

Оригинальная статья / Original article  
УДК 574:57.083.3  
DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-151-167

## Оценка рекреационного потенциала некоторых бухт города Севастополя с использованием методов биоиндикации

Татьяна Б. Сигачева<sup>1</sup>, Ирина И. Чеснокова<sup>1</sup>, Ольга Л. Гостюхина<sup>1</sup>, Сергей В. Холодкевич<sup>2,3</sup>,  
Татьяна В. Кузнецова<sup>2</sup>, Татьяна И. Андреевко<sup>1,4</sup>, Неля П. Ковригина<sup>1</sup>, Татьяна В. Гаврюсева<sup>1</sup>,  
Максим П. Киринов<sup>1</sup>, Антон С. Куракин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

<sup>2</sup>ФГБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН – обособленное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

### Контактное лицо

Татьяна Б. Сигачева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, отдел ихтиологии, ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»; 299011 Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2.  
Тел. +7(8692)544110  
Email [mtk.fam@mail.ru](mailto:mtk.fam@mail.ru)  
ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3125-898X>

### Формат цитирования

Сигачева Т.Б., Чеснокова И.И., Гостюхина О.Л., Холодкевич С.В., Кузнецова Т.В., Андреевко Т.И., Ковригина Н.П., Гаврюсева Т.В., Киринов М.П., Куракин А.С. Оценка рекреационного потенциала некоторых бухт города Севастополя с использованием методов биоиндикации // Юг России: экология, развитие. 2021. Т.16, N 1. С. 151-167. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-151-167

Получена 17 февраля 2020 г.

Прошла рецензирование 26 марта 2020 г.

Принята 21 июля 2020 г.

### Резюме

**Цель.** Изучение комплекса биохимических параметров гепатопанкреаса и жабр черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819), а также функционального показателя адаптивности кардиосистемы у моллюсков из некоторых Севастопольских бухт с разным уровнем рекреационной и антропогенной нагрузки.

**Методы.** Мидий отбирали из четырех севастопольских акваторий (в районе м. Хрустальный, б. Круглая, б. Казачья, б. Матюшенко) осенью 2018 г. Использовали методы биоиндикации, основанные на применении функционального (показатель адаптивности кардиосистемы) и биохимических показателей (активность антиоксидантных (АО) ферментов, аминотрансфераз, щелочной фосфатазы (ЩФ), продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) и окислительной модификации белков (ОМБ)) тканей моллюсков, а также гидрохимические характеристики морской среды.

**Результаты.** Установлено влияние антропогенной нагрузки районов исследования на комплекс биохимических показателей тканей моллюсков. В то же время низкие значения  $T_{восст}$  частоты сердечных сокращений (ЧСС) (менее 60 мин) у мидий из всех районов исследования свидетельствуют об эффективности биохимических изменений в тканях моллюсков, и возможном использовании всех тестируемых бухт для развития рекреационных видов отдыха.

**Заключение.** Результаты исследования позволили характеризовать экологическое состояние акваторий и дать рекомендации по их рациональному использованию. Для пляжно-купального отдыха и рекреационного рыболовства наиболее пригодными являются бухты Матюшенко и Казачья. Последняя акватория также имеет благоприятные условия и для развития водных видов спорта. Экологически менее благополучные б. Круглая и мыс Хрустальный требуют комплекса мер, направленных на улучшение качества поверхностных вод.

### Ключевые слова

Мидия *Mytilus galloprovincialis*, биохимические показатели, показатель адаптивности кардиосистемы, комплексное загрязнение, рекреационный потенциал, бухты Севастополя, Черное море.

# Assessment of recreational potential of Sevastopol bays using bioindication methods

Tatyana B. Sigacheva<sup>1</sup>, Irina I. Chesnokova<sup>1</sup>, Olga L. Gostyukhina<sup>1</sup>, Sergey V. Kholodkevich<sup>2,3</sup>,  
Tatiana V. Kuznetsova<sup>2</sup>, Tatiana I. Andreenko<sup>1,4</sup>, Nelya P. Kovrigina<sup>1</sup>, Tatiana V. Gavruseva<sup>1</sup>,  
Maksim P. Kirin<sup>1</sup> and Anton S. Kurakin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup>Scientific Research Centre for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Saint Petersburg State University, St Petersburg, Russia

<sup>4</sup>Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

## Principal contact

Tatyana B. Sigacheva, PhD, Senior Researcher,  
Department of Ichthyology, A.O. Kovalevsky  
Institute of Biology of the Southern Seas, Royal  
Academy of Sciences; 2 Nakhimov Ave.,  
Sevastopol, Russia 299011.

Tel. +7 (8692)544110

Email [mtk.fam@mail.ru](mailto:mtk.fam@mail.ru)

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3125-898X>

## How to cite this article

Sigacheva T.B., Chesnokova I.I., Gostyukhina O.L.,  
Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Andreenko  
T.I., Kovrigina N.P., Gavruseva T.V., Kirin M.P.,  
Kurakin A.S. Assessment of recreational potential  
of Sevastopol bays using bioindication methods.  
*South of Russia: ecology, development*. 2021, vol.  
16, no. 1, pp. 151-167. (In Russian) DOI:  
10.18470/1992-1098-2021-1-151-167

Received 17 February 2020

Revised 26 March 2020

Accepted 21 July 2020

## Abstract

**Aim.** Study of a group of biochemical parameters of the hepatopancreas and gills of the Black Sea mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. and the functional indicator of cardiac system adaptivity of mussels from Sevastopol bays with different levels of recreational and anthropogenic impact.

**Methods.** Mussels were collected from four Sevastopol water areas (Kruglaya Bay, Kazachya Bay, Matyushenko Bay and Cape Khrustalnii) in autumn 2018. The bioindication methods used were based on application of functional (cardiac system adaptability) and biochemical indicators (antioxidant enzymes activity [AEA], aminotransferases, the alkaline phosphatase [AP], and products of the lipid peroxidation [LPO] and protein oxidation [PO]) of mussel tissues. The hydrochemical parameters of the investigated areas were determined.

**Results.** The anthropogenic impact on a complex of biochemical indicators of mussels at the sampling sites was shown. At the same time, low values of mussel heart rate (HR) recovery time ( $T_{rec}$ ) (less than 60 min.) in all sampling sites demonstrated the efficiency of biochemical changes in mussels and the possible use of all tested bays as recreational areas.

**Conclusion.** Results of the present research allow the characterization of the ecological status of these Sevastopol sea water areas and to make recommendations about their rational use. Matyushenko and Kazachya Bays are most suitable for beach recreation and recreational fishery. Kazachya Bay also has favourable conditions for the development of water sports. Kruglaya Bay and Cape Khrustalnii are less ecologically safe and require a series of actions to improve water quality.

## Key Words

Mussel *Mytilus galloprovincialis*, biochemical parameters, indicator of cardiac system adaptivity, pollution, recreational potential, Sevastopol bays, Black Sea.

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, морские природные комплексы испытывают все возрастающую антропогенную нагрузку, приводящую к серьезным экологическим и социально-экономическим последствиям. Наиболее сильно воздействию подвержена прибрежная зона, концентрирующая максимальное количество людей. По данным ВОЗ почти два миллиарда человек проживает в прибрежных морских и океанических районах [1]. На берегах водоемов Российской Федерации расположено около 60% всех санаториев, свыше 80% учреждений отдыха и 90% рекреационных объектов для пригородного отдыха [2]. Именно хозяйственное освоение территории, связанное с жизнедеятельностью человека (урбанизация, милитаризация, бесконтрольное и варварское использование морских ресурсов и др.), является доминирующим фактором различных трансформаций прибрежной экосистемы. За последние полвека экосистема Черного моря претерпела значительные структурные изменения, связанные с серьезной антропогенной нагрузкой на его акватории [3]. Только ежегодный сброс хозяйственно-бытовых стоков в Черное море достигает 571 млн. м<sup>3</sup>, из которых на регион Севастополя приходится 10,8% [4].

К водным рекреационным ресурсам относят совокупность водных объектов с благоприятными для различных видов рекреационной деятельности характеристиками [5]. Абсолютно непригодными являются только сильнозагрязненные водные объекты, отдых на берегу которых неприятен. Наиболее ценными в рекреационном отношении являются те участки, на которых по имеющимся ресурсам и современному состоянию возможна организация наибольшего количества мест отдыха и разнообразие видов деятельности с благоприятным воздействием на организм человека [6]. В настоящее время среди основных методов оценки рекреационного потенциала прибрежной зоны водных объектов выделяют: количественные (бальная, суммирование рангов и др.) [7] и качественные (биоиндикация, биотестирование) методы [6]. Для оценки рекреационного потенциала прибрежной территории Севастополя разными исследователями в качестве основного критерия были предложены: рельеф и морфометрические показатели берегов [8], оценка единовременной численности и плотности отдыхающих на пляжах [9], социологические исследования рекреационного спроса на водные виды отдыха в Севастопольском регионе [2]. В то же время одним из важнейших факторов при выборе места для пляжного и других видов отдыха выступает чистота прибрежной зоны (пляжа) и, особенно, морской акватории, лежащие в основе районирования прибрежной зоны и определения возможностей развития различной рекреационной деятельности: рыболовства, спортивных, оздоровительных или других форм рекреации на воде. В связи с этим, особую ценность представляют методы биоиндикации, позволяющие оценить качество морской среды по откликам живых организмов в ней обитающих.

Для проведения биоиндикационных исследований выбирают биоиндикаторный вид – характерный представитель исследуемого водного

объекта, и комплекс показателей разного уровня биологической организации. Для оценки качества водной среды рекомендовано исследование комплекса молекулярных показателей – биомаркеров, позволяющих определять негативные изменения в организме гидробионтов на ранних этапах развития, до появления видимых нарушений на организменном и популяционном уровнях организации [10; 11].

Среди наиболее информативных биомаркеров, позволяющих оценивать физиологическое состояние гидробионтов и качество среды их обитания, выделяют: антиоксидантные (АО) ферменты, индукция активности которых является неспецифической формой ответа организма на действие стресс-факторов [12-16], показатели тканевого повреждения при окислительном стрессе (показатели перекисного окисления липидов (ПОЛ) и окислительной модификации белков (ОМБ)) [15; 17] и показатели физиологического состояния (активность аминотрансфераз и щелочной фосфатазы (ЩФ)) [18; 19]. Так, для оценки качества морских прибрежных севастопольских акваторий ранее нами был предложен комплекс биохимических показателей мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lam.) – характерного представителя бентосных сообществ Черноморского региона [16; 20; 21].

В то же время для оценки эффективности адаптивных реакций, происходящих на молекулярном уровне, рекомендовано изучение показателей более высокого порядка, а именно – описывающих функциональное состояние организмов. В связи с этим, для оценки состояния мидии *M. galloprovincialis* был предложен новый методологический подход, основанный на сравнительной оценке особенностей кардиоактивности и движения створок мидии [22-24], как индикативных показателей хронического стресса.

Таким образом, целью работы являлось изучение комплекса биохимических параметров гепатопанкреаса и жабр черноморской мидии *M. galloprovincialis*, а также функционального показателя адаптивности кардиосистемы мидий из некоторых Севастопольских бухт с разным уровнем рекреационной и антропогенной нагрузки.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований служила черноморская мидия *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) – типичный представитель малакофауны Черного моря. Мидий отбирали осенью 2018 г. из четырех севастопольских акваторий (в районе м. Хрустальный, б. Круглая, б. Казачья, б. Матюшенко) с разным уровнем рекреационной нагрузки (рис. 1, табл. 1).

