



УДК 504.5:546.4/.8:[502.211+502.51](262.5)

## ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МЫШЬЯК В ВОДЕ, ДОННЫХ ОСАДКАХ И КАЛКАНЕ (*SCOPHTHALMUS* *MAEOTICUS*, PALL., 1814) В РАЙОНАХ КАВКАЗСКОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ (1995–2020 ГГ.)

© 2022 И. В. Кораблина<sup>1</sup>, Ж. В. Геворкян<sup>1</sup>, Л. Г. Горгола<sup>1,2</sup>, Т. О. Барабашин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),  
Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия

<sup>2</sup>Академия биологии и биотехнологии ЮФУ им. Д.И. Ивановского, Ростов-на-Дону 344090, Россия

E-mail: korablina\_i\_v@azniirkh.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследований загрязнения тяжелыми металлами (медь, цинк, свинец, кадмий, ртуть) и мышьяком воды и донных отложений Кавказского шельфа Черного моря и собственно черноморского калкана *Scophtthalmus maeoticus* (Pallas, 1814) в период с 1995 по 2020 г. В воде и калкане определение Zn, Cu, Pb, As и Cd проводили методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией; ртути во всех элементах экосистемы — методом атомной абсорбции в «холодном паре»; Zn, Cu, Pb и As в донных отложениях — рентгенфлуоресцентным методом. В отдельных пробах воды концентрации цинка, меди и ртути превышали предельно допустимую концентрацию для рыбохозяйственных водоемов, в то время как концентрации свинца и кадмия — нет. Содержание мышьяка в течение всего периода наблюдений оставалось крайне низким. Было отмечено заметное снижение концентраций цинка, свинца и меди в воде шельфа Черного моря в современный период по сравнению с периодом наибольшего загрязнения (1995–2002 гг.). В донных осадках содержание свинца, цинка и ртути в течение ряда лет превышало содержание в земной коре; для мышьяка превышение наблюдалось в течение всего периода наблюдений. Очевидно, что данная ситуация в большей степени связана с особенностями гранулометрического состава дна шельфа, чем с антропогенным влиянием. Показаны различия в биоаккумуляции тяжелых металлов и мышьяка органами черноморского калкана. Из перечня определяемых элементов превышение допустимого уровня в органах калкана отмечалось в отдельные годы в единичных случаях для свинца, ртути и мышьяка.

**Ключевые слова:** Черное море, загрязнение, калкан, тяжелые металлы, мышьяк, накопление

## HEAVY METALS AND ARSENIC IN WATER, BOTTOM SEDIMENTS AND BLACK SEA TURBOT (*SCOPHTHALMUS MAEOTICUS*, PALL., 1814) IN THE CAUCASIAN SHELF AREA IN THE BLACK SEA (1995–2020)

I. V. Korablina<sup>1</sup>, Zh. V. Gevorkyan<sup>1</sup>, L. G. Gorgola<sup>1,2</sup>, T. O. Barabashin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI “VNIRO”), Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”), Rostov-on-Don 344002, Russia  
<sup>2</sup>Southern Federal University, Academy of Biology and Biotechnology named after D.I. Ivanovsky, Rostov-on-Don 344090, Russia  
E-mail: korablina\_i\_v@azniirkh.ru

**Abstract.** The results of investigation of the pollution of the water and bottom sediments of the Caucasian Shelf in the Black Sea by heavy metals (copper, zinc, lead, cadmium, mercury) and arsenic, as well as their content in the Black Sea turbot *Scophthalmus maeoticus* (Pallas, 1814) are presented for 1995–2020. In the water and turbot, the determination of Zn, Cu, Pb, As, and Cd has been conducted using the method of atomic absorption with electrothermal atomization; mercury in all components of the ecosystems was measured using the method of atomic absorption with “cold steam”; in the bottom sediments, the content of Zn, Cu, Pb and As was identified using X-ray fluorescence method. In 1995–2020, in some water samples, the concentrations of zinc, copper and mercury exceeded the maximum permissible level established for the water bodies of fisheries importance, while the lead and cadmium were below it. The arsenic content during the entire observation period was extremely low. A noticeable decrease in the concentrations of zinc, lead and copper in the shelf waters of the Black Sea in the present period as compared with the years of the greatest pollution (1995–2002) was recorded. In the bottom sediments, the content of lead, zinc and mercury exceeded their content in the earth's crust for several years; for arsenic, the excess was recorded throughout the entire observation period. This mostly results from the peculiarities of the granulometric composition of the shelf bottom and, to a much lesser extent, from anthropogenic influence. The differences in the bioaccumulation of heavy metals and arsenic in the organs of the Black Sea turbot are shown. Out of the identified elements, only lead, mercury and arsenic in isolated cases exceeded the permissible level in the organs of the turbot in some years.

