

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2023

Стецюк А.П., Кузьминова Н.С., Витер Т.В.

Распределение ртути в тканях черноморских бычков из прибрежной зоны Севастополя

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского"»
Российской академии наук, 299011, г. Севастополь, Российская Федерация

Введение. Морские гидробионты, особенно представляющие пищевую ценность, накапливают загрязняющие вещества из окружающей среды и поэтому должны постоянно контролироваться на предмет содержания токсичных элементов. Ртуть, даже в неорганической форме и в сублетальных количествах, является фактором риска для водной биоты.

Цель работы — измерение концентраций ртути в тканях черноморских бычков; определение видов, в большей или меньшей степени накапливающих ртуть, а также внутривидовых особенностей накопления ртути из-за разных пищевых предпочтений.

Материал и методы. Материалом для исследования концентрации ртути послужили мышцы, печень и жабры рыб черноморских бычков: кругляка *Neogobius melanostomus*, черныша (нигера) *Gobius niger*, мартовика (рыба-жаба) *Mesogobius batrachocephalus*, отловленных в 2019–2020 гг. в бухтах города Севастополя. Анализировали популяционные параметры рыб, затем органы подготавливали для изучения содержания в них ртути атомно-абсорбционным методом. У выловленных рыб также проводилось исследование пищевых объектов с помощью бинокуляра.

Результаты и обсуждение. Ртуть была обнаружена во всех проанализированных пробах, но концентрации, наблюдаемые в тканях рыб, ниже установленного уровня санитарно-гигиенических норм для морских рыб (0,5 мг/кг). Средние концентрации ртути в печени разных видов бычков превышали концентрацию ртути в жабрах, за исключением бычка-кругляка. В среднем бычок-мартовик накапливает ртути больше, чем кругляк и бычок-черныш. У *Mesogobius batrachocephalus*, в отличие от других видов *Gobiidae*, выявлена корреляция между возрастом и концентрацией ртути в органах рыб: высокая — в мышцах ($0,7 < r = 0,75$), значительная — в жабрах ($0,5 < r = 0,62$) и печени ($r = 0,50$). Взаимосвязь между стандартной длиной этого вида и концентрацией ртути характеризуется как умеренная — в жабрах, высокая — в печени. Выявленные различия накопительной способности изученных объектов связаны с различными предпочтениями в питании. Так, почти все кишечники бычка-мартовика к моменту отлова имели нулевую наполняемость, что говорит о более быстрой перевариваемости пищевых объектов, а также совпадении времени отлова с долгим голоданием, связанным с нерестом и охраной потомства. Следовательно, у этого вида основная «нагрузка» приходится на жабры, что свидетельствует о пути поступления токсиканта в организм главным образом посредством дыхания, а не через пищевые цепи. У кругляка ртуть поступает, напротив, через пищевые объекты — двустворчатых моллюсков. Самый широкий пищевой спектр у бычка-черныша; величины содержания ртути, сопоставимые с другими видами *Gobiidae*, связаны с естественным накоплением токсиканта (с возрастом), частичным попаданием ртути через пищевые цепи.

Ограничения исследования. При изучении уровня накопления ртути в тканях трех видов черноморских бычков из прибрежной зоны г. Севастополя, было проанализировано 137 проб, а при ихтиологических работах — 190 бычков-кругляков, 50 бычков-мартовиков и 20 бычков нигеров, что представляет собой достаточную выборку для констатации степени токсичности разных тканей рыбы, а также о механизмах накопления ртути.

Заключение. Концентрация ртути в разных тканях бычков не превышала допустимого норматива для морских рыб. Средние значения концентрации ртути в печени разных видов бычков превышали

таковую в жабрах, за исключением вида *Neogobius melanostomus*. В среднем бычок-мартовик накапливает ртути больше, чем другие виды *Gobiidae*. Обнаружена взаимосвязь между стандартной длиной бычка-мартовика и концентрацией ртути: в жабрах — умеренная, в печени — значительная. Изученные виды рыб можно рассматривать как подходящие индикаторы загрязнения ртутью сева-стопольских бухт.

Ключевые слова: ртуть; рыбы; мышцы; печень; жабры; бухты Севастополя

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов, так как рыба уснула естественным путём при доставке материала рыбаками, после чего свежий материал был быстро доставлен в лабораторию ФГБУН «ФИЦ ИнБЮМ» для биоанализа и подготовки проб для химического анализа.

Для цитирования: Стецюк А.П., Кузьмина Н.С., Витер Т.В. Распределение ртути в тканях черноморских бычков из прибрежной зоны Севастополя. *Токсикологический вестник*. 2023; 31(2): 109–119. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2023-31-2-109-119>

Для корреспонденции: Стецюк Александра Петровна, мл. науч. сотр. ФГБУН «ФИЦ "Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского"» РАН, 299011, г. Севастополь, Российская Федерация. E-mail: alex-ra-777@mail.ru

Участие авторов: Стецюк А.П. — концепция и дизайн исследования, обработка материала, статистический анализ, химический анализ ртути; Кузьмина Н.С. — сбор и обработка ихтиологического материала, статистический анализ; Витер Т.В. — обработка содержимого кишечника рыб, статистический анализ, трофология бычков. Все соавторы — написание текста, редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Благодарность. Авторы выражают благодарность рыбакам Рыболовецкого колхоза «Путь Ильича» (г. Севастополь) и ФГБУН «ФИЦ ИнБЮМ» РАН за рыбу, предоставленную в качестве исследовательского материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено по государственной теме «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ 121031500515-8).

Поступила в редакцию: 21 декабря 2022 / Принята в печать: 15 февраля 2023 / Опубликовано: 30 апреля 2023

Stetsiuk A.P., Kuzminova N.S., Viter T.V.

Mercury distribution in tissues of black sea gobiids from the coastal zone of Sevastopol

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 299011, Sevastopol, Russian Federation

Introduction. Marine aquatic organisms, especially with nutritional value, accumulate pollutants from the environment and therefore must be constantly monitored for toxic elements content. Mercury, even in inorganic form and in sub-lethal amounts, is a risk factor for aquatic biota.

The *aim of the work* is to measure mercury concentrations in the tissues of the Black Sea gobies; identification of species accumulating mercury to a greater or lesser extent, as well as intraspecific features of mercury accumulation.

Material and methods. Muscles, liver and gills of Black Sea goby fish (round goby *Neogobius melanostomus*, niger-goby *Gobius niger*, knout goby *Mesogobius batrachocephalus*, caught in 2019–2020) were used as material for the study of mercury concentration. The population parameters of the fish caught in the bays of the Sevastopol were analyzed, and then the organs were prepared for the study of the mercury content in them using the atomic absorption method. Food objects were also examined using a binocular microscope.

