физиологического) состояния раков мы используем энергетический подход. Минимальная и максимальная скорости метаболизма, которые косвенно можно оценивать по ЧСС, а также разница между ними (метаболический диапазон) являются показателями физиологического состояния организма. ЧСС в покое – это наилучший практический показатель минимального (основного) уровня метаболизма, а ЧСС во время вынужденной активности – максимального уровня. Нами выявлено, что ЧСС раков увеличивалась с повышением температуры во всех метаболических состояниях (ЧССп, ЧССд, ЧССа и ЧССт). При температурах в диапазоне 14-26 °С значения ЧССд на 10-12 ударов выше, чем ЧССп. Судя по всему, состояние раков в дневное время можно охарактеризовать как оперативный покой, когда энергия расходуется не только на поддержание структуры, но и на обеспечение сенсорного восприятия окружающей среды и ограниченную подвижность в убежище. При изучении поведения у животных, активных в сумеречное и ночное время, таких как высшие раки и креветки, уровень метаболизма в дневное время принимается в качестве первого приближения основного метаболизма [6, 7]. В полученных эмпирических кривых не наблюдается значительных отклонений от линейной зависимости для ЧСС покоя (ЧССп), обеспечивающей стандартный метаболизм, ЧСС в дневное время (ЧССд) и максимальной ЧСС при вынужденной активности в тесте (ЧССт) во всем исследованном диапазоне температур. Следовательно, критический температурный максимум (КТМ), соответствующий температуре, когда максимальная ЧСС перестает расти с ростом температуры для этого вида раков находится выше 34 °С.

По литературным данным КТМ ювенильных красноклешневых раков акклиматизированных к температуре 26 °С составляет 40 °С [38]. Но нами получено резкое снижение скорости роста ЧССа, определяемой у красноклешневых раков во время ночной спонтанной активности с увеличением температуры от 29 до 34 °С. Это говорит о том, что, несмотря на

успешную акклимацию раков ко всем высоким температурам эксперимента и увеличивающемуся энергетическим резервом (ЧСС-ЧССп) для активности, начиная с 29 °С ночная активность раков, связанная с активной жизнедеятельностью в условиях эксперимента (ЧССа-ЧССп), практически не увеличивается. При 34 °С доля используемого энергетического резерва (22 %) существенно ниже, чем при 29 °С (31 %) и в тенденции даже ниже, чем при 22 °С (рисунок 4). Это свидетельствует в пользу того, что концепция, связывающая ограничения адаптации высших ракообразных к высоким температурам с недостаточной способностью сердечно-сосудистой системы адекватно снабжать ткани кислородом при высоких потребностях [39], не является приоритетной для красноклешневых раков и согласуется с результатами, полученными для других тропических видов [6, 7]. Это, по всей вероятности, связано с расположением у высших раков сердца вблизи жабр, и поэтому все ткани сердца омываются максимально насыщенной кислородом гемолимфой [40]. Минимальное использование энергетического резерва (16 %) для жизнедеятельности при минимальном самом резерве наблюдался у раков при температуре 14 °С, причем средняя ЧСС раков в ночное время практически не отличалась от ЧСС днем, что говорит о том, что при данной температуре раки впадают в неактивное состояние, и длительное содержание в таких условиях, возможно приведет к гибели животных.

Известно, что нижняя температура избегания составляет у австралийских красноклешневых раков 11,7 °С [38], а содержание в условиях, имитирующих зимний температурный режим европейских экосистем умеренной зоны, показал их неспособность переживать низкие температуры длительное время [19]. По литературным данным при температуре 15 °С молодь красноклешневых раков не росла, и вся погибла к концу шестой недели [14]. Принимая во внимание риск гибели красноклешневых раков, самая низкая температура в нашем эксперименте была 14 °С и представляла главным образом теоретический интерес, поскольку в естественных условиях обитания этих раков такая температура не реализуется.

Необходимо отметить, что полученные нами данные справедливы для раков, первоначально акклимированных в опыте к 26 °С – типичной температуре в весенне-летний период в естественных условиях их обитания. В лабораторных экспериментах показано, что пределы термальной толерантности красноклешневых раков, определяемые в остром эксперименте по максимальной ЧСС, увеличиваются с ростом температуры акклимации [38].