**Keywords:** Black Sea, pollution, turbot, heavy metals, arsenic, accumulation

### ВВЕДЕНИЕ

Кавказский шельф — мелководная северо-западная часть Черного моря, представляющая собой пологий подводный склон, протянувшийся не далее чем на несколько километров от береговой линии (до глубин 100–150 м). Такой рельеф дна мало способствует интенсивному обмену водой между глубинами моря и его поверхностью, т. к. поверхность моря относительно объема шельфа оказывается небольшой.

Черноморский калкан *Scophthalmus maeoticus* (Pallas, 1814) относится к донным видам рыб. Он предпочитает песчаные, ракушечные или илистые грунты шельфа и заселяет их до глубин свыше 100 м. Зимой и летом калкан держится на глубине, весной и осенью — переходит на мелководье. В августе мальки появляются в придонном слое на глубинах 2–10 м, где обитают два-три месяца. После этого молодь калкана отходит от бере-

гов. Взрослые особи (4–7 лет) в начале весны концентрируются для нереста на глубинах 30–70 м, в июле–августе — смещаются в сторону больших глубин, а в октябре вновь подходят к берегу для нагула. Калкан — хищник. Взрослый калкан питается главным образом донной рыбой, моллюсками и крабами, молодь — в основном, ракообразными.

Черноморский калкан — ценная промысловая рыба, однако современный неуправляемый промысел серьезно подрывает его запасы. Также на состояние популяции оказывает влияние качество среды обитания. Среди множества загрязняющих веществ опасными (токсичными) для гидробионтов являются тяжелые металлы и мышьяк.

Необходимость определения содержания тяжелых металлов в воде, донных осадках и гидробионтах Кавказского шельфа Черного моря обусловлена высокой техногенной нагрузкой на экосистему. Основные антропогенные источники поступ-

ления тяжелых металлов в экосистему шельфа — промышленные предприятия различного профиля, расположенные в непосредственной близости от уреза воды, и водный транспорт [1]. Так, в 2017 г. в воде Геленджикской и Голубой бухт черноморского шельфа зафиксированы максимальные значения техногенных загрязнений для железа, марганца, свинца и ртути [2], превышающие нормы ПДК. Привлекают внимание экологические последствия геохимических изменений, т. к., в отличие от других загрязняющих веществ, металлы в естественных условиях не разрушаются, а лишь меняют форму нахождения и достаточно медленно покидают биохимический цикл [3], постепенно накапливаясь в различных компонентах экосистемы, в т. ч. и в рыбах [4, 5]. Известно, что в результате естественных процессов сорбции-десорбции уровни накопления химических веществ в донных отложениях, поровых водах и придонном слое воды намного выше, чем в водной толще. В прибрежных и мелководных зонах под влиянием волновой и ветровой деятельности, а также биологического взмучивания моллюсками донные осадки становятся источником вторичного загрязнения вод [6].

Именно способность гидробионтов накапливать в своих органах и тканях загрязняющие вещества из окружающей среды позволяет рассматривать их в качестве биоиндикаторов распространения токсических веществ в водоеме. Даже при относительно низких концентрациях во внешней среде тяжелые металлы биоактивны и способны кумулироваться в рыбах с характерной локализацией в органах и тканях [7, 8]. Повышенные концентрации металлов в жабрах связывают с их участием в обмене химическими элементами между водой и организмом рыб. Среди внутренних органов особое место занимает печень, являющаяся функциональным депо ряда металлов (медь, цинк). Печень содержит в значительном количестве и токсичные металлы (свинец, кадмий, ртуть), что обусловлено ее участием в процессах детоксикации. Распределение тяжелых металлов в сердце, мышцах и скелете индивидуально для различных видов рыб и не подчиняется общей закономерности [4]. Механизм действия тяжелых металлов на организм рыб тесно связан с их включением в различные звенья биохимических процессов. Проникая в организм, тяжелые металлы нарушают проницаемость биологических мембран, связываясь с аминокруппами белков, вызывают угнетение активности ферментов, что

приводит к снижению иммунитета и резистентности организма к стресс-факторам [9]. Под воздействием токсических веществ резко снижаются естественный иммунитет и специфический иммунитет, что может внести значительный вклад в развитие многих инфекционных и инвазионных заболеваний [10, 11].

Изучение микроэлементного состава рыб необходимо для понимания процессов, обеспечивающих нормальное функционирование гидробионтов на различных уровнях трофической цепи и экосистемы в целом. Микроэлементы и тяжелые металлы даже в незначительных концентрациях оказывают отрицательное действие на фито- и зоопланктон, а также накапливаются в донных отложениях, воздействуя на бентосные организмы [12]. Попадая по пищевой цепи в организм рыб, тяжелые металлы аккумулируются в их органах и тканях, тем самым создавая угрозу человеку, употребляющему в пищу рыбные продукты [13].