Results and discussion. Mercury was detected in all analyzed samples, but the concentrations observed in fish tissues are below the legal level of sanitary and hygienic standards for marine fish (0.5 mg/kg). The average concentrations of mercury in the liver of different species of gobies exceeded the concentration of mercury in the gills, with the exception of the round goby. On average, the knout goby accumulates more mercury than the round goby and the black goby. In *M. batrachocephalus*, unlike other species of *Gobiidae*, a correlation

was found between age and mercury concentration in fish organs: high correlation in muscles ($0.7 < r = 0.75$), significant r — in gills and liver. The connection between the standard length of species analyzed and the concentration of mercury is characterized as: middle — in the gills, high — in the liver. The revealed differences in the cumulative capacity of the objects studied are associated with different nutritional preferences. Almost all the intestines of the toad (knout) goby at the time of capture were empty, which indicates a faster digestion of food objects, as well as the coincidence of the time of capture with a long starvation associated with spawning and protection of eggs laying. Consequently, in this species, the main “load” falls on the gills, which indicates the route of toxicant entry into the body mainly through respiration, and not through food chains. In round goby, the toxicant studied, on the contrary, enters through food objects — bivalve mollusks. The black goby has the widest food spectrum; values of mercury content, comparable with other species of Gobiidae, are associated with the natural accumulation of the toxicant (with age), partial ingress of mercury through food chains.

Conclusion. Mercury concentrations in different tissues of gobies did not exceed the legal standard for marine fish. The average values of mercury concentration in the liver of different gobies exceeded those in the gills, with the exception of *N. melanostomus*. On average, the toad goby accumulates more mercury than other species of Gobiidae. A relationship was found between the standard length of the goby and the concentration of mercury: in the gills — moderate, in the liver — significant. The studied fish species can be considered as suitable indicators of mercury pollution in the Sevastopol bays.

Limitations. When studying the level of mercury accumulation in the tissues of the Black Sea gobies from the coastal zone of the Sevastopol, 137 samples, and at ichthyological analyze — 190 round goby, 50 knout goby, 20 niger goby were done, which is a sufficient sample volume to describe the degree of toxicity of different fish tissues, as well as the mechanisms of mercury accumulation.

Keywords: mercury; fish; muscles; liver; gills; Sevastopol bays

Compliance with ethical standards. The study does not require the presentation of the opinion of the biomedical ethics committee or other documents, since the fish fell asleep naturally during the material transportation by the fishermen, after which the fresh fish was quickly delivered to the laboratory of the Institute of Biology of the Southern Seas of RAS for bioanalysis and sample preparation for chemical analysis.

For citation: Stetsiuk A.P., Kuzminova N.S., Viter T.V. Mercury distribution in tissues of black sea gobiids from the coastal zone of Sevastopol. *Toxikologicheskii vestnik (Toxicological Review)*. 2023; 31(2): 109-119. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2023-31-2-109-119> (in Russian)

For correspondence: Aleksandra P. Stetsiuk, junior researcher of A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, 2299011. E-mail: alex-ra-777@mail.ru

Information about authors:

Stetsiuk A.P., <https://orcid.org/0000-0002-9539-9514>, Scopus AuthorID: 57219448698, WoS ResearcherID: ABA-6325-2020, SPIN-code: 1690-5482, PИHЦ AuthorID: 943890

Kuzminova N.S., <https://orcid.org/0000-0001-5453-0136>, Scopus AuthorID: 36990897200, WoS ResearcherID: X-4481-2019, SPIN-code: 9809-0393, PИHЦ AuthorID: 762647

Viter T.V., <https://orcid.org/0000-0002-6792-5548>, Scopus AuthorID: 57208484620, SPIN-code: 5057-4796, PИHЦ AuthorID: 984485

Author contribution: Stetsiuk A.P. — the concept and design of the study, material processing, statistical analysis, chemical analysis of mercury; Kuzminova N.S. — collection and processing of ichthyological material, statistical analysis; Viter T.V. — processing of fish intestine contents, statistical analysis, trophology of gobies. All co-authors — writing text, editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Acknowledgements. The authors are grateful to the fishermen of the Fishing Collective Farm «Put' Ilyicha» (Sevastopol) collective farm and the Institute of Biology of the Southern Seas of the Russian Academy of Sciences for the fish provided as research material.

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

Funding. The study was carried out on the state theme “Molismological and biogeochemical foundations of the homeostasis of marine ecosystems” (No. 121031500515-8).

Введение

Морские организмы, включая рыбу, накапливают загрязняющие вещества из окружающей среды и поэтому широко используются в программах мониторинга загрязнения морской среды [1]. Ртуть (Hg) и ее соединения относятся к основным загрязнителям водной среды, способным аккумулироваться в гидробионтах. Hg, даже в неорганической форме и в сублетальных количествах, является фактором риска для водной биоты [2]. При исследовании воздействия различных концентраций ртути (10, 20, 30, 40 мкг/л) на особей *Oryzias javanicus* обнаружено, что ртуть вызывала изменения при всех введенных концентрациях, и последствия стали более серьезными с увеличением дозы [3].

Хищные рыбы как наиболее крупные, долгоживущие, быстрорастущие, занимающие высшее положение в пищевой цепи, содержат больше ртути и поэтому с точки зрения воздействия на здоровье человека представляют наибольшую опасность. Они обладают усиленным обменом веществ, нежели растительноядные, и соответственно органы хищных рыб больше подвержены аккумуляции в них ртути [4].

Бычки Азово-Черноморского бассейна являются важным звеном прибрежных биоценозов, а также объектом промысла [5]. Будучи неактивными мигрантами и донными представителями ихтиофауны, они могут использоваться как биоиндикаторные организмы для оценки качества воды рыбохозяйственных водоёмов из-за их высокого положения в трофической цепи. Также в некоторых исследованиях отмечена чёткая зависимость накопления ртути в мышцах рыб от типа

питания [6–8]. Результаты показали, что тип пищи, пищевые привычки и трофическое положение являются важными параметрами, влияющими на перенос и биомагнификацию ртути в рыбе [9]. Концентрации ртути на высоком трофическом уровне зависят от организмов самого низкого трофического уровня [10]. С повышением занимаемого положения в трофической пирамиде у живых объектов происходило достоверное возрастание содержания металла ($r = 0,96$) [7]. Исследования других авторов также подтверждают факты, что высокие уровни Hg присутствуют в более высоких трофических уровнях пищевой цепи [11, 12]. Исходя из вышесказанного, донные представители ихтиофауны идеально подходят в качестве индикаторов загрязнения, так как способны посредством пищевых цепей, а также постоянного контакта с грунтом в большей степени накапливать ртуть.