При определении диапазона «оптимальных температур» [41] для эктотермных животных обычно имеют в виду температуры, оптимальные для полного цикла развития. Для этого в экспериментальных условиях обычно ориентируются на показатели скорости роста организма и величину потребления кислорода [6, 13, 20]. Изменения скорости потребления кислорода при изменении температуры можно условно оценить по изменению скорости его доставки, которая в основном обеспечивается изменением ЧСС [7]. Сопоставление ночной (Ан) и дневной (Ад) активности (Ан/Ад) показало (рисунок 5), что в диапазоне от 15 до 29 °С ночная активность возрастает при увеличении температуры значительно быстрее, чем дневная активность, а отношение (Ан/Ад) растет от 1,6 до 3,7. Но при дальнейшем увеличении температуры от 29 до 34 °С рост (Ан/Ад) сменяется снижением (от 3,7 до 3,0). Это связано с наметившейся тенденцией снижения ночной активности и небольшого увеличения дневной активности для этих температур. Эти качественные различия ночной и дневной активностей для высоких температур (29-34 °С) связаны с тем, что значительная локомоторная активность в ночное время в течении 4-5 часов, приводящая к ЧССа-ЧССп = 35-40 удар/мин, требует значительно больших энергетических затрат, чем при дневной активности (29-34 °С) и при ночной активности при меньших температурах. Мы считаем, что в условиях высоких температур (29-34 °С) в течение длительных периодов «спонтанной» ночной локомоторной активности ограничение физической активности связано с ухудшением работы мышц, обусловленным изменением биохимии мышечного сокращения. Такое же ограничение физической активности было отмечено [7] у *A. Astacus*.

При переходе от низких для красноклешневых раков температур (14 °С) к температуре в области теплового комфорта (22-26 °С) обе величины, характеризующие спонтанную активность в дневной (Ад) и ночной (Ан) периоды, показывают значительный рост (в 1,7 и 2,4 раза соответственно). Мы связываем эти различия с тем, что локомоторная активность, наблюдаемая в ходе ночной активности значима при температурах в зоне теплового комфорта и незначительна при низких температурах. Все это позволяет оценить границы зоны теплового комфорта для половозрелых красноклешневых раков от 22 до 29 °С.

Поскольку красноклешневые раки являются перспективным объектом аквакультуры, существует достаточное количество работ, где оцениваются оптимальные температуры только для роста молоди раков [12, 14, 37]. Но температура наибольшей скорости роста не всегда совпадает с температурой, оптимальной для репродукции. Другой подход к определению оптимального температурного диапазона основан либо на приоритетном выборе в эксперименте соответствующих температурных зон, либо на определении диапазона температур, где животные максимально проявляют свойственную виду ночную активность, необходимую для нормального роста и размножения [10, 42, 43]. В нашем исследовании доля реализуемого диапазона значений ЧСС в период «ночной» активности от максимально возможного является валидным показателем ночной активности и физиологической производительности. Зависимость ее от температуры имеет максимум при температуре 29 °С, близкие к этому значения – в диапазоне от 22 °С вплоть до 29 °С, и существенно меньшие – при температурах 14 и 34 °С. Исходя из этого можно определить границы зоны жизнедеятельности красноклешневых раков *Cherax quadricarinatus* (von Martens) первоначально акклиматизированных к 26 °С: нижняя граница в районе 14 °С, верхняя – выше 34 °С, температурная зона нормальной жизнедеятельности от 22 °С до 29 °С с оптимумом в районе 29 °С. Полученные оценки температурных границ хорошо согласуются с приводимыми в литературе значениями.

Заключение. В работе предложен подход для определения границ зоны температурного комфорта пресноводных раков *Cherax quadricarinatus*, основанный на анализе температурных зависимостей ЧСС, которые раки демонстрируют в условиях абсолютного покоя (ЧССп) в условиях дневной (ЧССд) и ночной (ЧССа) активностей, а также максимального значения ЧСС в условиях стресса (ЧССт).

В лабораторных условиях при адаптации раков в течение 3 суток к последовательно возрастающим температурам (14, 22, 26, 29 и 34 °С) была установлена зона теплового комфорта этих раков (22-29 °С) с точки зрения их активности и оценена граница выживания – не ниже 34 °С.