В пробах морской воды из районов исследования определяли солёность, содержание растворенного кислорода, биохимическое потребление кислорода на 5-е сутки (БПК<sub>5</sub>), перманганатную окисляемость в щелочной среде, величину pH, кремний, а также минеральные и органические формы фосфора и азота. Анализы выполняли согласно общепринятым методикам [25; 26]. Образцы воды отбирали в 5-8 м от берега на глубине 0,5–1,0 м от поверхности воды. В связи с тем, что оценить трофность вод из районов исследования по индексу эвтрофикации

(E-TRIX) [27] не представилось возможным, так как для этого, кроме гидрохимических данных нужна информация о концентрации хлорофилла «а», полученные нами величины гидрохимических показателей сравнивали с концентрациями аналогичных показателей из условно чистых прибрежных районов Крыма.

С целью оценки функционального состояния моллюсков и качества среды их обитания из каждой бухты отбирали: 10 одноразмерных особей для определения биохимических показателей и 14-16 – для оценки особенностей кардиоактивности.

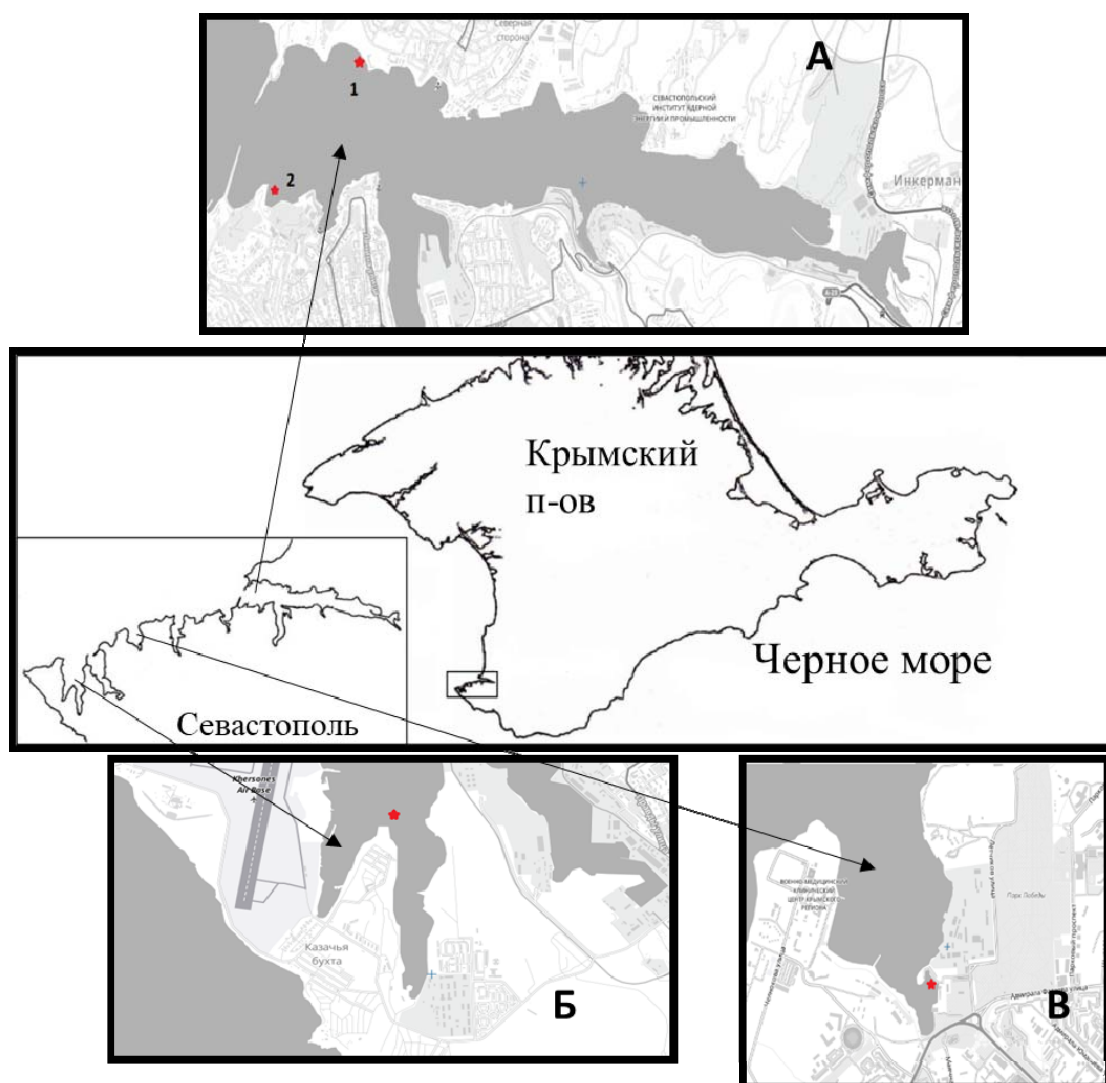
Материалом для биохимических исследований служили печень и жабры мидий. Органы несколько раз промывали холодным 0,85% физраствором, гомогенизировали и центрифугировали (10000 g) 15 минут на холоде. Для дальнейшего анализа использовали супернатанты.

В супернатантах определяли активность супероксиддисмутазы (СОД) (опт. ед./мин/мг белка) по

реакции ингибирования восстановления нитросинего тетразолия в присутствии НАДН и феназинметасульфата [28] и каталазы (КАТ) (мкмоль  $H_2O_2$ /мин/мг белка) – по реакции разложения перекиси водорода [29].

Содержание ТБК-активных продуктов (ТБК-АП) (мкмоль МДА/г сырой ткани) регистрировали по реакции с 2-тиобарбитуровой кислотой [30].

Содержание окисленных форм белков (опт. ед./мг белка) определяли по реакции взаимодействия окисленных аминокислотных остатков белков с 2,4-динитрофенилгидразином. Образовавшиеся в результате реакции производные 2,4-динитрофенилгидразона регистрировали при следующих длинах волн ( $\lambda$ ): альдегидные и кетонные продукты нейтрального характера при 346 и 370 нм соответственно, альдегидные и кетонные продукты основного характера при 430 и 530 нм [31].



**Рисунок 1.** Карта-схема районов исследования: А – бухта Севастопольская (1 – б. Матюшенко, 2 – м. Хрустальный), В – б. Казачья, С – бухта Круглая звездочка (★) – место отбора проб

**Figure 1.** Schematic map of sampling sites: А –Sevastopol Bay (1 – Matyushenko Bay, 2 – Cape Khrustalnii) В – Kazachya Bay, С – Kruglaya Bay. Asterisk indicates sampling site

**Таблица 1.** Краткая характеристика районов исследования**Table 1.** Brief description of sampling sites

Район исследования (координаты) Sampling sites (coordinates)	Дата отбора проб Sampling date	Результаты визуального осмотра Results of visual inspection	Характеристика инфраструктурного обеспечения/уровня рекреационной нагрузки Infrastructure characteristics/level of recreational load
<b>м. Хрустальный</b> (44.617626, 33.511528) Cape Khrestalnii (44.617626, 33.511528)	<b>26.09.2018</b>	<b>Поверхность металлических опор. Вода прозрачная, видимость 1,5-2 метра. Дно чистое, каменистое с небольшими зонами заиливания. Отмечено загрязнение различными пластиковыми отходами, кусками веревок</b> Surface of metal pillar. Water is clear, visibility 1.5-2 m. Bottom is clean, rocky with small silted areas. Pollution from various plastic wastes and pieces of rope was noted.	<b>Пляж находится в центре города, береговая линия оборудована шезлонгами, навесами, спасательным пунктом, с большим количеством кафе и ресторанов. В непосредственной близости расположены стоянка яхт и катеров, место курсирования рейсовых катеров, парома, прогулочных маломерных судов</b> Beach is located in centre of city, coastline is equipped with sun lounges, awnings, a rescue point and many cafes and restaurants. In the immediate vicinity are moorings for yachts and boats, a place for use of regular boats, ferries and pleasure boats.
<b>б. Круглая</b> (44.597430, 33.448286) Kruglaya Bay (44.597430, 33.448286)	<b>20.09.2018</b>	<b>Поверхность бетонной опоры причала. Вода мутная, видимость не более 30 см. Мидии покрыты слоем ила. Явного загрязнения нефтью нет, но присутствует запах нефтепродуктов</b> Surface of concrete pier pillar. Water is cloudy, visibility no more than 30 cm. Mussels are covered with a layer of silt. There is no obvious oil pollution but there is a smell of petroleum products.	<b>Береговая линия оборудована под пляж (шезлонги, навесы, спасательный пункт), с большим количеством кафе и ресторанов. В непосредственной близости расположен яхт клуб</b> Coastline has a beach with sun lounges, awnings and rescue point and many cafes and restaurants. In the immediate vicinity is a yacht club.
<b>б. Казачья</b> (44.579081, 33.409535/) Kazachya Bay (44.579081, 33.409535)	<b>25.09.2018</b>	<b>Поверхность цепи, фиксирующей бакен. Прозрачность воды около 1 м. Дно песчаное с отдельными островками зарослей водорослей. Отсутствуют визуальные признаки нефтяного загрязнения, мертвые организмы, пластик</b> Surface of chain fixing a buoy. Water transparency about 1 m. The bottom is sandy with scattered algae thickets. There are no visual signs of oil pollution, dead organisms or plastic.	<b>Береговая линия не оборудована под пляж. В кутовой части правого рога бухты находятся стоянки катеров, к водоему примыкает жилой массив многоквартирных домов, воинская часть и военный полигон. На южном берегу бухты также находится воинская часть. На центральном мысу расположен коттеджный посёлок. Левая кутовая часть бухты не оборудована</b> Coastline is not equipped as a beach. Along the right horn of the bay there are boat mooring areas, a housing estate with apartment buildings, a military unit facility and a military training ground. There is also a military unit on the south coast of the bay. At the central of the bay is a cottage village. The left horn of the bay is not equipped for recreation.
<b>б. Матюшенко</b> (44.629388, 33.522752) Matyushenko Bay (44.629388, 33.522752)	<b>02.10.2018</b>	<b>Поверхность бетонного укрепления. Вода прозрачная, видимость около 3 метров. Дно чистое галечное не заилено</b> Surface of concrete pillar. Water is clear, visibility about 3 m. Bottom is clean pebble and not silted.	<b>Береговая линия не оборудована под пляж (отсутствуют шезлонги, навесы, спасательный пункт), места общественного питания удалены. К пляжу примыкает военно-исторический музей «Михайловская батарея». В непосредственной близости расположено место курсирования рейсовых катеров</b> Coastline not equipped as a beach (there are no sun lounges, awnings or rescue point) and catering places are far away. The Mikhailovsky Battery military-historical museum adjoins the beach. In the immediate vicinity there is area for use of regular boats.

Активность аспаратаминотрансферазы (АСТ) (мкмоль/(мг белкахчас)), аланинаминотрансферазы (АЛТ) (мкмоль/(мг белкахчас)) и щелочной фосфатазы (ЩФ) (нмоль/(мг белкахчас)) в супернатантах определяли с использованием стандартных наборов реактивов «ОЛЬВЕКС ДИАГНОСТИКУМ» (Россия).