Проведённые исследования по сравнению накопления ртути между всеми тканями рыб показывают, что биоаккумуляция ртути наблюдается больше в печени, чем в других тканях [13]. Печень и жабры были наиболее чувствительными органами по отношению к окислительному стрессу, демонстрируя признаки нарушения окислительно-восстановительного гомеостаза и высокие уровни ртути [2]. В то же время мышцы являются наиболее часто анализируемыми тканями для мониторинга уровня Hg у рыб, поскольку они представляют собой съедобную часть организма, связанную с негативными последствиями для здоровья человека [14].

На сегодняшний день данные о концентрациях ртути в рыбах Чёрного моря севавтопольских бухт немногочисленны [15, 16]. Поэтому *цель нашей работы* — измерение концентраций ртути в тканях черноморских бычков и определение видов, в большей или меньшей степени накапливающих ртуть. Представлялось важным также оценить возможную зависимость концентрации ртути от возраста и размера рыб.

Материал и методы

Материалом для исследования концентрации ртути послужили мышцы, печень и жабры рыб 3 видов черноморских бычков: кругляка *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814), черныша (нигера) *Gobius niger* Linnaeus, 1758, мартовика (рыба-жаба) *Mesogobius batrachocephalus* (Pallas, 1814). Рыбы для данного анализа отлавливались в зимне-весенний период в 2019–2020 гг. в бухтах города Севастополя — Стрелецкой и Круглой (рис. 1).

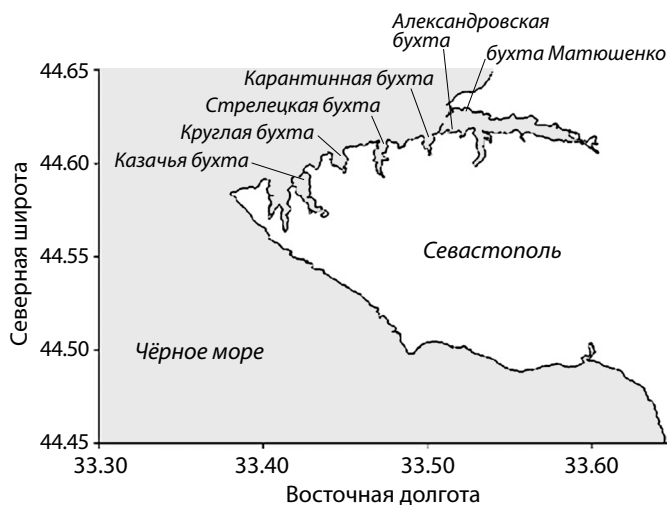


Рис. 1. Карта района исследования и расположение станций отбора проб.

Fig. 1. Study area and sample station.

Популяционные параметры указанных видов рыб анализировали, используя весь материал по бычкам, отловленным в бухтах Севастополя с 2016 по 2021 г.: Карантинной, Стрелецкой, Круглой, Казачьей, Матюшенко и Александровской. Для каждой особи определяли общую (TL) и стандартную (SL) длины (см) и массу (г) рыб, пол и зрелость гонад. Рыб препарировали, выделяя печень и жабры. Все ткани были взвешены для оценки индексов органов (индекс жабр (ИЖ), индекс печени (ИП), гонадо-соматический индекс (ГСИ) согласно [17]). Пересчёт массы жабр и гонад вели на массу тушки и выражали в процентах (%), а ИП выражали в промилле (‰). Затем органы подготавливали для изучения содержания в них ртути атомно-абсорбционным методом. Метод основан на окислении ртути, восстановлении её до металлической формы и измерение её количества с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра на длине волны 253,7 нм. Пробоподготовка включала в себя разложение пробы смесью кислот (10 мл H_2SO_4 18-нормальной концентрации и 5 мл концентрированной HNO_3 на пробу) и термическую обработку. Далее пробы охлаждали и добавляли раствор $KMnO_4$ для полного их окисления (от 15 до 20 мл раствора концентрации 50 г/л). Через 15–20 мин пробы фильтровали. К пробе добавляли разбавленную серную кислоту (1:1 по объёму с H_2O) и 5 мл раствора гидроксилана гидрохлорида концентрации 15 г/л. Ионы ртути восстанавливали дихлоридом олова (в склянку приливали 10 мл раствора $SnCl_2$ концентрации 100 г/л) и сразу вводили барботёр анализатора ртути «Hiranuma-1». Калибровку прибора проводили с использованием раствора ртути в 1-молярной концентрации HNO_3 . Перед определением ртути была проведена холостая калибровка анализатора (100 мл дистиллированной воды + 5 мл H_2SO_4 (1:1)), затем еще одна калибровка с использованием серии калибровочных растворов с концентрацией ртути: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 мкг/л (по 10 повторностей на каждую концентрацию). По измеренным концентрациям ртути в биологических тканях с добавками стандартного образца раствора ионов ртути (П) ГСО 7879–2001 нами получена относительная погрешность 12,7%. Концентрация ртути определена в 137 тканях бычков. Максимальная масса одной пробы не превышала 3 г. Концентрацию ртути в проанализированных образцах выражали в нг/г сырой массы.

У выловленных рыб проводилось исследование содержимого желудочно-кишечного тракта. Для определения объектов питания содержимое

кишечников просматривали под биноклем МБС-9. Идентификацию потребленных пищевых объектов проводили по «Определителю фауны Чёрного и Азовского морей» [18]. Содержимое пищевого комка определяли до возможно низшего таксономического уровня. Номенклатуру таксонов приводили в соответствии с мировым реестром World Register of Marine Species [19].

Полученный цифровой материал анализировали статистически. Оценка распределения через сравнение среднего и медианы показала распределение близкое к нормальному. Для выявления зависимости между концентрацией ртути и другими параметрами рассчитывали коэффициенты корреляции Пирсона с помощью стандартной программы Microsoft Excel. Если коэффициент корреляции находился в пределах $0 < r < 0,3$, то связь между анализируемыми параметрами считали слабой, $0,3 < r < 0,5$ — умеренной, $0,5 < r < 0,7$ — значительной и $0,7 < r < 0,9$ — высокой [20].