Conclusions. The approach is proposed for determining the boundaries of the thermal comfort zone of freshwater crayfish *Cherax quadricarinatus*, based on the analysis of temperature dependences of heart rate (HR) that crayfish demonstrate under conditions of absolute rest (HRr), daytime (HRd) and nighttime (HRa) activity, as well as the maximum HR under stress (HRT).

Under laboratory conditions, during acclimation of crayfish for 3 days to successively increasing temperatures (14, 22, 26, 29 and 34 °C), the thermal comfort zone of these crayfish (22-29 °C) was established in terms of their activity, and the survival boundary was estimated to be no lower than 34 °C.

Библиографический список

1. Hochachka P. W., Somero G. N. Biochemical adaptation: mechanism and process in physiological evolution. New York: Oxford University Press, 2002. 466 p.
2. Spaargaren D. H., Achituv Y. On the heart rate response to rapid temperature changes in various marine and brackish water crustaceans. Netherlands Journal of Sea Research. 1977. No. 11 (1). Pp. 107-117.
3. Villarreal H. Effect of temperature on oxygen consumption and heart rate of the Australian crayfish *Cherax tenuimanus* (Smith). Comparative Biochemistry and Physiology – Part A: Physiology. 1990. V. 95A. Pp. 189-193.
4. Green J. A. The heart rate method for estimating metabolic rate: a review and recommendations. Comp. Biochem. Physiol. Part A Mol. Integr. Physiol. 2011. No. 158. Pp. 287-304.
5. Hossain M. A., Lahoz-Monfort J. J., Burgman M. A., Böhm M., Kujala H., Bland L. M. Assessing the vulnerability of freshwater crayfish to climate change. Divers Distrib. 2018. No. 24. Pp. 1830-1843.
6. Ern R., Huong D. T. T., Phuong N. T., Wang T., Bayley M. Oxygen delivery does not limit thermal tolerance in a tropical eurythermal crustacean. J. Exp. Biol. 2014. V. 217. Pp. 809-814.
7. Ern R., Huong D. T. T., Phuong N. T., Madsen P. T., Wang T., Bayley M. Some like it hot: Thermal tolerance and oxygen supply capacity in two eurythermal crustaceans. Sci. Rep. 2015. No. 5. Art. 10743.
8. Stillman J. H., Somero G. N. A comparative analysis of the upper thermal tolerance limits of eastern Pacific porcelain crabs, genus *Petrolisthes*: influences of latitude, vertical zonation, acclimation and phylogeny. Physiological and Biochemical Zoology. 2000. No. 73. Pp. 200-208.
9. Fry F. E. J. The effect of environmental factors on the physiology of fish. Fish Physiology. London, 1971. V. 6.
10. Wang T., Overgaard J. The heartbreak of adapting to global warming. Science. 2007. No. 315. Pp. 49-50.
11. Борисов Р. Р., Ковачева Н. П., Акимова М. Ю., Паршин-Чудин А. В. Биология и культивирование австралийского красноклешневого рака *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868). М.: Изд-во ВНИРО.
12. Austin C. M. Effect of temperature and salinity on the survival and growth of juvenile red-claw (*Cherax quadricarinatus*). Freshwater Crayfish. 1995. No. 10. Pp. 419-426.
13. Jones C. M. Effect of temperature on growth and survival of the tropical freshwater crayfish *Cherax quadricarinatus* (Von Martens) (Decapoda, Parastacidae). Freshwater Crayfish. 1995. No. 8. Pp. 391-398.