Все определения проводили на спектрофотометре СФ-2000 (ОКБ Спектр, г. Санкт-Петербург, Россия). Биохимические показатели пересчитывали на мг белка сырой массы ткани, концентрацию которого определяли с использованием стандартного набора реагентов «ОЛЬВЕКС ДИАГНОСТИКУМ» (Россия).

Оценку функционального состояния мидий проводили на основании анализа характеристик их кардиоритма в процессе тестирования по разработанному методу функциональной нагрузки [22]. В соответствии с методикой [23; 24], в качестве функциональной нагрузки использовалось кратковременное (на 1 час) снижение на 50% солености морской воды. После восстановления исходной солености воды измерялся показатель адаптивности кардиосистемы моллюсков к нагрузке – время восстановления  $T_{\text{восст}}$  (в мин.) частоты сердечных сокращений (ЧСС) после снятия нагрузки, определяемого отдельно для каждого моллюска.

Результаты обрабатывали статистически, вычисляли среднее арифметическое и стандартную ошибку средней. Нормальность распределения

выборки проверяли с применением W-критерия Шапиро-Уилка. Достоверность различий между значениями биохимических показателей тканей моллюсков из разных бухт г. Севастополя проводили с применением U-критерия Манна-Уитни; между средними  $T_{\text{восст}}$  ЧСС у мидий – по t-критерию Стьюдента. Различия считали достоверными при  $p \leq 0,05$ . Статистический анализ проводили с помощью компьютерных программ Past 3.15 и Microsoft Office Excel 2016.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Гидрохимические исследования.* Величины гидрохимических показателей морской воды из четырех севастопольских акваторий представлены в таблице 2.

Содержание растворенного кислорода в исследуемых акваториях колебалось в пределах 4,07–6,96 мл/л. Минимальное содержание отмечено в бухте Круглая 20 сентября. Оно было ниже предельно допустимой концентрации (ПДК) для рыбохозяйственных водоемов (4,2 мл/л) на 0,13 мл/л [32]. Минимальному содержанию кислорода в бухте Круглая соответствовал также минимум солености (14,82‰) и максимум окисляемости (4,58 мг О/л), который превышал ПДК (4,0 мг О/л) на 0,58. В других бухтах содержание кислорода и окисляемость имели однородные значения и были ниже ПДК.

**Таблица 2.** Величины гидрохимических показателей морской воды из разных бухт города Севастополя

**Table 2.** Hydrochemical parameters of sea waters of Sevastopol bays

Показатели Parameter	м. Хрустальный Cape Khrestalnii	б. Круглая Kruglaya Bay	б. Казачья Kazachya Bay	б. Матюшенко Matyushenko Bay
S, ‰	17,74	14,82	17,87	17,70
O <sub>2</sub> , мл/л O <sub>2</sub> , ml/l	5,37	4,07	6,96	5,20
БПК <sub>5</sub> , мг/л BOD <sub>5</sub> , mg/l	1,09	1,43	1,17	1,07
pH in situ	7,51	8,17	8,33	8,35
Окисл., мгО/л Oxidab. mgO/l	3,57	4,58	3,64	3,65
NO <sub>2</sub> , мкг/л NO <sub>2</sub> , µg/l	1,9	9,7	0,9	2,3
NO <sub>3</sub> , мкг/л NO <sub>3</sub> , µg/l	32,4	629,7	14,7	38,6
NH <sub>4</sub> , мкг/л NH <sub>4</sub> , µg/l	66,4	170,7	79,2	76,1
N орг, мкг/л N org, µg/l	596,7	1055,4	703,3	879,6
PO <sub>4</sub> , мкг/л PO <sub>4</sub> , µg/l	3,9	21,6	1,9	7,1
P орг, мкг/л P org, µg/l	17,0	33,3	21,5	19,9
Si, мкг/л Si, µg/l	145,0	1328,7	107,8	100,3

Величины БПК<sub>5</sub> во всех пробах также имели однородные низкие значения, которые были ниже: от 1,5 до 1,9 раза ПДК = 2,0 мг/л для рыбохозяйственных водоемов. В бухте Круглая величина БПК<sub>5</sub> была

максимальной по сравнению с другими исследуемыми акваториями (1,43 мг/л).

Концентрации минеральных форм азота во всех четырех акваториях изменялись в широких диапазонах: нитриты – от 0,9 до 9,7 мкг/л, нитраты – от 15 до 630 и

азот аммонийный – от 66 до 170 мкг/л. Величины минерального фосфора колебались от 1,9 до 21,6 мкг/л, концентрации кремния изменялись в пределах от 108 до 1329 мкг/л. Несмотря на высокие концентрации полученных нами биогенных веществ их значения были ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов (по нитритам – 0,02 мг/л, нитратам – 9,1 мг/л, азоту аммонийному – 0,39 мг/л, минеральному фосфору – 3,5 мг/л). Для кремния ПДК не существует. Возросшая рекреационная нагрузка на мелководную часть

исследуемых бухт может свидетельствовать об увеличении содержания биогенных веществ, а также предпосылок создания экологически опасного гидрохимического фона (риски развития гипоксии и др.).

**Биохимические исследования.** Содержание ТБК-активных продуктов и активность антиоксидантных (АО) ферментов в гепатопанкреасе мидий из разных севастопольских акваторий представлены в таблице 3.

**Таблица 3.** Показатели прооксидантно-антиоксидантной системы гепатопанкреаса мидий *M. galloprovincialis* из разных бухт города Севастополя

**Table 3.** Indicators of pro-oxidant-antioxidant system in the hepatopancreas of mussels *M. galloprovincialis* from different Sevastopol bays

Район исследования Sampling sites	ТБК-АП, мк/моль МДА/г ткани TBARS, $\mu\text{mol}$ MDA/g of tissue	Активность СОД, опт. ед./мин/мг белка SOD activity, opt. units/ min/mg of protein	Активность КАТ, мкмоль $\text{H}_2\text{O}_2$ /мин/мг белка Catalase activity, $\mu\text{mol}$ $\text{H}_2\text{O}_2$ /min/mg protein
<b>м. Хрустальный</b> Cape Khrustalnii	77,96 $\pm$ 14,44	25,61 $\pm$ 5,03	7,89 $\pm$ 1,47
<b>б. Круглая</b> Kruglaya Bay	92,25 $\pm$ 11,46	37,8 $\pm$ 6,2*	34,8 $\pm$ 5,2*
<b>б. Казачья</b> Kazachya Bay	44,92 $\pm$ 3,48**	28,62 $\pm$ 5,52	8,78 $\pm$ 1,17*
<b>б. Матюшенко</b> Matyushenko Bay	24,62 $\pm$ 2,87**	10,95 $\pm$ 1,91**	9,15 $\pm$ 1,87*

Примечания: \* – различия достоверны между значением показателей в гепатопанкреасе мидий из района мыса Хрустальный и других бухт; \* – из б. Круглая и других районов, \* – из бухт Казачья и Матюшенко

Notes: \* – differences are significant between the values in the hepatopancreas of mussels from the area of Cape Khrustalnii and other bays; \* – from Kruglaya Bay and other areas, \* – from Kazachya and Matyushenko Bays

Наиболее высокое содержание ТБК-активных продуктов было установлено в гепатопанкреасе мидий из бухты Круглая, которое в 2,0 и 3,7 раза превышало ( $p \leq 0,05$ – $0,01$ ) таковое у мидий из бухт Казачья и Матюшенко соответственно (табл. 3). Сравнительный анализ содержания ТБК-активных продуктов в гепатопанкреасе у особей из района мыса Хрустальный и бухты Круглая не показал достоверных отличий. Однако величина данного показателя у мидий из района мыса Хрустальный была в 1,7 и 3,2 раза выше ( $p \leq 0,05$ – $0,01$ ), чем у моллюсков из бухт Казачья и Матюшенко соответственно, а у мидий из бухты Казачья – в 1,8 раза больше, чем у моллюсков из бухты Матюшенко ( $p \leq 0,01$ ) (табл. 3).

Так же, как и содержание продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), активность СОД имела максимальное значение в гепатопанкреасе мидий из бухты Круглая и превышала активность этого фермента у мидий из района мыса Хрустальный и бухты Матюшенко в 1,5 и 3,5 раза ( $p \leq 0,05$ – $0,01$ ). У мидий из бухты Матюшенко активность СОД была наименьшей. Активность этого фермента в гепатопанкреасе мидий из района мыса Хрустальный была в 2,3 раза выше ( $p \leq 0,01$ ) по сравнению с аналогичным показателем у мидий из бухты Матюшенко.

Наибольшая активность КАТ установлена у мидий из бухты Круглая, тогда как у мидий из

остальных акваторий активность этого фермента была близкой и существенно ниже, чем у моллюсков из бухты Круглая – в 3,8–4,4 раза ( $p \leq 0,01$ ) (табл. 3).

Данные по содержанию окисленных форм белков в гепатопанкреасе мидий из разных севастопольских акваторий представлены в таблице 4.

Уровень продуктов нейтрального характера и альдегидопроизводных основного характера был достоверно выше ( $p \leq 0,05$ – $0,001$ ) в гепатопанкреасе мидий, отобранных в районе мыса Хрустальный, по сравнению с другими акваториями (табл. 4), а содержание кетопроизводных основного характера ( $\lambda$  530) и по сравнению с моллюсками из бухты Круглая ( $p \leq 0,05$ ).

Минимальное содержание окисленных форм белков установлено в гепатопанкреасе мидий из бухты Матюшенко. Содержание продуктов нейтрального характера и альдегидопроизводных основного характера в гепатопанкреасе моллюсков из этой акватории было достоверно ниже по сравнению с соответствующими значениями у мидий, отобранных в районе мыса Хрустальный ( $\lambda$  356,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda$  370,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda$  430,  $p \leq 0,001$ ) и бухты Казачья ( $\lambda$  356,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda$  370,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda$  430,  $p \leq 0,001$ ), а в случае с альдегидопроизводными основного характера ( $\lambda$  430) и по сравнению с мидиями из бухты Круглая ( $p \leq 0,05$ ) (табл. 4).

**Таблица 4.** Содержание окисленных форм белков в гепатопанкреасе мидий *M. galloprovincialis* из разных бухт города Севастополя**Table 4.** Content of oxidized forms of proteins in the hepatopancreas of mussels *M. galloprovincialis* from different Sevastopol bays

Район исследования Sampling sites	Продукты нейтрального характера, опт. ед./мг белка Neutral products, opt. units/mg protein		Продукты основного характера, опт. ед./мг белка Base products, opt. units/mg protein	
	альдегидные 346	кетонные 370 нм	альдегидные 430	кетонные 530 нм
	нм	нм	нм	нм
	aldehydic 346 nm	ketonic 370 nm	aldehydic 430 nm	ketonic 530 nm
<b>м. Хрустальный</b> Cape Khrustalnii	0,13±0,01	0,13±0,02	0,08±0,01	0,05±0,01
<b>б. Круглая</b> Kruglaya Bay	0,05±0,009*	0,05±0,01*	0,03±0,007*	0,01±0,006*
<b>б. Казачья</b> Kazachya Bay	0,06±0,008*	0,06±0,008*	0,04±0,007*	0,02±0,004
<b>б. Матюшенко</b> Matyushenko Bay	0,03±0,003*■	0,03±0,003*■	0,02±0,003*■■	0,009±0,004

Примечания: \* – различия достоверны между содержанием окисленных форм белков в гепатопанкреасе мидий из района мыса Хрустальный и других бухт; \* – из б. Круглая и других районов; ■ – из бухт Казачья и Матюшенко

Notes: \* – significant differences between the content of the oxidized forms of proteins in the hepatopancreas of mussels from Cape Khrustalnii and other bays; \* – from Kruglaya Bay and other areas; ■ – from Kazachya and Matyushenko Bays

Как и в гепатопанкреасе, в жабрах мидий уровень ТБК-активных продуктов снижался в том же ряду бухт: б. Круглая → м. Хрустальный → б. Казачья → б. Матюшенко. Содержание ТБК-активных продуктов в жабрах мидий из б. Круглая было в 1,7 ( $p \leq 0,05$ ) и 3,8 раза ( $p \leq 0,01$ ) выше по сравнению с таковым в жабрах мидий из бухт Казачья и Матюшенко (табл. 5). В жабрах

мидий из района мыса Хрустальный данный показатель был выше, чем у мидий из бухты Казачья – в 1,4 раза ( $p \leq 0,05$ ), у мидий из бухты Матюшенко – в 3,2 раза ( $p \leq 0,01$ ). У моллюсков из бухты Казачья содержание ТБК-активных продуктов превышало таковое у животных из бухты Матюшенко в 2,3 раза ( $p \leq 0,01$ ).