Результаты и обсуждение

Для характеристики основных биологических параметров черноморских бычков составлена табл. 1. Для наиболее точной характеристики некоторых популяционных и морфофизиологических параметров бычков, а также в связи с тем, что для прибрежной зоны города Севастополя это не массовые виды, в массив данных вошли особи, отловленные в современный период (с 2016 по 2021 г.) в бухтах Казачья, Круглая, Стрелецкая, Карантинная, Александровская, Матюшенко. Количество рыб из бухты Стрелецкой было преобладающим. Возраст бычка-кругляка в уловах был от 0 + до 7 лет, черныша — от 3 до 6+ лет, а бычка-мартовика — 1–8 лет. Самцы всех возрастных групп по численности преобладали над самками. Массив данных включает особей, в которых определена концентрация ртути в 2019–2020 гг.

Результаты распределения ртути в органах рыб разных видов:

- *Neogobius melanostomus*. Абсолютные концентрации ртути варьировали от 2,8 до 32,5 нг/г в мышцах, от 4,2 до 98,0 нг/г в жабрах и от 8,1 до 34,0 нг/г в печени. У большинства рыб концентрация ртути в печени превышала концентрацию ртути в жабрах. Однако средние концентрации составили: 7,1 — в мышцах, 17,1 — в жабрах и 16,5 нг/г — в печени (рис. 2).
- *Gobius niger*. Абсолютные концентрации ртути варьировали от 3,3 до 6,2 нг/г в мышцах, от 23,0 до 52,0 нг/г в жабрах и от 7,0 до 67,0 нг/г в печени. У большинства рыб концентрация ртути в печени была выше, чем в жабрах.

Таблица 1 / Table 1

Основные популяционные и морфофизиологические параметры бычков массовых возрастных групп из прибрежной зоны г. Севастополя в 2016 – 2021 гг.

Main population and morphophysiological parameters of gobies of mass age groups from the coastal area of Sevastopol in 2016–2021

Вид	Пол	Возраст, лет	TL, см	SI, см	Масса рыб, г	ИП, ‰	ГСИ, ‰	ИЖ, ‰
Кругляк	♀	3	13,1±1,0	10,9±1,0	27,8±5,6	45,1±5,5	12,7±2,8	8,7±4,9
		4	13,6±0,5	11,1±0,5	36,9±3,9	61,5±3,7	11,4±1,6	4,3±0,4
	♂	3	14,8±0,5	12,2±0,4	45,5±4,5	53,1±5,0	0,9±0,2	3,2±0,3
		4	16,8±0,2	13,9±0,2	66,8±3,2	58,2±7,2	1,4±0,1	3,1±0,3
		5	17,2±0,3	14,3±0,3	72,1±4,0	48,9±2,7	1,5±0,1	2,9±0,3
		6	17,1±0,6	14,1±0,5	70,1±6,5	42,6±4,6	3,1±1,4	2,8±0,7
Мартовик	♀	3	22,3±0,6	18,8±0,5	126,5±21,5	73,8±14,2	0,6±0,1	1,5±1,2
		4	26,1±0,5	22,4±0,3	185,1±21,6	72,1±21,1	0,6±0,3	1,5±0,6
		5	26,5±1,1	23,0±0,9	258,3±58,2	106,6±3,4	23,3±10,1	3,0
		6	27,5±1,4	23,7±1,4	256,5±41,2	81,5±10,4	17,6±5,7	3,3±0,3
	♂	3	23,9±1,1	20,1±0,9	135,5±2,2	41,9±9,2	0,3±0,1	0,1±0,03
		4	25,2±0,8	21,2±0,7	140,0±14,1	47,7±9,6	0,4±0,05	0,9±0,5
Черныш	♀	3	10,5±0,6	8,6±0,5	13,9±1,8	40,7±2,1	7,4±2,7	2,9±0,3
		3	10,9±0,5	8,9±0,4	14,1±1,9	39,18±9,0	1,1±0,2	2,9±0,1
	♂	4	11,1±0,3	9,1±0,3	16,1±1,5	40,8±5,2	2,1±1,1	2,8±0,1
		5	11,6±0,3	9,5±0,1	17,8±1,9	34,8±14,6	0,7±0,1	2,6±0,2
♂	6	11,6±0,5	9,5±0,5	16,3±2,2	45,6±9,6	1,0±0,3	3,2±0,4	

Средние концентрации составили величины: 4,3 — в мышцах, 32,6 — в жабрах и 35,2 нг/г — в печени (см. рис. 2).

• *Mesogobius batrachocephalus*. Абсолютные концентрации ртути варьировали от 3,8 до 19,0 нг/г в мышцах, от 4,3 до 18,0 нг/г в жабрах и от 10,0 до 80,0 нг/г в печени. У всех рыб данного вида концентрация ртути в печени превышала концентрацию ртути в жабрах. Средняя концентрация ртути в тушках составила 10,4, в жабрах — 11,5, а в печени — 36,0 нг/г (см. рис. 2).

Концентрации ртути, обнаруженные в тканях рыб в нашем исследовании, были ниже установленных в Российской Федерации нормативов для морских рыб (0,5 мг/кг) [21].

Самые низкие концентрации ртути были обнаружены в мышцах всех видов исследованных нами бычков. Самые высокие абсолютные концентрации ртути обнаружены в печени самца *M. batrachocephalus* (80,0 нг/г) и жабрах самки

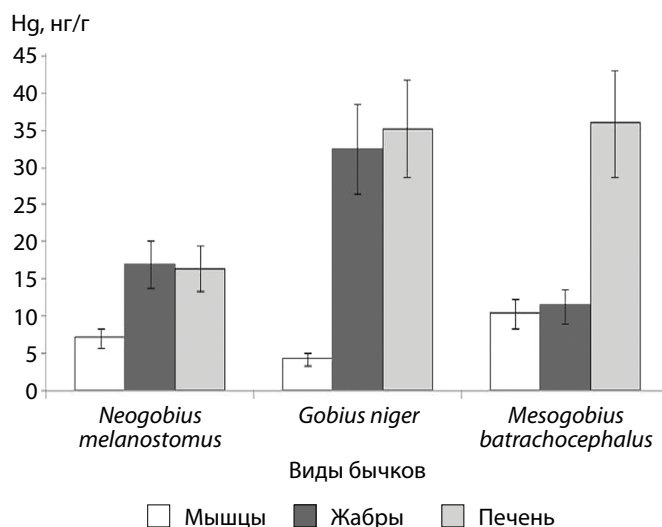


Рис. 2. Распределение ртути в органах разных видов бычков, нг/г сырой массы.

Fig. 2. Distribution of the mean concentration of mercury in the tissues of different gobies species (ng/g of fresh weight).