14. King C. R. Growth and survival of red-claw crayfish hatchlings (*Cherax quadricarinatus* von Martens) in relation to temperature, with comments on the relative suitability of *Cherax quadricarinatus* and *Cherax destructor* for culture in Queensland. *Aquaculture*. 1994. No. 122. Pp. 75-80.
15. Richwell A. An assessment of critical thermal maximum (CTmax) of the invasive Australian crayfish, *Cherax quadricarinatus*, and native macroinvertebrates, Caridinanolitica and Coenagrionidae in Lake Kariba, Zimbabwe. MS thesis, Bindura University of Science Education. Zimbabwe, 2013.
16. Sallehuddin A. S., Kamarudin A. S., Ismail N. Review on the global distribution of wild population of Australian Redclaw Crayfish, *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868). *Bioscience research*. 2021. V. 18. No. 2. Pp. 194-207.
17. Haubrock P., Oficialdegui F., Yiwen Z., Zeng Z., Patoka J., Yeo D. C. Y., Kouba A. The red-claw crayfish: A prominent aquaculture species with invasive potential in tropical and subtropical biodiversity hotspots. *Reviews in Aquaculture*. 2021. V. 13. Pp. 1488-1530.
18. Rodríguez-Cruz L. D., Torres-Olvera M. J., Durán-Rodríguez O. Y., Juan Pablo R. H. The invasive Australian red-claw crayfish *Cherax quadricarinatus* Von Martens, 1868: the new threat for biodiversity in the Sierra Gorda Biosphere Reserve, Central Mexican Plateau. *Bio Invasions Records*. 2023. No. 12 (3). Pp. 819-828.
19. Veselý L., Buřič M., Kouba A. Hardy exotics species in temperate zone: Can «warm water» crayfish invaders establish regardless of low temperatures? *Scientific Reports*. 2015. No. 5. Art. 16340. Pp. 1-7.
20. Westhoff J. T., Rosenberger A. E. A global review of freshwater crayfish temperature tolerance, preference, and optimal growth. *Rev Fish Biol Fisheries*. 2016. No. 26 (3). Pp. 329-349.
21. Karplus I., Harpaz S., Hulata G., Segev R., Barki A. Culture of the Australian red-claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in Israel. *The Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgeh*. 2001. No. 53 (1). Pp. 23-33.
22. Лагуткина Л. Ю., Пономарев С. В. Новый объект тепловодной аквакультуры – Австралийский красноклешневый рак (*Cherax quadricarinatus*). *Вестник АГТУ*. 2008. № 6 (47).
23. Борисов Р. Р., Жигин А. В., Ковачева Н. П., Кряхова Н.В., Никонова И. Н. Биологические аспекты культивирования австралийского красноклешневого рака *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868) в России. *Рыбное хозяйство*. 2024. № 3. С. 80-92.
24. Badryzlova N., Assylbekova S., Koishybayeva S., Bulavin Y., Makhmetov I., Prospects for growing Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in the industrial conditions of Kazakhstani fish farms. *AACL Bioflux*. 2024. No. 17 (6). Pp. 2535-2548.
25. Mel'nik E. A., Rublevskaya O. N., Pankova G. A., Kholodkevich S. V., Ivanov A. V., Kornienko E. L., Sladkova S. V., Lyubimcev V. A., Kurakin A. S. Bioelectronic system for toxicological safety control of biologically purified wastewater. *Water supply and plumbing*. 2013. No. 1. Pp. 7-12.
26. Reynolds J., Souty-Grosset C. *Management of Freshwater Biodiversity*. Cambridge: University press, 2012. 374 p.