**Таблица 5.** Показатели прооксидантно-антиоксидантной системы жабр мидий *M. galloprovincialis* из разных бухт города Севастополя**Table 5.** Indicators of pro-oxidant-antioxidant system of gills in *M. galloprovincialis* from different Sevastopol bays

Район исследования Sampling sites	ТБК-АП, мкмоль МДА/г ткани	Активность СОД, опт. ед./мин/мг белка	Активность КАТ, мкмоль H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /мин/мг белка
	TBARS, $\mu$ mol MDA/g of tissue	SOD activity, opt. units /min/mg of protein	Catalase activity, $\mu$ mol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /min/mg protein
<b>м. Хрустальный</b> Cape Khrustalnii	93,67±9,27	24,87±6,27	19,29±3,18
<b>б. Круглая</b> Kruglaya Bay	111,83±8,81	49,4±8,6*	25,1±1,38
<b>б. Казачья</b> Kazachya Bay	66,69±4,73*■	39,07±11,45	16,13±3,18*
<b>б. Матюшенко</b> Matyushenko Bay	29,33±5,83*■■	14,42±2,09*	13,72±4,55*

Примечания: \* – различия достоверны между значением показателей в гепатопанкреасе мидий из района мыса Хрустальный и других бухт; \* – из б. Круглая и других районов, ■ – из бухт Казачья и Матюшенко

Notes: \* – differences are significant between the values in the hepatopancreas of mussels from the area of Cape Khrustalnii and other bays; \* – from Kruglaya and other areas, ■ – from Kazachya and Matyushenko Bays

Максимальная активность СОД и КАТ была установлена в жабрах моллюсков из бухты Круглая, а минимальная – у моллюсков из бухты Матюшенко (табл. 5). Активность СОД в жабрах мидий из бухты Круглая достоверно превышала таковую у мидий из района пляжа Хрустальный и бухты Матюшенко – в 2,0 ( $p \leq 0,05$ ) и 3,5 раза ( $p \leq 0,01$ ) соответственно. Активность КАТ в жабрах мидий из бухты Круглая была в 1,6 и 1,8 раза ( $p \leq 0,05$ ) выше по сравнению с активностью этого фермента в жабрах мидий из бухт Казачья и Матюшенко (табл. 5).

Содержание окисленных форм белков в жабрах мидий из разных севастопольских акваторий представлено в таблице 6.

Уровень ОМБ в жабрах мидий, отобранных в районе пляжа Хрустальный, при всех длинах волн был достоверно выше ( $p \leq 0,05-0,001$ ) по сравнению с таковым у мидий из других районов исследования и снижался в ряду: мыс Хрустальный → б. Круглая → б. Казачья → б. Матюшенко (табл. 6). Сравнительный анализ уровня ОМБ в жабрах мидий из бухты Круглая по сравнению с соответствующими показателями

моллюсков из бухты Казачья не показали достоверных отличий (табл. 6). Содержание продуктов нейтрального и основного характера в жабрах мидий из бухты Матюшенко было достоверно ниже по сравнению с таковым у моллюсков из бухты Казачья ( $\lambda 356$ ,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda 370$ ,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda 430$ ,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda 530$ ,  $p \leq 0,05$ ) и мыса

Хрустальный ( $\lambda 356$ ,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda 370$ ,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda 430$ ,  $p \leq 0,001$ ;  $\lambda 530$ ,  $p \leq 0,05$ ) (табл. 6).

Активность аминотрансфераз и щелочной фосфатазы в тканях мидий из разных севавтопольских акваторий представлены в таблице 7.

**Таблица 6.** Содержание окисленных форм белков в жабрах мидий *M. galloprovincialis* из разных бухт города Севастополя

**Table 6.** Content of oxidized forms of proteins in gills of *M. galloprovincialis* from different Sevastopol bays

Район исследования Sampling sites	Продукты нейтрального характера, опт. ед./мг белка Neutral products, opt. units/mg protein		Продукты основного характера, опт. ед./мг белка Base products, opt. units/mg protein	
	альдегидные 346	кетонные	альдегидные 430	кетонные
	нм	370 нм	нм	530 нм
	aldehydic 346 nm	ketonic 370 nm	aldehydic 430 nm	ketonic 530 nm
м. Хрустальный Cape Khrustalnii	0,32±0,04	0,34±0,04	0,2±0,04	0,14±0,04
б. Круглая Kruglaya Bay	0,11±0,04*	0,11±0,004*	0,09±0,04*	0,03±0,007*
б. Казачья Kazachya Bay	0,09±0,01*	0,09±0,01*	0,07±0,01*	0,05±0,007*
б. Матюшенко Matyushenko Bay	0,05±0,007* <sup>■</sup>	0,05±0,007* <sup>■</sup>	0,04±0,003* <sup>■</sup>	0,02±0,002* <sup>■</sup>

Примечания: \* – различия достоверны между содержанием окисленных форм белков в жабрах мидий из района мыса Хрустальный и других бухт; <sup>■</sup> – из бухт Казачья и Матюшенко

Notes: \* – significant differences between the content of the oxidized forms of proteins in the hepatopancreas of mussels from Cape Khrustalnii and other bays, <sup>■</sup> – from Kazachya and Matyushenko Bays

**Таблица 7.** Активность аминотрансфераз и щелочной фосфатазы в тканях мидий *M. galloprovincialis* из разных бухт города Севастополя

**Table 7.** Aminotransferases and alkaline phosphatase activities in the tissues of mussels *M. galloprovincialis* from different Sevastopol bays

Район исследования Sampling sites	АЛТ геп, мкмоль/ час×мг белка ALT hep, μmol/ hour×mg protein	АСТ геп, мкмоль/ час×мг белка AST hep, μmol/ hour×mg protein	АЛТ ж, мкмоль/ час×мг белка ALT G, μmol/ hour×mg protein	АСТ ж, мкмоль/ час×мг белка AST hep, μmol/ hour×mg protein	ЩФ геп, нмоль/ сек×мг белка AP hep, nmol/ sec×mg protein
м. Хрустальный Cape Khrustalnii	0,64±0,15	0,52±0,06	0,13±0,02	0,18±0,01	145±24,2
б. Круглая/ Kruglaya Bay	0,41±0,06	0,19±0,02*	0,64±0,03*	0,26±0,02	22,6±6,66*
б. Казачья/ Kazachya Bay	0,22±0,02* <sup>•</sup>	0,20±0,02*	0,12±0,02 <sup>•</sup>	0,34±0,03	64±9,3* <sup>•</sup>
б. Матюшенко/ Matyushenko Bay	0,10±0,02* <sup>•</sup>	0,17±0,01*	0,05±0,006* <sup>■</sup>	0,18±0,02	80±17,3* <sup>•</sup>

Примечания: \* – различия достоверны между значением показателей в тканях мидий из района мыса Хрустальный и других бухт; <sup>•</sup> – из б. Круглая и других районов, <sup>■</sup> – из бухт Казачья и Матюшенко; ж – жабры, геп – гепатопанкреас

Notes: \* – significant differences between value of indicators in mussels from the area of the Cape Khrustalnii and other bays; <sup>•</sup> – from Kruglaya Bay and other areas, <sup>■</sup> – from Kazachya and Matyushenko Bays; G – gills, hep – hepatopancreas

Минимальные значения активности АЛТ и АСТ как в гепатопанкреасе, так и в жабрах были установлены у особей из б. Матюшенко, в то время как у мидий из районов мыса Хрустальный и бухты Круглая анализируемые показатели были существенно выше. Минимальные значения активности ЩФ в гепатопанкреасе были выявлены у особей из бухты

Круглая, максимальные – у особей из района мыс Хрустальный.

Исследование функциональных показателей. Результаты тестирования адаптивности кардиосистемы мидий из районов исследования с помощью гипосолённой функциональной нагрузки представлены в таблице 8.

**Таблица 8.** Результаты тестирования функционального состояния мидий *M. galloprovincialis* из разных бухт города Севастополя с помощью гипо-соленостной функциональной нагрузки

**Table 8.** Results of testing of functional state of mussels *M. galloprovincialis* from different Sevastopol bays by means of hypo-salinity functional loading

Район исследования Sampling sites	$T_{\text{восст}}$ , мин $T_{\text{rec}}$ , min
м. Хрустальный / Cape Khrustalnii	41±5,9
б. Казачья / Kazachya Bay	26±4,5
б. Матюшенко / Matyushenko Bay	51±7,4*

Примечания: \* – различия достоверны между значением  $T_{\text{восст}}$  ЧСС мидий из бухты Казачья и Матюшенко

Notes: \* – significant differences between  $T_{\text{rec}}$  value in mussels from Kazachya and Matyushenko Bays

Результаты сравнительного анализа показателя адаптивности кардиосистемы позволили установить, что значение  $T_{\text{восст}}$  ЧСС у мидий из бухты Казачья было достоверно ниже ( $p \leq 0,05$ ) по сравнению с таковым у моллюсков из бухты Матюшенко. В то же время значения  $T_{\text{восст}}$  ЧСС у мидий из всех районов исследования было менее 60 минут.

Результаты сравнительного анализа величин гидрохимических показателей в пробах морской воды из четырех севастопольских акваторий, позволили установить, что более чистыми являются бухты Казачья и Матюшенко. Несколько хуже экологическое состояние в районе мыса Хрустальный и самая загрязненная акватория – бухта Круглая. Величины биогенных веществ в бухте Круглой от 2 до 10 раз выше, чем в условно чистых прибрежных районах Крыма [33; 34]. По данным гидрологических и гидрохимических наблюдений и последующих расчетов интегральных показателей E-TRIX в севастопольских бухтах установлено, что значения индекса эвтрофикации обычно не превышали 4,0. В бухте Круглая максимальное значение составляло 3,73, а в условно чистом районе (2,0 мили от берега) – 2,11. Вопреки распространенному мнению, что прибрежные воды Севастопольского региона являются эвтрофированными, величины E-TRIX позволяют классифицировать класс воды бухты Круглая как переходный от олиготрофного к мезотрофному [35].