Таблица 2 / Table 2

Корреляция (r) и коэффициент детерминации (R^2) для концентраций ртути и разных параметров рыб (стандартной длины, возраста и массы тела)
Correlation (r) and coefficient of determination (R^2) for the absolute concentration of mercury in the organs of goby fish and different biological parameters

Органы рыб	Вид бычков	Между стандартной длиной рыбы и концентрацией ртути		Между возрастом рыбы и концентрацией ртути		Между массой рыбы и концентрацией ртути	
		r	R^2	r	R^2	r	R^2
Мышцы	Кругляк	-0,50	0,25	-0,12	0,01	-0,42	0,17
	Черныш	-0,23	0,05	-0,75	0,56	-0,15	0,02
	Мартовик	0,14	0,02	0,75	0,55	0,35	0,12
Жабры	Кругляк	-0,67	0,45	-0,33	0,11	-0,48	0,23
	Черныш	-0,76	0,57	0,03	0,00	-0,46	0,57
	Мартовик	0,32	0,10	0,62	0,39	0,63	0,39
Печень	Кругляк	-0,46	0,00	-0,24	0,06	-0,48	0,00
	Черныш	-0,38	0,14	-0,23	0,05	-0,24	0,06
	Мартовик	0,51	0,26	0,50	0,24	0,13	0,02

N. melanostomus (98,0 нг/г). У всех исследованных нами *M. batrachocephalus* абсолютные концентрации ртути в печени были выше, чем в жабрах и мышцах. Для рыб видов *N. melanostomus* и *G. niger*, превалирование ртути наблюдалось как в жабрах, так и в печени. Более высокие концентрации ртути в жабрах свидетельствуют о преимущественном поступлении ртути через дыхательный аппарат. Приоритетные концентрации ртути в печени указывают на поглощение ртути с пищей, а также о детоксикационной и аккумуляционной роли этого органа. Как известно, во внутренних органах накапливается больше ртути из рациона, чем в мышечных тканях [2]. Из этого следует, что путь поступления ртути в организм рыб смешанный, зависящий как от типа питания, так и от абиотических условий. Согласно другим данным, при остром отравлении ртуть концентрируется в основном в жабрах, мускулатуре и почках, а при хроническом — в почках, печени, головном мозге и кишечной стенке [22].

У *G. niger* и *M. batrachocephalus* средняя концентрация ртути в печени превышала концентрацию ртути в мышцах и жабрах (см. рис. 2). У бычка-кругляка (*N. melanostomus*) средние концентрации ртути в жабрах были незначительно выше, чем в печени.

При разделении рыб на виды также обнаружено, что средние концентрации ртути в мышцах увеличивались в ряду *G. niger* < *N. melanostomus* < *M. batrachocephalus*. Такая же закономерность и в величинах массы разных видов бычков (см. табл. 1).

Средние концентрации ртути в жабрах рыб увеличивались в ряду *M. batrachocephalus* < *N. melanostomus* < *G. niger*. Индексы жабр у сходных возрастных групп разных видов бычков (как и в целом по видам) имеют такую же зависимость (см. табл. 1).

В печени средние концентрации ртути увеличивались в ряду *N. melanostomus* < *G. niger* < *M. batrachocephalus*, хотя индекс печени у представителей одинаковых возрастных групп был минимальным у черныша, а максимальным (как и уровень ртути) у мартовика (см. табл. 1). Таким образом, бычок-мартовик накапливает в среднем больше ртути, чем другие исследованные виды *Gobiidae*. Весьма интересно, что если в этом случае уровень ртути закономерно увеличивается с увеличением массы тела и печени, то у бычка-черныша — самого маленького из всех исследованных видов, все-таки жабры имеют наивысшее среднее содержание ртути (как и индекс), что указывает на то, что аккумуляция ртути происходит в том «очаге» организма, который обладает большими пропорциями в организме.

Размер рыб является одним из наиболее важных факторов, определяющих накопление металлов в организме, поскольку он связан с возрастом и массой. Согласно некоторым исследованиям, концентрации Hg в мышцах морских организмов увеличиваются с размером и возрастом [23]. В наших исследованиях была выявлена слабая зависимость между абсолютной концентрацией ртути в мышцах и стандартной длиной для разных видов рыб (см. табл. 2).

Однако стандартная длина бычков-мартовиков и концентрация ртути в их жабрах коррелировала со значением $r = 0,32$, что расценивалось нами как умеренная взаимосвязь. Концентрация ртути в печени и стандартная длина коррелировали со значениями $r = 0,51$, что классифицировалось нами как значительная связь ($0,5 < r < 0,7$). Коэффициент детерминации (R^2) для этих видов рыб составил 0,26 (для концентрации ртути в печени и стандартной длины). Для бычка-кругляка и бычка-черныша корреляция между стандартной длиной рыбы и концентрацией ртути во всех изученных органах отсутствовала. Однако R^2 между концентрацией ртути в жабрах и длиной рыбы составил значение 0,45 для бычка-кругляка и 0,57 — для бычка-черныша.

Между возрастом и концентрацией ртути обнаружилась корреляция у бычка-мартовика (см. табл. 2). При этом значение корреляции было сильным между концентрацией ртути в мышцах и возрастом ($r = 0,75$), значительным — между концентрацией ртути в жабрах и возрастом ($r = 0,62$) и умеренным — между концентрацией ртути в печени с возрастом ($r = 0,50$). Соответствующие величины R^2 для этого вида — 0,55, 0,39 и 0,24. Для остальных видов рыб, корреляция была либо отрицательной, либо слабой ($0 < r < 0,3$). Только у бычка-черныша между возрастом и концентрацией ртути в мышцах R^2 имел значение 0,56. У бычков-кругляков возраст варьировал в широком диапазоне: 1–7 лет, по половому признаку рыб не разделяли. Бычки-черныши были от 2 до 6 лет, а возраст бычков-мартовиков варьировал от 3 до 7 лет. Большинство исследованных нами рыб были взрослыми и крупными. Однако молодь может быть более ценным индикатором, поскольку концентрация ртути в мелкой рыбе может отражать местные или ежегодные изменения ртутного загрязнения [24].