27. Ghanawi J., Saoud I. P. Molting, reproductive biology, and hatchery management of red claw crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens 1868). *Aquaculture*. 2012. V. 358-359. Pp. 183-195.
28. Carreño-León D., Racotta-Dimitrov I., Casillas-Hernández R., Monge-Quevedo A., Ocampo-Victoria L., Naranjo-Páramo J., Villarreal H. Growth, metabolic and physiological response of juvenile *Cherax quadricarinatus* fed different available nutritional substrates. *Aquac. Res. Development*. 2014. V. 5. № 2.
29. Nakayama S. M., Ikenaka Y., Muzandu K., Choongo K., Oroszlany B., Teraoka H., Mizuno N., Ishizuka M. Heavy metal accumulation in lake sediments, fish (*Oreochromis niloticus* and *Serranochromis thumbergi*), and crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in Lake Itzhi-tezhi and Lake Kariba, Zambia. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2010. V. 59. № 2. Pp. 291-300.
30. Kholodkevich S. V., Ivanov, A. V., Kurakin A. S., Kornienko E. L., Fedotov V. P. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations, *J. Environmental Bioindicators*. 2008. No. 3 (1). Pp. 3-34.
31. Удалова Г. П., Холодкевич С. В., Сладкова С. В., Иванов А. В., Рымша В. А. Исследование циркадианной активности раков *Pontastacus Leptodactyls* при их многомесячном содержании в протоке речной воды. *Ж. эвол. биохимии и физиологии*. 2009. Т. 45. № 3. С. 304-312.
32. Сладкова С. В., Сафронова Д. В., Холодкевич С. В. Изучение влияния изменений режимов освещенности, температуры и процесса кормления на кардиоактивность раков-биоиндикаторов в биоэлектронных системах мониторинга качества поверхностных вод. *Вестник СПбГУ. Сер. 3. Биология*. 2016. Вып. 1. С. 137-149.
33. Сладкова С. В., Холодкевич С. В., Сафронова Д. В., Борисов Р. Р. Кардиоактивность раков *Cherax quadricarinatus* (von Martens 1868) в различных физиологических состояниях. *Принципы экологии*. 2017. Т. 6. № 3. С. 40-53.
34. Rovero, Hughes, Whiteley, Chelazzi Estimating the energetic cost of fighting in shore crabs by noninvasive monitoring of heartbeat rate. 2000. No. 59. Pp. 705-713.
35. Styrrishave B., Bojsen B. H., Witthoff H., Andersen O. Diurnal variations in physiology and behaviour of the noble crayfish *Astacus astacus* and the signal crayfish *Pacifastacus leniusculus*. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*. 2007. V. 40. № 1. Pp. 63-77.
36. McGaw I. J., Nancollas S. J. Experimental set-up influences the cardiovascular responses of decapod crustaceans to environmental change. *Can. J. Zool.* 2018. No. 96. Pp. 1043-1052.
37. Кряхова Н. В., Борисов Р. Р., Никонова И. Н. Влияние температуры на питание и рост молоди австралийского красноклешневого рака *Cherax quadricarinatus* (Decapoda, Parastacidae). *Вопросы рыболовства*. 2024. Т. 25. № 3. С. 169-180.
38. Diaz F., Re A. D., Sierra E., Amador G. Behavioral thermoregulation and critical limits applied to the culture of red claw crayfish *Cherax quadricarinatus* (Van Martens). *Freshwater Crayfish*. 2004. No. 14. Pp. 90-98.
39. Pörtner H. O. Oxygen and capacity limitation of thermal tolerance: a matrix for integrating climate related stressors in marine ecosystems. *J. Exp. Biol.* 2010. No. 213. Pp. 881-893.
40. McMahon B. R. Control of cardiovascular function and its evolution in Crustacea. *The journal of experimental biology*. 2001. V. 204. Pp. 923-932.