Анализ показателей прооксидантно-антиоксидантной системы в тканях мидий из севастопольских акваторий с разным уровнем антропогенной/ рекреационной нагрузки позволил выявить ряд особенностей. Содержание ТБК-активных продуктов в тканях моллюсков из района мыса Хрустальный и бухты Круглая достоверно не отличалось, и было выше по сравнению с таковым в тканях мидий из других районов исследования. При этом активность СОД и КАТ в гепатопанкреасе и СОД в жабрах моллюсков из района мыса Хрустальный была достоверно ниже, а содержание окисленных форм белков в жабрах и гепатопанкреасе – достоверно выше по сравнению с аналогичными показателями мидий из бухты Круглая. Оценить характер ответной реакции организма на комплекс неблагоприятных факторов среды позволяет анализ соотношения интенсивности ПОЛ и ОМБ с реакциями антиоксидантной (АО) системы. Увеличение активности АО ферментов при воздействии неблагоприятных факторов среды является

неспецифической адаптивной реакцией организма, направленной на обезвреживание активных форм кислорода (АФК) [15; 36-38]. Снижение или сравнительно низкая активность АО ферментов, на фоне высокого содержания продуктов ПОЛ и ОМБ, напротив, свидетельствует о сдвиге прооксидантно-антиоксидантных реакций в сторону процессов свободно-радикального окисления (СРО) биомолекул [38-40]. В связи с этим, увеличение активности АО ферментов (КАТ, СОД) и повышение уровня ОМБ и ПОЛ в тканях мидий из б. Круглая, свидетельствуют о компенсаторном характере адаптации (стадия компенсации). В то же время ингибирование активности СОД и КАТ в гепатопанкреасе и СОД в жабрах мидий на фоне высокого содержания ТБК-активных продуктов и достоверного увеличения уровня ОМБ – прямого показателя тканевого повреждения при окислительном стрессе [41], может указывать на развитие патологического состояния у мидий, отловленных в районе мыса Хрустальный. Таким образом, анализ полученных результатов свидетельствует о высоком уровне генерации АФК и степени окислительных повреждений в тканях мидий из бухты Круглая и мыса Хрустальный, что характеризует их экологическое состояние как менее благоприятное. Так, согласно результатам гидрохимического анализа проб воды из районов исследования, концентрации минеральных и органических форм азота и фосфора, а также величины окисляемости имели максимальные значения в воде бухты Круглая (табл. 2). В то же время содержание нефтяных углеводородов (НУ) и хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) в донных осадках в районе мыса Хрустальный было выше по сравнению с таковыми в грунтах бухты Круглая [42]. Оба района характеризуются высокой рекреационной нагрузкой. Их береговая линия оборудована под пляж, с большим количеством прилегающих к воде кафе и ресторанов. Значительный вклад в рекреационную нагрузку в районе мыса Хрустальный оказывает соседство с бухтами Александровская и Артиллерийская, где расположена стоянка яхт и катеров, а также место курсирования рейсовых катеров и парома (табл. 1).

В гепатопанкреасе и жабрах моллюсков из бухты Казачья установлено более низкое содержание продуктов ОМБ по сравнению с таковым у мидий из района мыса Хрустальный, а ТБК-активных продуктов – и по сравнению с моллюсками из бухты Круглая. В то же

время активность СОД в жабрах и гепатопанкреасе моллюсков из бухты Казачья достоверно не отличалась по сравнению с таковой у мидий из бухты Круглая и мыса Хрустальный, что на фоне более низких значений показателей окислительного стресса в тканях мидий из бухты Казачья, можно расценивать как адаптивную реакцию, направленную на снижение интенсивности СРО. Напротив, более низкие содержания ТБК-активных продуктов, окисленных форм белков и активность АО ферментов в тканях мидий из бухты Матюшенко, свидетельствуют о более низком уровне комплексного загрязнения этой акватории по сравнению с другими районами исследования. В более ранних наших исследованиях [43], посвященных сравнительному анализу адаптационного потенциала двух биоиндикаторных видов двухстворчатых моллюсков (мидия и анадара *Anadara kagoshimensis*) Севастопольского побережья, мидия отличалась большей чувствительностью к характеристикам среды обитания (б. Казачья) по сравнению с анадарой. Это выражалось в более низкой активности СОД и каталазы в жабрах, чем у анадары. При этом все исследованные ткани мидии (гепатопанкреас, жабры, нога) характеризовались существенно более высоким содержанием ТБК-активных продуктов, чем у анадары [43]. Таким образом, результаты настоящего исследования, вместе с полученными нами ранее данными [43], свидетельствуют о высокой чувствительности мидий к характеристикам среды обитания, а также влиянии антропогенной/рекреационной нагрузки районов исследования на показатели прооксидантно-антиоксидантной системы тканей мидий и преобладании процессов СРО в тканях моллюсков из более загрязненных акваторий.

В то же время для оценки экологического состояния прибрежных морских акваторий, наряду с показателями прооксидантно-антиоксидантной системы, рекомендовано исследование биомаркеров, характеризующих состояние основных метаболических путей в организме: активность аминотрансфераз – метаболизма аминокислот и белков; активность щелочной фосфатазы – фосфорно-кальциевого обмена. Увеличение активности аминотрансфераз в тканях мидий из бухты Круглая является, по-видимому, последствием стрессового состояния, при котором происходит торможение синтеза белков, усиливается образование ферментов катаболизма аминокислот и глюконеогенеза. Аминотрансферазы выступают в качестве 1-го звена непрямого катаболизма аминокислот через превращение их в глутамат, с другой стороны, они выступают в качестве поставщиков субстрата для реакций глюконеогенеза [44]. У особей из района мыса Хрустальный также выявлены высокие значения данных параметров в гепатопанкреасе, однако в жабрах они снижены, и находятся на уровне показателей животных из бухт Матюшенко и Казачья. Сходные результаты получены для зеленой мидии *Perna viridis*: при длительной экспозиции тяжелыми металлами (кадмий и цинк) активность АСТ и АЛТ в гепатопанкреасе возрастала, в то время как в жабрах – снижалась [45]. Для пресноводных моллюсков родов *Planorbis*, *Physa*, *Biomphalaria* из акваторий с высоким

уровнем загрязнения было также отмечено увеличение активности аминотрансфераз и содержания глюкозы в их тканях. Выявленные особенности авторы объясняли интенсификацией глюконеогенеза, необходимого для энергетического обеспечения тканей моллюсков при антропогенном воздействии [18].

Низкие значения активности ЩФ в гепатопанкреасе мидий из бухты Круглая по сравнению с показателями животных из других акваторий свидетельствуют о том, что ростовые процессы замедлены. Это подтверждается визуальным наблюдением: при отборе моллюсков было отмечено только наличие крупных взрослых особей и отсутствие молодых. Другой причиной снижения активности ЩФ как при остром, так и при хроническом воздействии различного рода поллютантов является разобщение окислительного фосфорилирования. Это происходит вследствие блокировки ферментов, вовлеченных в окислительный метаболизм, изменения проницаемости мембран митохондрий для протонов и возникновения градиента концентрации. Отклонения в функционировании митохондрий приводят к их морфологическим изменениям, нарушению энергетического обеспечения клетки, что в свою очередь отражается на активности ЩФ [46]. Показано, что сточные воды и повышенные концентрации тяжелых металлов (ТМ) в воде вызывают ингибирование активности ЩФ у моллюсков *Galba truncatula* (взяты все ткани животного) [47]. Другими авторами установлено, что ТМ не оказывали существенного влияния на активность ЩФ в жабрах *Perna canaliculus*, в то время как в гепатопанкреасе – вызвали как повышение, так и понижение этого показателя в зависимости от соотношения ТМ в различных акваториях [19].

Оценка адаптивности кардиосистемы мидий методом гипо-соленостной функциональной нагрузки показала наличие достоверных различий между значениями  $T_{\text{восст}}$  ЧСС для мидий из бухт Казачья и Матюшенко. Однако для всех трех бухт этот показатель был менее 60 минут (табл. 8), что, с учетом ранее полученных значений  $T_{\text{восст}}$  ЧСС для моллюсков Севастопольского побережья [23], а также для мидий Адриатического [48] и Балтийского [49] морей характерно для акваторий с хорошим экологическим состоянием. Как известно, в адаптации видов к определенным условиям существования ведущую роль играют биохимические изменения, обеспечивающие поддержание обмена на определенном уровне. Энергетически менее затратные биохимические сдвиги используются организмом и в процессе индивидуальных адаптаций [50]. Как правило, изменяется интенсивность метаболизма и соотношение между отдельными его путями [11], что и было показано в настоящем исследовании.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, данные гидрохимических характеристик морской воды и результаты биохимических исследований тканей мидий из четырех севастопольских акваторий позволили характеризовать их экологическое состояние. Наиболее экологически благополучной и пригодной для развития

рекреационного рыболовства, а также пляжно-купального отдыха является бухта Матюшенко. В тканях мидий из бухты Круглая и района мыса Хрустальный, оборудованных под пляжный отдых, отмечены самые высокие показатели тканевого повреждения и активность трансаминаз, что характеризует их экологическое состояние как неудовлетворительное. Мидии из бухты Казачья занимают промежуточное положение по уровню окислительного стресса в их тканях между животными из района мыса Хрустальный и из бухты Матюшенко, что свидетельствует об удовлетворительном состоянии акватории в рамках изученных показателей. В то же время низкие значения  $T_{восст}$  ЧСС (менее 60 мин) у мидий из всех районов исследования свидетельствуют об эффективности биохимических изменений в тканях моллюсков, и возможном использовании всех тестируемых бухт для развития рекреационных видов отдыха.

Таким образом, для пляжно-купального отдыха и рекреационного рыболовства наиболее пригодными являются б. Матюшенко и Казачья, тогда как последняя акватория имеет благоприятные условия и для развития водных видов спорта. Для того, чтобы один вид рекреационного использования акватории не являлся помехой для других видов, береговую зону необходимо делить на сектора, в соответствии с возможностями акватории, и учитывать морфометрические характеристики пляжей. М.С. Орловой [51] было установлено, что рельеф и морфометрические показатели береговой зоны являются важными параметрами при оценке рекреационного потенциала. Так, галечный пляж бухты Матюшенко имеет небольшую площадь, и требует зонирования: для пляжно-купального отдыха, рекреационного рыболовства. Бухта Казачья, включает систему пляжей как с галечными, так и скалистыми берегами и может быть использована как для пляжного отдыха и рыболовства, так и дайвинга, отдыха с использованием маломерного моторного флота, катания на байдарках и яхтах, виндсерфинга. Однако левую кутовую часть бухты необходимо обозначить как природный заказник с ограниченным доступом, в связи с тем, что там обитают многие виды гидробионтов, занесенных в Красную книгу Севастополя. При этом в данный момент там производится вылов бентосных полихет, креветок. А в качестве рекреационной зоны эта территория представляет опасность для людей в связи с тем, что в той части водоема создаются благоприятные условия для развития патогенной микрофлоры (низкая соленость, высокая температура и слабый водообмен). Экологически менее благополучные, согласно результатам исследований биохимических показателей тканей моллюсков и гидрохимических характеристик морской воды, акватории (б. Круглая, пляж Хрустальный) могут также быть использованы для пляжно-купального отдыха и развития водных видов спорта, но требуют комплекса мер, направленных на улучшение качества поверхностных вод: ликвидацию очагов загрязнения, предотвращение попадания городских стоков в прибрежные морские акватории, а также мероприятия по улучшению водообмена с открытым морем. Последние включают: модернизацию имеющихся гидротехнических сооружений с целью