Между массой бычка-мартовика и концентрацией ртути: в мышцах обнаружена умеренная связь ($r = 0,35$), в жабрах — значительная ($r = 0,63$), в печени — слабая ($r = 0,13$). Для бычка-кругляка и бычка-черныша величина корреляции имела отрицательные значения (см. табл. 1). По-видимому, такие отличия связаны с различными предпочтениями в питании рыб. Так, нами было установлено, что почти все кишечника бычка-мартовика к моменту отлова имели нулевую наполняемость, что говорит о более быстрой перевариваемости пищевых объектов. Тот факт, что среди обнаруженных в пищевом комке видов была рыба, подтверждает это (табл. 3). Вторая причина заключается в том, что когда бычок-мартовик подходит в нерестовый период к берегу (именно в это время происходит его основной лов), его пищевое

Таблица 3 / Table 3

Качественный состав пищевых объектов в кишечниках трёх видов черноморских бычков в 2019–2021 гг.

Qualitative composition of food objects in the intestines of three species of Black Sea gobies in 2019–2021

Пищевой объект	Бычок-кругляк	Бычок-черныш	Бычок-мартовик
Bivalvia:			
<i>Abra</i> sp.	+	+	
<i>Pitar rudis</i>	++	+	
<i>Chamelea gallina</i>	+		
<i>Gouldia minima</i>	+		
<i>Spisula</i> sp.	+	+	
<i>Parvicardium exiguum</i>	+		
<i>Mytilidae</i>	+		
<i>Lucinella divaricata</i>	+		
Gastropoda:			
<i>Parthenina</i> sp.	+		
<i>Bittium reticulatum</i>	++	+	
<i>Melarhaphes neritoides</i>	+		
<i>Rissoa membranacea</i>		+	
<i>Retusa truncatula</i>	+		
Malacostraca:			
<i>Gammaridae</i>	+		
<i>Amphipoda</i>		+	
<i>Diogenes pugilator</i>		+	
<i>Xanthidae</i>		++	
<i>Xantho poressa</i>			+
<i>Pachygrapsus marmoratus</i>			+
Polychaeta:			
<i>Nereididae</i>		+	
<i>Serpulidae</i>	+		
Polyplacophora:			
<i>Lepidochitona cinerea</i>		+	
Pices:			
<i>Pices</i> sp.			++
<i>Symphodus cinereus</i>			+

Примечание. «+» – единичные находки; «++» – частые обнаружения.

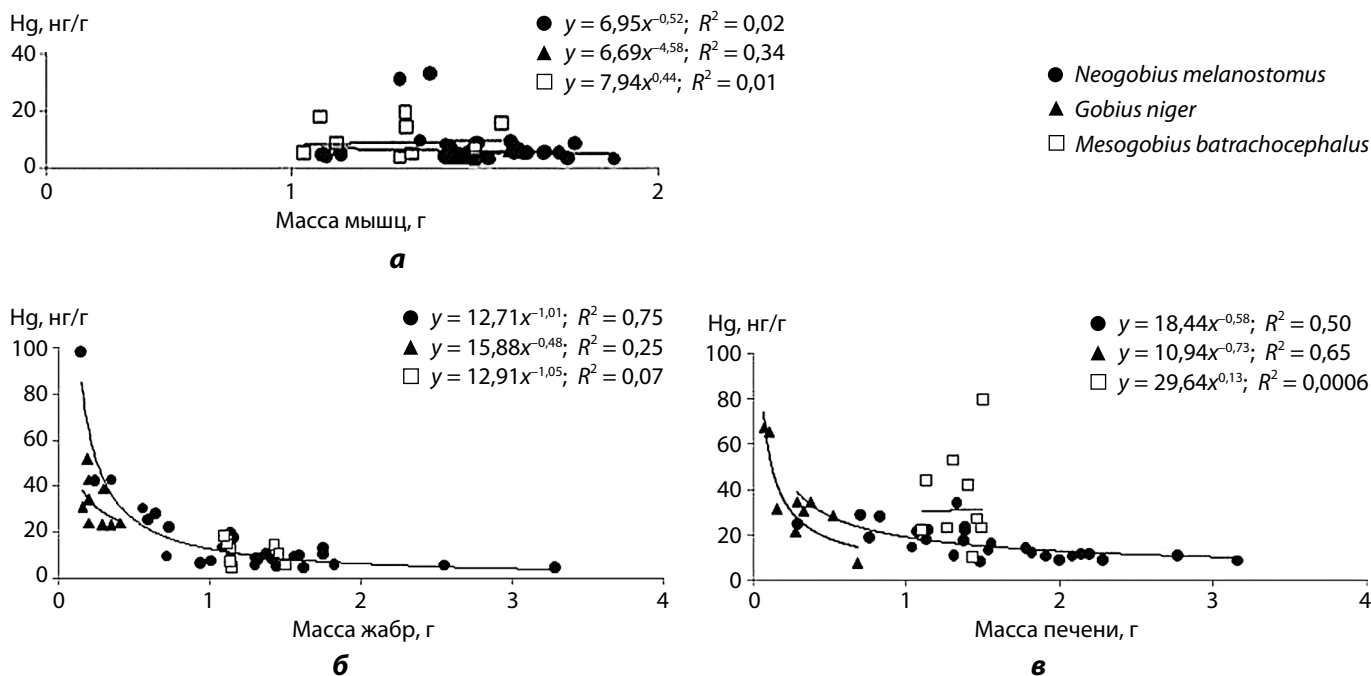


Рис. 3. Зависимость концентраций ртути от массы соответствующих органов: а – в мышцах, б – в жабрах, в – в печени.
Fig. 3. Dependence of mercury concentrations on the weight of the corresponding organs: а – in muscles, б – in gills, в – in the liver.

поведение меняется, вплоть до долгого голодания [25], что также отразилось на разных величинах коэффициентов корреляции. Следовательно, у этого вида основная «нагрузка» приходится на жабры, что свидетельствует о пути поступления токсиканта в организм главным образом посредством дыхания, а не через пищевые цепи. Согласно данным о величинах корреляции накопления ртути в разных тканях, а также данным табл. 2 и 3, у кругляка, напротив, изученный токсикант поступает через пищевые объекты. Двустворчатые моллюски, способные накапливать различные тяжёлые металлы, в его рационе преобладают (см. табл. 3). Кроме того, в отличие от мартовика, в весенне-летний период (нерест) бычок-кругляк (*Neogobius melanostomus*) питается усиленно [25].

Самый широкий пищевой спектр оказался у бычка-черныша (см. табл. 3). Судя по совокупности разных показателей нигера (*Gobius niger*), величины содержания ртути, сопоставимые с другими видами *Gobiidae*, связаны с естественным накоплением токсиканта (с возрастом), частичным попаданием ртути через пищевые цепи, а также постоянным пребыванием этого вида в прибрежной более мелководной зоне, в отличие от мартовика (держится на глубинах до 40–100 м) и кругляка (до 15 м).