41. Angilletta M. J., Huey R. D., Frazier M. R. Thermodynamic effect on organismal performance: Is hotter better? *Physiological and biochemical zoology*. 2010. V. 83. No. 2. Pp. 197-206.
42. Kivivuori L. A. Temperature selection behavior of cold- and warm-acclimated crayfish (*Astacus Astacus* (L.)). *Thermal Biology*. 1994. V. 19. No. 5. Pp. 291-297.
43. Garcí'a-Guerrero, M., Herná'ndez-Sandoval P, Ordun'a-Rojas J., Corte's-Jacinto E. Effect of temperature on weight increase, survival, and thermal preference of juvenile red-claw crayfish *Cherax quadricarinatus*. *Hidrobiología*. 2013. No. 23. Pp. 73-81.

References

1. Hochachka P. W., Somero G. N. *Biochemical adaptation: mechanism and process in physiological evolution*. New York: Oxford University Press, 2002. 466 p.
2. Spaargaren D. H., Achituv Y. On the heart rate response to rapid temperature changes in various marine and brackish water crustaceans. *Netherlands Journal of Sea Research*. 1977. No. 11 (1). Pp. 107-117.
3. Villarreal H. Effect of temperature on oxygen consumption and heart rate of the Australian crayfish *Cherax tenuimanus* (Smith). *Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Physiology*. 1990. V. 95A. Pp. 189-193.
4. Green J. A. The heart rate method for estimating metabolic rate: a review and recommendations. *Comp. Biochem. Physiol. Part A Mol. Integr. Physiol.* 2011. No. 158. Pp. 287-304.
5. Hossain M. A., Lahoz-Monfort J. J., Burgman M. A., Böhm M., Kujala H., Bland L. M. Assessing the vulnerability of freshwater crayfish to climate change. *Divers Distrib.* 2018. No. 24. Pp. 1830-1843.
6. Ern R., Huong D. T. T., Phuong N. T., Wang T., Bayley M. Oxygen delivery does not limit thermal tolerance in a tropical eurythermal crustacean. *J. Exp. Biol.* 2014. V. 217. Pp. 809-814.
7. Ern R., Huong D. T. T., Phuong N. T., Madsen P. T., Wang T., Bayley M. Some like it hot: Thermal tolerance and oxygen supply capacity in two eurythermal crustaceans. *Sci. Rep.* 2015. No. 5. Art. 10743.
8. Stillman J. H., Somero G. N. A comparative analysis of the upper thermal tolerance limits of eastern Pacific porcelain crabs, genus *Petrolisthes*: influences of latitude, vertical zonation, acclimation and phylogeny. *Physiological and Biochemical Zoology*. 2000. No. 73. Pp. 200-208.
9. Fry F. E. J. *The effect of environmental factors on the physiology of fish*. Fish Physiology. London, 1971. V. 6.
10. Wang T., Overgaard J. The heartbreak of adapting to global warming. *Science*. 2007. No. 315. Pp. 49-50.
11. Borisov R. R., Kovacheva N. P., Akimova M. Yu., Parshin-Chudin A. V. *Biology and cultivation of Australian red-claw crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868)*. Moscow: VNIRO Publishing House.
12. Austin C. M. Effect of temperature and salinity on the survival and growth of juvenile red-claw (*Cherax quadricarinatus*). *Freshwater Crayfish*. 1995. No. 10. Pp. 419-426.
13. Jones C. M. Effect of temperature on growth and survival of the tropical freshwater crayfish *Cherax quadricarinatus* (Von Martens) (Decapoda, Parastacidae). *Freshwater Crayfish*. 1995. No. 8. Pp. 391-398.
14. King C. R. Growth and survival of red-claw crayfish hatchlings (*Cheraxquadricarinatus* von Martens) in relation to temperature, with comments on the relative suitability of *Cherax quadricarinatus* and *Cherax destructor* for culture in Queensland. *Aquaculture*. 1994. No. 122. Pp. 75-80.
15. Richwell A. An assessment of critical thermal maximum (CTmax) of the invasive Australian crayfish, *Cherax quadricarinatus*, and native macroinvertebrates, *Caridinaniotica* and *Coenagrionidae* in Lake Kariba, Zimbabwe. MS thesis, Bindura University of Science Education. Zimbabwe, 2013.
16. Sallehuddin A. S., Kamarudin A. S., Ismail N. Review on the global distribution of wild population of Australian Red-claw Crayfish, *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868). *Bioscience research*. 2021. V. 18. No. 2. Pp. 194-207.
17. Haubrock P., Oficialdegui F., Yiwen Z., Zeng Z., Patoka J., Yeo D. C. Y., Kouba A. The red-claw crayfish: A prominent aquaculture species with invasive potential in tropical and subtropical biodiversity hotspots. *Reviews in Aquaculture*. 2021. V. 13. Pp. 1488-1530.
18. Rodríguez-Cruz L. D., Torres-Olvera M. J., Durán-Rodríguez O. Y., Juan Pablo R. H. The invasive Australian red-claw crayfish *Cherax quadricarinatus* Von Martens, 1868: the new threat for biodiversity in the Sierra Gorda Biosphere Reserve, Central Mexican Plateau. *Bio-Invasions Records*. 2023. No. 12 (3). Pp. 819-828.
19. Veselý L., Buřič M., Kouba A. Hardy exotics species in temperate zone: Can «warm water» crayfish invaders establish regardless of low temperatures? *Scientific Reports*. 2015. No. 5. Art. 16340. Pp. 1-7.
20. Westhoff J. T., Rosenberger A. E. A global review of freshwater crayfish temperature tolerance, preference, and optimal growth. *Rev Fish Biol Fisheries*. 2016. No. 26 (3). Pp. 329-349.
21. Karplus I., Harpaz S., Hulata G., Segev R., Barki A. Culture of the Australian red-claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in Israel. *The Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgeh*. 2001. No. 53 (1). Pp. 23-33.
22. Lagutkina L. Yu., Ponomarev S. V. The new object of the warm-water aquaculture – Australian red-claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*). *News of the ASTU*. 2008. No. 6 (47).
23. Borisov R. R., Zhigin A. V., Kovacheva N. P., Kryakhova N. V., Nikonova I. N. Biological aspects of cultivation of Australian red-claw crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868) in Russia. *Fish farming*. 2024. No. 3. Pp. 80-92.
24. Badryzlova N., Assylbekova S., Koishybayeva S., Bulavin Y., Makhmetov I., Prospects for growing Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in the industrial conditions of Kazakhstani fish farms. *AACL Bioflux*. 2024. No. 17 (6). Pp. 2535-2548.
25. Mel'nik E. A., Rublevskaya O. N., Pankova G. A., Kholodkevich S. V., Ivanov A. V., Kornienko E. L., Sladkova S. V., Lyubimcev V. A., Kurakin A. S. Bioelectronic system for toxicological safety control of biologically purified wastewater. *Water supply and plumbing*. 2013. No. 1. Pp. 7-12.
26. Reynolds J., Souty-Grosset C. *Management of Freshwater Biodiversity*. Cambridge: University press, 2012. 374 p.
27. Ghanawi J., Saoud I. P. Molting, reproductive biology, and hatchery management of red claw crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens 1868). *Aquaculture*. 2012. V. 358-359. Pp. 183-195.