устранения препятствий нормального водообмена, дноуглубительные работы по фарватеру, создание гидротехнических сооружений на выходе из бухты, которые способствовали бы защите берегов и вместе с тем усиливали водообмен в бухте благодаря направлению основных течений открытого моря.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-44-920010 p\_a, а также по теме государственного задания ФИЦ ИНБЮМ номер гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by RFBR and the Government of Sevastopol according to research project № 18-44-920010 p\_a, and supported by state assignment № АААА-А18-118021350003-6.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. World Health Report 2002. Reducing Risks, Promoting Healthy Life. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2002. P. 7-14.
2. Лазицкая Н.Ф., Яковенко И.М. Геомаркетинговые подходы к изучению перспектив развития водной рекреации в Севастополе // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия «География». 2012. Т. 25 (64). N 3. С. 67-77.
3. Куманцов М.И., Страхова Т.В. Международные научные исследования морских биологических ресурсов и морской среды как основа устойчивого развития черноморского рыбохозяйственного комплекса // Материалы VII международной конференции Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона, Керчь, 20-23 июня, 2012. Т. 1. С. 3-10.
4. Шахматова О.А. Отклик гидробионтов на стрессовые факторы морских экосистем // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2012. N 7. С. 98-113.
5. Кусков А.С. Туристское ресурсоведение. М.: Академия, 2008. 208 с.
6. Беличева Л.А., Бусарова В.П. Оценка современного экологического состояния и рекреационного потенциала урбанизированных водотоков г. Петрозаводска // Материалы IV Школы-конференции молодых ученых с международным участием, Петрозаводск, 26-28 августа, 2011. С. 94-99.
7. Оборин М.С., Климова О.В. К вопросу изучения методик оценки и подходов к исследованию рекреационной деятельности // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. 2015. N 1. С. 19-28.
8. Долотов В.В., Иванов В.А. Повышение рекреационного потенциала Украины: кадастровая оценка пляжей Крыма. Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2007. 194 с.
9. Яковенко И.М., Лазицкая Н.Ф., Яковенко Е.В. Апробация методики мониторинга качества пляжей на примере г. Севастополь // Ученые записки Таврического

- национального университета имени В. И. Вернадского. Серия «География». 2014. Т. 27 (66). N 3. С. 41-51.
10. Немова Н.Н., Высоцкая Р.У. Биохимическая индикация состояния рыб. М.: Наука, 2004. 215 с.
  11. Немова Н.Н., Мещерякова О.В., Лысенко Л.А., Фокина Н.Н. Оценка состояния водных организмов по биохимическому статусу // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. N 5. С. 18-29.
  12. Regoli F., Principato G. Glutathione, glutathione-dependent and antioxidant enzymes in mussel, *Mytilus galloprovincialis*, exposed to metals under field and laboratory conditions: implications for the use of biochemical biomarkers // Aquatic Toxicology. 1995. V. 31. Iss. 2. P. 143-164. DOI: 10.1016/0166-445X(94)00064-W
  13. Regoli F., Nigro M., Orlando E. Lysosomal and antioxidant responses to metals in the Antarctic scallop *Adamussium colbecki* // Aquatic Toxicology. 1998. V. 40. Iss. 4. P. 375-392. DOI: 10.1016/S0166-445X(97)00059-3
  14. Vlahogianni T., Dassenakis M., Scoullos M.J., Valavanidis A. Integrated use of biomarkers (superoxide dismutase, catalase and lipid peroxidation) in mussels *Mytilus galloprovincialis* for assessing heavy metals' pollution in coastal areas from the Saronikos Gulf of Greece // Marine Pollution Bulletin. 2007. V. 54. N 9. P. 1361-1371. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2007.05.018
  15. Regoli F., Giuliani M. Oxidative pathways of toxicity and oxidative stress biomarkers in marine organisms // Marine Environmental Research. 2014. V. 93. P. 106-117. DOI: 10.1016/j.marenvres.2013.07.006
  16. Soldatov A.A., Gostyukhina O.L., Golovina I.V. Functional states of antioxidant enzymatic complex of tissues of *Mytilus galloprovincialis* Lam. under conditions of oxidative stress // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. 2014. V. 50. N 3. P. 206-214.
  17. Valavanidis A., Vlahogianni T., Dassenakis M., Scoullos M. Molecular biomarkers of oxidative stress in aquatic organisms in relation to toxic environmental pollutants // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2006. V. 64. Iss. 2. P. 178-189. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2005.03.013
  18. El-Khayat H.M.M., Hamid H.A., Gaber H.S., Mahmoud K.M.A., Flefel H.E. Snails and Fish as Pollution Biomarkers in Lake Manzala and Laboratory A: Lake Manzala Snails // Fisheries and Aquaculture Journal. 2015. V. 6. Iss. 4. P. 1-9.
  19. Chandurvelan R., Marsden I.D., Glover C.N., Gaw S. Assessment of a mussel as a metal bioindicator of coastal contamination: Relationships between metal bioaccumulation and multiple biomarker responses // Science of the Total Environment. 2015. V. 511. P. 663-675. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.064
  20. Soldatov A.A., Gostyukhina O.L., Golovina I.V. Antioxidant enzyme complex of tissues of the bivalve *Mytilus galloprovincialis* Lam. under normal and oxidative-stress conditions: a review // Applied Biochemistry and Microbiology. 2007. V. 43. N 5. P. 556-562. DOI: 10.1134/S0003683807050092
  21. Гостюхина О.Л., Андреев Т.И. Ферментное и низкомолекулярное звенья антиоксидантного комплекса двух видов черноморских моллюсков с разной устойчивостью к окислительному стрессу: *Mytilus galloprovincialis* Lam. и *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) // Журнал общей биологии. 2018. Т. 79. N 6. С. 482-492. DOI: 10.1134/S0044459618060040
  22. Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Trusevich V.V., Kurakin A.S., Ivanov A.V. Peculiarities of valve movement and of cardiac activity of the bivalve mollusk *Mytilus galloprovincialis* at various stress actions // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. 2009. V. 45. N 4. P. 524-526. DOI: 10.1134/S0022093009040100
  23. Холодкевич С.В., Кузнецова Т.В., Куракин А.С., Солдатов А.А., Гостюхина О.Л., Головина И.В., Андреев Т.И., Киринов М.П. Новый методологический подход к оперативной оценке экологического состояния прибрежных морских акваторий // Известия ТИНРО. 2018. Т. 194. С. 215-238. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-194-215-238
  24. Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Sharov A.N., Kurakin A.S., Lips U., Kolesova N., Lehtonen K.K. Applicability of bioelectronic cardiac monitoring system for the detection of biological effects of pollution in bioindicator species in the Gulf of Finland // Journal of Marine Systems. 2017. V. 171. P. 151-158. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2016.12.005
  25. Руководство по методам химического анализа морских вод / Под ред. С.Г. Орадовского. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 264 с.
  26. Методические указания N 30. М.: Гидрометеиздат, 1966. 140 с.
  27. Vollenweider R.A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters, with special reference to the NW Adriatic Sea. Proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index // Environmetrics. 1998. V. 9. Iss. 3. P. 329-357. DOI: 10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9
  28. Nishikimi M., Appaji N., Yagi K. Occurrence of superoxide anion in the reaction of reduced phenazine methosulfate and molecular oxygen // Biochemical and Biophysical Research Communications. 1972. V. 46. Iss. 2. P. 849-854. DOI: 10.1016/S0006-291X(72)80218-3
  29. Girin S.V. Modification of method of determination of catalase activity in biological substrates // Lab. Diagn. 1999. N 4. P. 45-46.
  30. Ohkawa H., Ohishi N., Yagi K. Assay for lipid peroxides in animal tissues by thiobarbituric acid reaction // Analytical Biochemistry. 1979. V. 95. Iss. 2. P. 351-358. DOI: 10.1016/0003-2697(79)90738-3
  31. Дубинина Е.Е., Бурмистов С.О., Ходов Д.А., Поротов И.Г. Окислительная модификация белков сыворотки крови человека, метод её определения // Вопросы медицинской химии. 1995. Т. 41. N 1. С. 24-26.
  32. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения в том числе нормативов ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Утверждено Приказом Федерального агентства по рыболовству N 20 от 18.01.2010.
  33. Куфтаркова Е.А., Губанов В.И., Ковригина Н.П., Еремин И.Ю., Сеничева М.И. Экологическая оценка современного состояния вод в районе взаимодействия Севастопольской бухты с прилегающей частью моря // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5. N 1. С. 72-91.
  34. Марикультура мидий на Черном море / Под ред. В.Н. Иванова. Национальная академия наук Украины. Институт биологии южных морей им. А.О.

- Ковалевского. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2007. 314 с.
35. Губанов В.И., Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П., Родионова Н.Ю. Диагноз качества вод Черного моря в районе г. Севастополя // Материалы III международной конференции «Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона», Керчь, 10-11 октября, 2008. С. 90-97.
36. Sies H. Biochemistry of Oxidative Stress // *Angewandte Chemie International Edition in English*. 1986. V. 25. N 12. P. 1058-1071.
37. Doyotte A., Cossu C., Jacquin M.-C., Babut M., Vasseur P. Antioxidant enzymes, glutathione and lipid peroxidation as relevant biomarkers of experimental or field exposure in the gills and the digestive gland of the freshwater bivalve *Unio tumidus* // *Aquatic Toxicology*. 1997. V. 39. Iss. 2. P. 93-110. DOI: 10.1016/S0166-445X(97)00024-6
38. Livingstone D.R. Contaminant-stimulated reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms // *Marine Pollution Bulletin*. 2001. V. 42. N 8. P. 656-666. DOI: 10.1016/S0025-326X(01)00060-1
39. Окислительный стресс. Проксиданты и антиоксиданты / Под ред. Е.Б. Меньшиковой, В.З. Ланкина, И.А. Бондарь, Н.Ф. Круговых, В.А. Труфакина. М.: Фирма «Слово», 2006. 556 с.
40. Welker A.F., Moreira D.C., Campos E.G., Hermes-Lima M. Role of redox metabolism for adaptation of aquatic animals to drastic changes in oxygen availability // *Comparative Biochemistry And Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*. 2013. V. 165. Iss. 4. P. 384-404. DOI: 10.1016/j.cbpa.2013.04.003
41. Isma M., Bairi Y., Sifi K., Soltani N. Protein carbonyls as biomarkers of oxidative stress induced by cadmium in *Donax trunculus*: Gonad contents during exposure and recovery // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2016. V. 25. N 12a. P. 5889-5895.
42. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века / Под ред. О.Г. Миронова, С.В. Алёмова. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. 276 с.
43. Gostyukhina O.L., Andreenko T.I. Tissue Metabolism and the State of the Antioxidant Complex in the Black Sea Mollusks *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) and *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 with Different Tolerances to Oxidative Stress // *Russian Journal of Marine Biology*. 2019. V. 45. Iss. 3. P. 211-220. DOI: 10.1134/S1063074019030039
44. Мартенянов В.И. Стресс у рыб: защитные и повреждающие процессы // *Биология внутренних вод*. 2002. N 4. С. 3-13.
45. Mohite V.T., Lahir Y.K., Pathare M., Agwuocha S., Mane U.H. Study on the effects of exposure of sub lethal dose of cadmium and zinc on the enzymatic activity in the tissues of green mussel – *Perna viridis* (L) from Ratnagiri coast, Maharashtra // *Journal of ecophysiology and occupational health*. 2011. V. 11. Iss. 3-4. P. 131-140. DOI: 10.18311/jeoh/2011/2258
46. Sonawane S.M. Effect of heavy metals on lysosomal enzyme alkaline phosphatase activity of bivalve *L. marginalis* // *IOSR Journal of Pharmacy*. 2017. V. 7. Iss. 7. P. 53-58.
47. Banaee M., Taheri S. Metal bioaccumulation, oxidative stress, and biochemical alterations in the freshwater snail (*Galba truncatula*) exposed to municipal sewage // *Journal of Advances in Environmental Health Research*. 2019. V. 7. Iss. 1. P. 8-17. DOI: 10.22102/JAEHR.2018.145241.1100
48. Kholodkevich S., Sharov A., Kuznetsova T., Kurakin A., Joksimović D., Nikolić M. Physiological testing of *Mytilus galloprovincialis* for the environmental assessing of coastal marine areas: a case study in Boka Kotorska Bay (the Adriatic Sea) // *Chemistry and Ecology*. 2019. P. 631-643. URL: [https://www.researchgate.net/publication/333219394\\_Physiological\\_testing\\_of\\_Mytilus\\_galloprovincialis\\_for\\_the\\_environmental\\_assessing\\_of\\_coastal\\_marine\\_areas\\_a\\_case\\_study\\_in\\_Boka\\_Kotorska\\_Bay\\_the\\_Adriatic\\_Sea](https://www.researchgate.net/publication/333219394_Physiological_testing_of_Mytilus_galloprovincialis_for_the_environmental_assessing_of_coastal_marine_areas_a_case_study_in_Boka_Kotorska_Bay_the_Adriatic_Sea) (дата обращения: 20.09.2019) DOI: 10.1080/02757540.2019.1618282
49. Kuznetsova T.V., Kholodkevich S.V., Kurakin A.S. Experience on ecological status assessment based on adaptive potential diagnostics in selected invertebrates of the Baltic Sea sub-regions // *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2018. V. 11. N 2. P. 75-85. DOI: 10.13140/RG.2.2.18159.94883
50. Шварц С.С. Экологические закономерности эволюции. М.: Наука, 1980. 153 с.
51. Орлова М.С. Геоморфологическая оценка рекреационного потенциала побережья северо-западного Крыма // *Геоморфология*. 2010. N 2. С. 102-107. URL: <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2010-2-102-107> (дата обращения: 26.09.2019)