Большинство двустворчатых моллюсков являются фильтраторами и обладают способностью накапливать токсичные вещества в высоких концентрациях. В частности, их аккумуля-

рующая способность по отношению к тяжёлым металлам из морской среды выше, чем у других гидробионтов, и они достаточно устойчивы к высоким концентрациям в них таких металлов, как ртуть, свинец, кадмий, медь [26, 27]. Также высокую степень аккумуляции ртути обнаруживают моллюски детритофаги-грунтоеды, являющиеся срединными звеньями детритных трофических цепей. Ракообразные (в особенности представители семейства *Gammaridae*) в целом характеризуются меньшей способностью накапливать в своих тканях токсиканты, особенно в отношении ртути [26, 28]. Таким образом, поступление ртути по пищевой цепи у бычка-кругляка, в рационе питания которого преобладают двустворчатые моллюски, предположительно выше, чем у черныша и мартовика, в большей степени предпочитающих ракообразных (см. табл. 3).

Отсутствие зависимости содержания ртути в органах от массы или длины рыб свидетельствует, что для проанализированных видов рыб ни их размер, ни масса не являются значимыми при накоплении ртути, что может указывать на консервативность в отношении накопления ртути.

Согласно нашему анализу, концентрация ртути в органах рыб разного вида по-разному зависела от массы соответствующих органов (рис. 3). Зависимость концентрации в мышцах от массы мышц показала статистическую недостоверность для *Neogobius melanostomus* и

Mesogobius batrachocephalus. Для *Gobius niger* значение $R^2 = 0,34$. Между концентрацией ртути в жабрах и массой жабр отмечена более тесная связь для *Neogobius melanostomus* с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,75$. Для *Gobius niger* и *Mesogobius batrachocephalus* R^2 был незначительным. Между концентрацией ртути в печени и её массой обнаружен более высокий коэффициент детерминации для *Gobius niger* ($R^2 = 0,65$). Менее значимое значение коэффициента зафиксировано для *Neogobius melanostomus* ($R^2 = 0,50$) и незначительное ($R^2 = 0,0006$) — для *Mesogobius batrachocephalus*.

Заклучение

Несмотря на обнаруженную во всех пробах ртуть, её концентрации не превышали допустимого норматива для морских рыб, установлен-

ного в Российской Федерации [21]. Средние значения концентрации ртути в печени разных видов рыб превышали таковую в жабрах, за исключением вида *Neogobius melanostomus*. Согласно нашим исследованиям, в среднем *Mesogobius batrachocephalus* накапливает ртути больше, чем другие виды *Gobiidae*. Корреляция между возрастом и концентрацией ртути в органах рыб выявлена только у *Mesogobius batrachocephalus*: высокая — в мышцах ($0,7 < r = 0,75$), значительная — в жабрах ($0,5 < r = 0,62$) и печени ($r = 0,50$). Была обнаружена взаимосвязь между стандартной длиной бычка-мартовика и концентрацией ртути: в жабрах — умеренная, в печени — значительная. Несмотря на различия в распределении ртути в тканях черноморских бычков, особей любого вида можно рассматривать как подходящие индикаторы загрязнения ртутью северо-восточных бухт.

ЛИТЕРАТУРА

(пп. 1–4, 6, 8–14, 16, 19, 23, 24 см. в References)