28. Carreño-León D., Racotta-Dimitrov I., Casillas-Hernández R., Monge-Quevedo A., Ocampo-Victoria L., Naranjo-Páramo J., Villarreal H. Growth, metabolic and physiological response of juvenile *Cherax quadricarinatus* fed different available nutritional substrates. *Aquac. Res. Development*. 2014. V. 5. № 2.
29. Nakayama S. M., Ikenaka Y., Muzandu K., Choongo K., Oroszlany B., Teraoka H., Mizuno N., Ishizuka M. Heavy metal accumulation in lake sediments, fish (*Oreochromis niloticus* and *Serranochromis thumbergi*), and crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in Lake Itzhi-tezhi and Lake Kariba, Zambia. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2010. V. 59. № 2. Pp. 291-300.
30. Kholodkevich S. V., Ivanov, A. V., Kurakin A. S., Kornienko E. L., Fedotov V. P. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations, *J. Environmental Bioindicators*. 2008. No. 3 (1). Pp. 3-34.
31. Udalova G. P., Kholodkevich S. V., Sladkova S. V., Ivanov A. V., Rymsha V. A. Study of circadian activity of crayfish *Pontastacus leptodactylus* during their long-term maintenance in river water flow. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2009. V. 45. No. 3. Pp. 304-312.
32. Sladkova S. V., Safronova D. V., Kholodkevich S. V. Study of the influence of changes in light regimes, temperature and feeding process on the cardioactivity of bioindicator crayfish in bioelectronic systems for surface water quality monitoring. *News of the SPbSU. Ser. 3. Biology*. 2016. I. 1. Pp. 137-149.
33. Sladkova S. V., Kholodkevich S. V., Safronova D. V., Borisov R. R. Cardio activity of crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens 1868) in various physiological states. *Principles of Ecology*. 2017. V. 6. No. 3. Pp. 40-53.
34. Rovero, Hughes, Whiteley, Chelazzi Estimating the energetic cost of fighting in shore crabs by noninvasive monitoring of heartbeat rate. 2000. No. 59. Pp. 705-713.
35. Styrrishave B., Bojsen B. H., Witthoff H., Andersen O. Diurnal variations in physiology and behaviour of the noble crayfish *Astacus astacus* and the signal crayfish *Pacifastacus leniusculus*. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*. 2007. V. 40. № 1. Pp. 63-77.
36. McGaw I. J., Nancollas S. J. Experimental set-up influences the cardiovascular responses of decapod crustaceans to environmental change. *Can. J. Zool.* 2018. No. 96. Pp. 1043-1052.
37. Kryakhova N. V., Borisov R. R., Nikonova I. N. Effect of temperature on feeding and growth of juvenile Australian red-claw crayfish *Cherax quadricarinatus* (Decapoda, Parastacidae). *Fishing issues*. 2024. V. 25. No. 3. Pp. 169-180.
38. Diaz F., Re A. D., Sierra E., Amador G. Behavioral thermoregulation and critical limits applied to the culture of red claw crayfish *Cherax quadricarinatus* (Van Martens). *Freshwater Crayfish*. 2004. No. 14. Pp. 90-98.
39. Pörtner H. O. Oxygen and capacity limitation of thermal tolerance: a matrix for integrating climate related stressors in marine ecosystems. *J. Exp. Biol.* 2010. No. 213. Pp. 881-893.
40. McMahon B. R. Control of cardiovascular function and its evolution in Crustacea. *The journal of experimental biology*. 2001. V. 204. Pp. 923-932.
41. Angilletta M. J., Huey R. D., Frazier M. R. Thermodynamic effect on organismal performance: Is hotter better? *Physiological and biochemical zoology*. 2010. V. 83. No. 2. Pp. 197-206.
42. Kivivuori L. A. Temperature selection behavior of cold- and warm-acclimated crayfish (*Astacus astacus* (L.)). *Thermal Biology*. 1994. V. 19. No. 5. Pp. 291-297.
43. García-Guerrero, M., Hernández-Sandoval P., Orduña-Rojas J., Cortés-Jacinto E. Effect of temperature on weight increase, survival, and thermal preference of juvenile red-claw crayfish *Cherax quadricarinatus*. *Hydrobiology*. 2013. Vol. 23. Pp. 73-81.