## REFERENCES

- World Health Report 2002. Reducing Risks, Promoting Healthy Life. Geneva, Switzerland, World Health Organization, 2002, pp. 7-14.
- Lazitskaya N.F., Yakovenko I.M. Geomarketing approaches to studying the prospects for the development of water recreation in Sevastopol. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: «Geografiya»* [Scientific notes of the Tavrichesky National University named after IN AND. Vernadsky Series "Geography"]. 2012, vol. 25 (64), no. 3, pp. 67-77. (In Russian)
- Kumantsov M.I., Strakhova T.V. Mezhdunarodnye nauchnye issledovaniya morskikh biologicheskikh resursov i morskoi sredy kak osnova ustoychivogo razvitiya chernomorskogo rybokhozyaistvennogo kompleksa [International scientific research of marine biological resources and the marine environment as the basis for sustainable development of the Black Sea fishery complex]. *Materialy VII mezhdunarodnoi konferentsii Sovremennye rybokhozyaistvennye i ekologicheskie problemy Azovo-Chernomorskogo regiona, Kerch', 20-23 June, 2012* [Proceedings of VII International Scientific Conference Modern fisheries and environmental problems of the Azov-Black Sea region, Kerch, 20-23 June, 2012]. Kerch, 2012, vol. 1, pp. 3-10. (In Russian)
- Shakhmatova O.A. The response of aquatic organisms to stress factors of marine ecosystems. *Ekosistemy, ikh optimizatsiya i okhrana* [Ecosystems, their optimization and protection]. 2012, no. 7, pp. 98-113. (In Russian)
- Kuskov A.S. *Turistskoe resursovedenie* [Tourism resource studies]. Moscow, Akademiya Publ., 2008, 208 p. (In Russian)
- Belicheva L.A., Busarova V.P. Otsenka sovremennogo ekologicheskogo sostoyaniya i rekreatsiionnogo potentsiala

- urbanizirovannykh vodotokov Petrozavodsk [Assessment of the current environmental status and recreational potential of urbanized watercourses in Petrozavodsk]. *Materialy IV Shkoly-konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem, Petrozavodsk, 26-28 August 2011* [Proceedings of the IV School-Conference of Young Scientists with international participation, Petrozavodsk, 26-28 August, 2011]. Petrozavodsk, 2011, pp. 94-99. (In Russian)
7. Oborin M.S., Klimova O.V. Revisiting the studies of assessment methodologies and research approaches of the recreational activities. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* [Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series: Natural Sciences]. 2015, no. 1, pp. 19-28. (In Russian)
8. Dolotov V.V., Ivanov V.A. *Povyshenie rekreatsionnogo potentsiala Ukrainy: kadastraya otsenka plyazhei Kryma*. [Improving the recreational potential of Ukraine: cadastral evaluation of Crimean beaches] Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2007, 194 p. (In Russian)
9. Yakovenko I.M., Lazitskaja N.F., Yakovenko E.V. Approbation of methodology for monitoring the quality of beaches on the example of Sevastopol. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: «Geografiya»* [Scientific notes of the Tavrichesky National University named after IN AND. Vernadsky Series "Geography"]. 2014, vol. 27 (66), no. 3, pp. 41-51. (In Russian)
10. Nemova N.N., Vysotskaya R.U. *Biokhimicheskaya indikatsiya sostoyaniya ryb* [Biochemical indication of fish condition]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 215 p. (In Russian)
11. Nemova N.N., Meshcheryakova O.V., Lysenko L.A., Fokina N.N. The assessment of the fitness of aquatic organisms relying on the biochemical status. *Trudy KarNTs RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2014, vol. 5, pp. 18-29. (In Russian)
12. Regoli F., Principato G. Glutathione, glutathione-dependent and antioxidant enzymes in mussel, *Mytilus galloprovincialis*, exposed to metals under field and laboratory conditions: implications for the use of biochemical biomarkers. *Aquatic Toxicology*, 1995, vol. 31, iss. 2, pp. 143-164. DOI: 10.1016/0166-445X(94)00064-W
13. Regoli F., Nigro M., Orlando E. Lysosomal and antioxidant responses to metals in the Antarctic scallop *Adamussium colbecki*. *Aquatic Toxicology*, 1998, vol. 40, iss. 4, pp. 375-392. DOI: 10.1016/S0166-445X(97)00059-3
14. Vlahogianni T., Dassenakis M., Scoullos M.J., Valavanidis A. Integrated use of biomarkers (superoxide dismutase, catalase and lipid peroxidation) in mussels *Mytilus galloprovincialis* for assessing heavy metals' pollution in coastal areas from the Saronikos Gulf of Greece. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, vol. 54, no. 9, pp. 1361-1371. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2007.05.018
15. Regoli F., Giuliani M. Oxidative pathways of toxicity and oxidative stress biomarkers in marine organisms. *Marine Environmental Research*, 2014, vol. 93, pp. 106-117. DOI: 10.1016/j.marenvres.2013.07.006
16. Soldatov A.A., Gostyukhina O.L., Golovina I.V. Functional states of antioxidant enzymatic complex of tissues of *Mytilus galloprovincialis* Lam. under conditions of oxidative stress. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2014, vol. 50, no. 3, pp. 206-214.
17. Valavanidis A., Vlahogianni T., Dassenakis M., Scoullos M. Molecular biomarkers of oxidative stress in aquatic organisms in relation to toxic environmental pollutants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, vol. 64, iss. 2, pp. 178-189. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2005.03.013
18. El-Khayat H.M.M., Hamid H.A., Gaber H.S., Mahmoud K.M.A., Flefel H.E. Snails and Fish as Pollution Biomarkers in Lake Manzala and Laboratory A: Lake Manzala Snails. *Fisheries and Aquaculture Journal*. 2015, vol. 6, iss. 4, pp. 1-9.
19. Chandurvelan R., Marsden I.D., Glover C.N., Gaw S. Assessment of a mussel as a metal bioindicator of coastal contamination: Relationships between metal bioaccumulation and multiple biomarker responses. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 511, pp. 663-675. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.064
20. Soldatov A.A., Gostyukhina O.L., Golovina I.V. Antioxidant enzyme complex of tissues of the bivalve *Mytilus galloprovincialis* Lam. under normal and oxidative-stress conditions: a review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2007, vol. 43, no. 5, pp. 556-562. DOI: 10.1134/S0003683807050092
21. Gostyukhina O.L., Andreenko T.I. Enzymatic and low-molecular weight units of antioxidant complex in two species of the Black Sea mollusks with different resistance to oxidative stress: *Mytilus galloprovincialis* Lam. and *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906). *Biology Bulletin Review*, 2018, vol. 79, no. 6, pp. 483-493. (In Russian) DOI: 10.1134/S0044459618060040
22. Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Trusevich V.V., Kurakin A.S., Ivanov A.V. Peculiarities of valve movement and of cardiac activity of the bivalve mollusc *Mytilus galloprovincialis* at various stress actions. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2009, vol. 45(4), pp. 524-526. DOI: 10.1134/S0022093009040100
23. Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Kurakin A.S., Soldatov A.A., Gostyukhina O.L., Golovina I.V., Andreenko T.I., Kirin M.P. New methodological approach to express assessment of ecological state for the coastal sea waters. *Izvestiya TINRO*, 2018, vol. 194, pp. 215-238. (In Russian) DOI: 10.26428/1606-9919-2018-194-215-238
24. Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Sharov A.N., Kurakin A.S., Lips U., Kolesova N., Lehtonen K.K. Applicability of bioelectronic cardiac monitoring system for the detection of biological effects of pollution in bioindicator species in the Gulf of Finland. *Journal of Marine Systems*, 2017, vol. 171, pp. 151-158. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2016.12.005
25. Oradovskii S.G., ed. *Rukovodstvo po metodam khimicheskogo analiza morskikh vod* [Guidance of chemical analysis of sea waters methods]. SPb., Gidrometeoizdat Publ., 1993, 264 p. (In Russian)
26. *Metodicheskie ukazaniya no. 30* [Guidelines no. 30]. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1966, 140 p. (In Russian)
27. Vollenweider R.A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters, with special reference to the NW Adriatic Sea. Proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 1998, vol. 9, iss. 3, pp. 329-357. DOI: 10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9