- Болтачев А.Р., Карпова Е.П. *Морские рыбы Крымского полуострова*. Симферополь: Изд-во Бизнес-Информ; 2012.
- Чаплыгин В.А., Ершова Т.С., Зайцев В.Ф. Содержание ртути в мышцах гидробионтов Каспийского моря. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*. 2016; 2: 108–12.
- Кузьмина Н.С., Костова С.К., Плотыцина О.В. Содержание ртути в тканях рыб прибрежного комплекса г. Севастополя в 2005–2007 гг. *Рибне господарство України*. 2009; 2/3(61,62): 29–36.
- Правдин И.Ф. *Руководство по изучению рыб*. М: Изд-во Пищ. Пром.; 1966.
- Определитель фауны Чёрного и Азовского морей*. АН УССР. ИнБИОМ. Киев: Изд-во Наук. думка; 1972, Т. 3.
- Лакин Г.Ф. *Биометрия*. М: Изд-во Высшая школа; 1990.
- СанПиН 2.3.2.1078–01 от 14 ноября 2001 г. № 36. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов; 2001. 269 с.
- Васильков Г.В., Грищенко Л.И., Енгашев В.Г. и др. *Болезни рыб. Справочник*. М: Изд-во Агропромиздат; 1989.
- Световидов А.Н. *Рыбы Чёрного моря*. М: Изд-во Наука; 1964.
- Ким И.Н., Кушнирук А.А., Кращенко В.В. *Безопасность продовольственного сырья и продуктов питания. Морепродукты*. М: Изд-во Юрайт; 2018.
- Ковалова Л.Т. Микроэлементы в морских промысловых объектах Дальнего Востока: автореф. дис. ...д-ра биол. наук: 03.02.08. Ковалова Лидия Тихоновна; ФГУП «ТИНРО-Центр». Владивосток: 2011.
- Чаплыгин В.А. Тяжёлые металлы в кормовых организмах и осетровых (*Acipenser persicus* и *Acipenser gueldenstaedtii*) Каспийского моря в связи с условиями обитания: автореф. дис. ...д-ра биол. наук: 03.02.06. Чаплыгин Владимир Александрович; Астрахань: 2019.
- Küçüksezgin F., Altay O., Uluturhan E., Kontas A. Trace metal and organochlorine residue levels in Red Mullet (*Mullus barbatus*) from the Eastern Aegean, Turkey. *Water Res.* 2001; 35(9): 2327–32. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00504-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00504-2)
- Monteiro D.A., Rantin F.T., Kalinin A.L. Dietary intake of inorganic mercury: bioaccumulation and oxidative stress parameters in the neotropical fish *Hoplias malabaricus*. *Ecotoxicology*; 2013; 22(3): 446–56. <https://doi.org/10.1007/s10646-012-1038-5>
- Aziz F.Z., Zulkifli S.Z., Mohamat-Yusuff F., Azmai M.N., Ismail A. An histological study on mercury-induced gonadal impairment in Javanese medaka (*Oryzias javanicus*). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*; 2017; 17: 621–7.
- Moiseenko T.I., Gashkina N.A. Bioaccumulation of Mercury in Fish as Indicator of Water Pollution. *Geohemistry International*. 2016; 54(6): 495–504. <https://doi.org/10.7868/S0016752516060042>
- Boltachev A.R., Karpova E.P. *Marine fish of Crimea peninsula. [Morskije ryby Krymskogo poluostrova]*. Simferopol: Izd-vo Biznes-Inform; 2012. (in Russian)
- Beldowska M., Falkowska L. Mercury in marine fish, mammals, seabirds, and human hair in the coastal zone of the southern Baltic. *Water Air Soil Pollut.* 2016; 227(52). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2735-5>
- Chaplygin V.A., Ershova T.S., Zajcev V.F. Mercury content in hydrobionts of the Caspian Sea. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Series: Fisheries*. 2016; 2: 108–12. (in Russian)
- Fioramonti N.E., Ribeiro Guevara S., Becker Y.A., Riccialdelli L. Mercury transfer in coastal and oceanic food webs from the Southwest Atlantic Ocean. *Mar. Pollut. Bull.* 2022; 175(113365). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113365>
- Polak-Juszczak L. Distribution of organic and inorganic mercury in the tissues and organs of fish from the southern Baltic Sea. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018; 25: 34181–9. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3336-9>
- Hosseini M., Nabavi S.M.B., Parsa Y., Nabavi S.N. Mercury Accumulation in food chain of fish, crab and sea bird from Arvand River. *J. Marine Sci. Res. Dev.* 2014; 4(148). <https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000148>
- Zhang Y., Soerensen A.L., Scharup A.T., Sunderland E.M. A global model for methylmercury formation and uptake at the base of marine food webs. *Global Biogeochemical Cycles*. 2020; 4(2). <https://doi.org/10.1029/2019GB006348>
- Romero-Romero S., García-Ordiales E., Roqueñi N., Acuña J.L. Increase of mercury and methylmercury levels with depth in a fish assemblage. *Chemosphere*. 2022; 292(133445). ISSN 0045-6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133445>
- Abdolahpur Monikh F., Safahieh A.R., Savari A., Doraghi A. Heavy metal concentration in sediment, benthic, benthopelagic, and pelagic fish species from Musa Estuary (Persian Gulf). *Environ. Monit. Assess.* 2012; 185(1): 215–22. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2545-9>
- Henry F., Amara R., Courcot L., Lacouture D. et al. Heavy metals in four fish species from the French coast of the Eastern English Channel and Southern Bight of the North Sea. *Environ. Int.* 2004; 30(5): 675–83. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.12.007>
- Kuz'minova N.S., Kostova S.K., Plotycyna O.V. Mercury content in tissues of Sevastopol coastal fish in 2005–2007. *Ribne gospodarstvo Ukraini*. 2009; 2/3(61,62): 29–36. (in Russian)
- Stetsiuk A., Kuzminova N., Niemiec M. Distribution of mercury in the liver and gills of the scorpion fish (*Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758) from the Sevastopol bays. *Journal of Elementology*. 2021; 26(2): 507–17. <https://doi.org/10.5601/jelem.2021.26.2.2145>
- Pravdin I.F. *Fish study guide. [Rukovodstvo po izucheniyu ryb]*. Moscow: Izd-vo Pishch. Prom; 1966. (in Russian)
- Qualifier to the fauna of the Black and Azov Seas [Opredelitel' fauny Chyornogo i Azovskogo morej]*. AN USSR. InByuM. K.: Izd-vo Nauk. Dumka. 1972; 3. (in Russian)
- World Register of Marine Species [Electronic resource]. <https://www.marinespecies.org> (accessed 20.09.2022)
- Lakin G.F. *Biometrics [Biometriya]*. Moscow: Izd-vo Vysshaya shkola; 1990. (in Russian)
- SanPiN 2.3.2.1078–01 от 14 noyabrya 2001 g. No. 36. *Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products [Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoj cennosti pishchevyykh produktov]*. 2001. (in Russian)
- Vasil'kov G.V., Grishchenko L.I., Engashev V.G. et al. *Fish diseases [Bolezni ryb]. Spravochnik*. Moscow: Izd-vo Agropromizdat; 1989. (in Russian)
- Sonesten L. Fish mercury levels in lakes — adjusting for Hg and fish-size covariation. *Environmental Pollution*. 2003; 125(2): 255–65. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00051-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00051-4)
- Wiener J.G., Bodaly, R.A., Brown S.S., Lucotte M., et al. Monitoring and evaluating trends in methylmercury accumulation in aquatic biota. *Ecosystem responses to mercury contamination: Indicators of change*. 2007: 87–122. <https://doi.org/10.1201/9780849388897.ch4>

25. Svetovidov A.N. *Black Sea fish [Ryby Chernogo moraya]*. Moscow: Izd-vo Nauka; 1964. (in Russian)
26. Kim I.N., Kushniruk A.A., Krashchenko V.V. *Safety of food materials and food products. Seafood [Bezopasnost' prodovol'stvennogo syr'ya i produktov pitaniya. Moreprodukty]*. Moscow: Izd-vo Yurajt; 2018. (in Russian)
27. Kovekovdova L.T. Trace elements in marine commercial objects of the Far East [Mikroelementy v morskikh promyslovykh ob'ekтах Dal'nego Vostoka]: avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk: 03.02.08. Kovedkova Lidiya Tihonovna; FGUP «TINRO-Centr». Vladivostok: 2011. (in Russian)
28. Chaplygin V.A. Heavy metals in food organisms and sturgeons (*Acipenser peachus* and *Acipenser gueldenstaedtii*) of the Caspian Sea due to habitat conditions [Tyazhelye metally v kormovykh organizmah i osetrovykh (*Acipenser persicus* i *Acipenser gueldenstaedtii*) Kaspijskogo morya v svyazi s usloviyami obitaniya]: avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk: 03.02.06. Chaplygin Vladimir Aleksandrovich. Astrahan'; 2019. (in Russian)

ОБ АВТОРАХ:

Стецюк Александра Петровна (Stetsiuk Aleksandra Petrovna), мл. науч. сотр. ФГБУН «Федеральный исследовательский центр "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского"» Российской академии наук, 299011, г. Севастополь, Российская Федерация. E-mail: alex-ra-777@mail.ru

Кузьминова Наталья Станиславовна (Kuz'minova Natalya Stanislavovna), ст. науч. сотр. ФГБУН «Федеральный исследовательский центр "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского"» Российской академии наук, 299011, г. Севастополь, Российская Федерация. E-mail: kunast@rambler.ru

Витер Татьяна Вадимовна (Viter Tatyana Vadimovna), мл. науч. сотр. ФГБУН «Федеральный исследовательский центр "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского"» Российской академии наук, 299011, г. Севастополь, Российская Федерация. E-mail: viter@rambler.ru