Информация об авторах

Сладкова Светлана Владимировна, ведущий специалист, Обсерватория экологической безопасности Санкт-Петербургского государственного университета (Российская Федерация, 199178, г. Санкт-Петербург, 10 линия В.О. 33/35 Институт Наук о Земле), Author ID: 111804, Scopus ID: 6506371701, ORCID 0000-0002-6090-252X, e-mail: sladkova_sv1@mail.ru

Любимцев Василий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН – обособленное структурное подразделение ФГБУН "Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (Российская Федерация, 199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39), AuthorID: 27044, SPIN-код: 4373-1856, ORCID 0000-0001-62478-0407, Scopus: 56612428700, e-mail: lyubimcev55@mail.ru

Холодкевич Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, научный руководитель лаборатории, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН – обособленное структурное подразделение ФГБУН "Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (Российская Федерация, 199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39), AuthorID: 20879, SPIN-код: 9593-9834, ORCID 0000-0002-7561-9743, Scopus: 6603429395, e-mail: kholodkevich@mail.ru

Бахарева Анна Александровна, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) (Российская Федерация, 109004, г. Москва, ул. Земляной вал, 73), AuthorID: 270484, Scopus ID: 57218100380, ORCID 0000-0002-7724-2425, e-mail: bahareva.anya@yandex.ru

Кравченко Юрий Владимирович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры, ФГБОУ ВО Волгоградский государственный аграрный университет (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, проспект Университетский, 26), e-mail: uriy34rus@mail.ru

Authors' Information

Sladkova Svetlana Vladimirovna, Leading Specialist, Environmental Safety Observatory, St. Petersburg State University (Russian Federation, 199178, St. Petersburg, 10th Line, V.O., 33/35), Author ID: 111804, Scopus ID: 6506371701, ORCID 0000-0002-6090-252X, e-mail: sladkova_sv1@mail.ru

Lyubimtsev Vasilii Alekseevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, St. Petersburg Scientific Research Center for Environmental Safety of the Russian Academy of Sciences - the separate structural unit of the St. Petersburg Federal State Budgetary Institution, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (Russian Federation, 199178, St. Petersburg, 14-ya liniya V.O., 39), AuthorID: 27044; SPIN code: 4373-1856; ORCID 0000-0001-62478-0407; Scopus: 56612428700, e-mail: lyubimcev55@mail.ru

Kholodkevich Sergey Viktorovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Academician of the Asian Academy of Sciences (AAS), Scientific director of the laboratory, Chief Researcher, Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS – the structural division of the St. Petersburg Federal Research Center Scientific Research Centre for Ecological Safety, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). (Russian Federation, 199178, St. Petersburg, 14th Line V.O., 39), SPIN-код: 9593-9834; AuthorID: 20879; ORCID 0000-0002-7561-9743; Scopus: 6603429395, e-mail: kholodkevich@mail.ru

Bakhareva Anna Aleksandrovna, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of the Department, Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University) (Russian Federation, 109004, Moscow, Zemlyanoy Val Str., 73), AuthorID: 270484, Scopus ID: 57218100380, ORCID 0000-0002-7724-2425, e-mail: bahareva.anya@yandex.ru

Kravchenko Yuri Vladimirovich, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Volgograd, Universitetsky Ave., 26), e-mail: uriy34rus@mail.ru