28. Nishikimi M., Appaji N., Yagi K. Occurrence of superoxide anion in the reaction of reduced phenazine methosulfate and molecular oxygen. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 1972, vol. 46, iss. 2, pp. 849-854. DOI: 10.1016/S0006-291X(72)80218-3
29. Girin S.V. Modification of method of determination of catalase activity in biological substrates. *Laboratory Diagnostics*. 1999, no. 4, pp. 45-46.
30. Ohkawa H., Ohishi N., Yagi K. Assay for lipid peroxides in animal tissues by thiobarbituric acid reaction. *Analytical Biochemistry*, 1979, vol. 95, iss. 2, pp. 351-358. DOI: 10.1016/0003-2697(79)90738-3
31. Dubinina E.E., Burmistrov S.O., Khodov D.A., Porotov I.G. Oxidative modification of human blood serum proteins; the method of its determination. *Voprosy meditsinskoi khimii* [Problems of Medical Chemistry]. 1995, vol. 41, no. 1, pp. 24-26. (In Russian)
32. *Normativy kachestva vody vodnykh ob"ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya v tom chisle normativov PDK vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob"ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya. Utverzhdeno Prikazom Federal'nogo agentstva po rybolovstvu N 20 ot 18.01.2010.* [Quality standards for fishery water bodies. Approved by Order of the Federal Fisheries Agency, no. 20 dated 18.01.2010]. 2010. (In Russian)
33. Kuftarkova E.A., Gubanov V.I., Kovrigina N.P., Eremin I.Y., Senicheva M.I. Ecological assessment of modern state of waters in the region of interaction of the Sevastopol bay and part of the sea contiguous to it. *Morskoi ekologicheskii zhurnal* [Marine ecological journal]. 2006, vol. 5, no. 1, pp. 72-91. (In Russian)
34. Ivanov V.N., ed. *Marikul'tura midii na Chernom more* [Mariculture of mussel on the Black sea]. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2007, 314 p. (In Russian)
35. Gubanov V.I., Kuftarkova E.A., Kovrigina N.P., Rodionova N.Yu. Diagnostika kachestva vod Chernogo morya v raione g. Sevastopolya [The diagnosis of water quality of the Black Sea in the region of Sevastopol]. *Materialy III mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennyye problemy ekologii Azovo-Chernomorskogo regiona"*, Kerch, 10-11 October 2008 [Proceedings of III International Conference "Modern problems of the Azov-Black Sea region", Kerch, 10-11 October, 2008]. Kerch, 2008, pp. 90-97. (In Russian)
36. Sies H. *Biochemistry of Oxidative Stress*. Angewandte Chemie International Edition in English. 1986, vol. 25, no. 12, pp. 1058-1071.
37. Doyotte A., Cossu C., Jacquin M.-C., Babut M., Vasseur P. Antioxidant enzymes, glutathione and lipid peroxidation as relevant biomarkers of experimental or field exposure in the gills and the digestive gland of the freshwater bivalve *Unio tumidus*. *Aquatic Toxicology*, 1997, vol. 39, iss. 2, pp. 93-110. DOI: 10.1016/S0166-445X(97)00024-6
38. Livingstone D.R. Contaminant-stimulated reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, vol. 42, no. 8, pp. 656-666. DOI: 10.1016/S0025-326X(01)00060-1
39. Men'shchikova E.B., Lankin V.Z., Zenkov N.K., Bondar' I.A., Krugovoykh N.F., Trufakin V.A., eds. *Okislitel'nyi stress. Prooksidanty i antioksidanty* [Oxidative stress. Prooxidants and antioxidants]. Moscow, Slovo Publ., 2006, 556 p. (In Russian)
40. Welker A.F., Moreira D.C., Campos E.G., Hermes-Lima M. Role of redox metabolism for adaptation of aquatic animals to drastic changes in oxygen availability. *Comparative Biochemistry And Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2013, vol. 165, iss. 4, pp. 384-404. DOI: 10.1016/j.cbpa.2013.04.003
41. Isma M., Bairi Y., Sifi K., Soltani N. Protein carbonyls as biomarkers of oxidative stress induced by cadmium in *Donax trunculus*: Gonad contents during exposure and recovery. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2016, vol. 25, no. 12a, pp. 5889-5895.
42. Mironov O.G., Alyomov S.V., eds. *Sanitarno-biologicheskie issledovaniya pribrezhnykh akvatorii yugo-zapadnogo Kryma v nachale KhKhI veka* [Sanitary and biological studies of the South-Western Crimea coastal waters at the beginning of XXI century]. Simferopol, PP "ARIAL" Publ., 2018, 276 p. (In Russian)
43. Gostyukhina O.L., Andreenko T.I. Tissue Metabolism and the State of the Antioxidant Complex in the Black Sea Mollusks *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) and *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 with Different Tolerances to Oxidative Stress. *Russian Journal of Marine Biology*, 2019, vol. 45, iss. 3, pp. 211-220. DOI: 10.1134/S1063074019030039
44. Martemyanov V.I. Stress in fish: process of adaptation and damage. *Biologiya vnutrennikh vod* [Inland Water Biology]. 2002, no. 4, pp. 3-13. (In Russian)
45. Mohite V.T., Lahir Y.K., Pathare M., Agwuocha S., Mane U.H. Study on the effects of exposure of sub lethal dose of cadmium and zinc on the enzymatic activity in the tissues of green mussel – *Perna viridis* (L) from Ratnagiri coast, Maharashtra. *Journal of ecophysiology and occupational health*, 2011, vol. 11, iss. 3-4, pp. 131-140. DOI: 10.18311/jeoh/2011/2258
46. Sonawane S.M. Effect of heavy metals on lysosomal enzyme alkaline phosphatase activity of bivalve *L. marginalis*. *IOSR Journal of Pharmacy*. 2017, vol. 7, iss. 7, pp. 53-58.
47. Banaee M., Taheri S. Metal bioaccumulation, oxidative stress, and biochemical alterations in the freshwater snail (*Galba truncatula*) exposed to municipal sewage. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 2019, vol. 7, iss. 1, pp. 8-17. DOI: 10.22102/JAEHR.2018.145241.1100
48. Kholodkevich S., Sharov A., Kuznetsova T., Kurakin A., Joksimović D., Nikolić M. Physiological testing of *Mytilus galloprovincialis* for the environmental assessing of coastal marine areas: a case study in Boka Kotorska Bay (the Adriatic Sea). *Chemistry and Ecology*, 2019, pp. 631-643. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/333219394\\_Physiological\\_testing\\_of\\_Mytilus\\_galloprovincialis\\_for\\_the\\_environmental\\_assessing\\_of\\_coastal\\_marine\\_areas\\_a\\_case\\_study\\_in\\_Boka\\_Kotorska\\_Bay\\_the\\_Adriatic\\_Sea](https://www.researchgate.net/publication/333219394_Physiological_testing_of_Mytilus_galloprovincialis_for_the_environmental_assessing_of_coastal_marine_areas_a_case_study_in_Boka_Kotorska_Bay_the_Adriatic_Sea) (accessed 20.09.2019) DOI: 10.1080/02757540.2019.1618282
49. Kuznetsova T.V., Kholodkevich S.V., Kurakin A.S. Experience on ecological status assessment based on adaptive potential diagnostics in selected invertebrates of the Baltic Sea sub-regions. *Fundamental and applied hydrophysics*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 75-85. DOI: 10.13140/RG.2.2.18159.94883
50. Shvarts S.S. *Ekologicheskie zakonomernosti evolyutsii* [Ecological patterns of evolution]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 153 p. (In Russian)
51. Orlova M.S. Geomorphological assessment of recreational potential of the coast of the North-Western Crimea. *Geomorfologiya*, 2010, no. 2, pp. 102-107. (In Russian) Available at: <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2010-2-102-107> (accessed 26.09.2019)

**КРИТЕРИИ АВТОРСТВА**

Татьяна Б. Сигачева определяла содержание окисленных форм белков в гепатопанкреасе и жабрах мидий, описывала результаты, участвовала в написании и редактировании статьи. Ирина И. Чеснокова определяла активность аминотрансфераз и щелочной фосфатазы, описывала результаты в тексте статьи, участвовала в написании и редактировании статьи. Ольга Л. Гостюхина проводила отбор проб тканей у мидий, выполняла пробоподготовку и участвовала в определении активности СОД, каталазы и ТБК-активных продуктов, участвовала в написании рукописи. Сергей В. Холодкевич анализировал данные кардиоактивности мидий, принимал участие в редактировании рукописи. Татьяна В. Кузнецова проводила отбор мидий, замеры размеров, опыты с регистрацией кардиоактивности мидий из разных бухт, анализировала данные, написала часть по кардиоактивности, проводила статистический анализ данных по кардиоактивности, принимала участие в редактировании рукописи. Татьяна И. Андреевко определяла показатели прооксидантно-антиоксидантной системы гепатопан-креаса и жабр, участвовала в написании и редакции рукописи. Нелли П. Ковригина определяла гидрохимические характеристики морской воды в районах исследования, описывала результаты в тексте статьи. Татьяна В. Гаврюсева проводила отбор проб у мидий, анализировала данные, редактировала рукопись и несет ответственность за плагиат, самоплагиат и другие неэтические проблемы. Максим П. Киринов отвечал за доставку моллюсков, участвовал в обсуждении результатов. Антон С. Куракин обеспечивал работу оборудования для проведения работ для изучения кардиоактивности мидий.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**AUTHOR CONTRIBUTIONS**

Tatyana B. Sigacheva determined the content of oxidized forms of proteins in hepatopancreas and gills of mussels, described the results, and participated in writing and editing the manuscript. Irina I. Chesnokova determined the activity of aminotransferases and alkaline phosphatase, described the results and participated in the writing and editing of the manuscript. Olga L. Gostyukhina carried out mussel tissue sampling, performed sample preparation, participated in determining the activity of SOD, catalase and TBA-reactive products and participated in writing the manuscript. Sergey V. Kholodkevich analysed data on mussel cardiac activity and participated in editing the manuscript. Tatiana V. Kuznetsova carried out selection of mussels, measurement of sizes, experiments with registration of cardiac activity of mussels from different bays, analyzed data, wrote the part on cardiac activity, carried out statistical analysis of data on cardiac activity and participated in editing the manuscript. Tatiana I. Andreenko determined indicators of prooxidant-antioxidant system of hepatopancreas and gills and participated in the writing and editing of the manuscript. Nelya P. Kovrigina determined hydrochemical characteristics of seawater in sampling sites and participated in the editing of the manuscript. Tatiana V. Gavryuseva took samples from mussels, analysed the data, and wrote the manuscript and responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions. Maksim P. Kirin was responsible for the delivery of mollusks and participated in the discussion of the results. Anton S. Kurakin provided the equipment for work to study the cardiac activity of mussels.

**NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION**

The authors declare no conflict of interest.

**ORCID**

Татьяна Б. Сигачева / Tatyana B. Sigacheva <https://orcid.org/0000-0003-3125-898X>  
Ирина И. Чеснокова / Irina I. Chesnokova <https://orcid.org/0000-0002-7883-0755>  
Ольга Л. Гостюхина / Olga L. Gostyukhina <https://orcid.org/0000-0002-0069-7990>  
Сергей В. Холодкевич / Sergey V. Kholodkevich <https://orcid.org/0000-0002-7561-9743>  
Татьяна В. Кузнецова / Tatiana V. Kuznetsova <https://orcid.org/0000-0002-4848-1806>  
Татьяна И. Андреевко / Tatiana I. Andreenko <https://orcid.org/0000-0002-1165-5358>  
Нелли П. Ковригина / Nelya P. Kovrigina <https://orcid.org/0000-0002-6734-8285>  
Татьяна В. Гаврюсева / Tatiana V. Gavryuseva <https://orcid.org/0000-0002-9102-0861>  
Максим П. Киринов / Maksim P. Kirin <https://orcid.org/0000-0002-4214-565X>  
Антон С. Куракин / Anton S. Kurakin <https://orcid.org/0000-0003-2981-8458>