Безусловно, объективные факты свидетельствуют о существовании влияния факторов среды на биотические процессы экосистемы. Такой фактор среды, как содержание тяжелых металлов, имеет функциональную важность для водных биоресурсов на всех основных этапах их жизненного цикла.

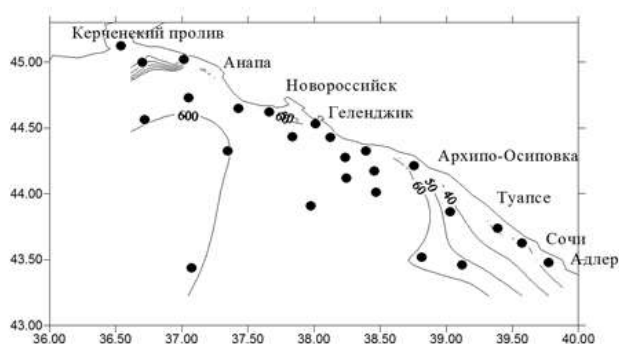
Загрязнение среды обитания носит, как правило, комплексный характер, поэтому оценка ее качества с помощью химических методов обязательно должна сопровождаться данными о состоянии биологических объектов, полученными с применением биоиндикации — определения биологически значимых антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов и их сообществ [14].

Целью настоящего исследования явилась оценка содержания ряда тяжелых металлов и мышьяка в воде и донных отложениях Кавказского шельфа Черного моря и собственно в калкане в период 1995–2020 гг.; также было исследовано влияние загрязнения среды обитания на накопление токсиантов в органах рыб.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная работа основана на обобщении материалов, собранных в ходе экспедиционных наблюдений Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») в северо-восточной части шельфа Черного моря в 1995–2020 гг. Пробы морской воды отбирались дважды

в год (в мае–июне и августе–сентябре) на 25 станциях стандартной сетки наблюдений с поверхностного горизонта (0–0,5 м), слоя термоклина (ТК) и придонного горизонта (на глубоководных станциях — 200 м), а пробы донных отложений — с верхнего 0–2 см слоя (рис. 1), что обеспечило высокую репрезентативность исследования. Параллельно с отбором проб воды и донных отложений отлавливалась рыба по факту ее присутствия.



**Рис. 1.** Карта-схема станций района исследований  
**Fig. 1.** Outline map of the stations in the investigated area

Всего было собрано и обработано более 3000 проб воды и более 600 проб донных отложений, исследовано около 1000 рыб. У калкана анализировались отдельно мышцы, печень, гонады (икра, молоки), усредненные не менее чем от 10 особей с каждой точки вылова.

В воде и калкане определение цинка, меди, свинца, мышьяка, а также кадмия во всех элементах экосистемы проводилось методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией; ртути во всех элементах экосистемы — методом атомной абсорбции в «холодном паре»; цинка, меди, свинца, мышьяка в донных отложениях — рентгенфлуоресцентным методом. Приборное обеспечение исследований — атомно-абсорбционный спектрометр МГА-915 МД («Люмэкс», Россия), анализатор ртути РА-915М (ООО «Люмэкс-маркетинг», Россия), аппарат рентгеновский для спектрального анализа Спектроскан МАКС-GVM (НПО «Спектрон», Россия). Отбор, хранение и транспортировка проб в лаборато-

рию выполнялись в соответствии с требованиями руководящих документов [15–17].

В течение всего периода наблюдений в воде и донных отложениях определялись цинк, медь, свинец, кадмий, ртуть и мышьяк. В 1995–2011 гг. в органах и тканях рыб оценивалось накопление цинка, меди, свинца, кадмия и ртути; в 2012–2020 гг. к ним добавился мышьяк, и была прекращена оценка содержания цинка и меди как наименее опасных для гидробионтов металлов. Диапазоны измерений, как и значения показателей точности, повторяемости, воспроизводимости и правильности, приведены в табл. 1.

При расчете средних величин концентраций исключались данные, не превышающие предел определения (т. е. минимальную концентрацию, погрешность определения которой еще соответствует нормам погрешности по ГОСТ 27384-2002 [18]). Значения СКО рассчитывались для всех объектов анализа отдельно (мышцы, печень, гонады) и для среднеемноголетних показателей за весь период наблюдений, кроме случаев, когда пробы были единичными либо среднее содержание совпало с максимальным или минимальным. Математическая обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel.

При определении показателей загрязнения использовались методики, принятые и утвержденные для мониторинговых природоохранных исследований на федеральном уровне [19, 20]. Количественная оценка содержания тяжелых металлов в воде дана в соответствии с нормативами предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [21]. Безопасность уровней накопления в камбале оценивалась в соответствии с нормативами, действующими на территории Российской Федерации [22, 23] (табл. 2).

Для оценки уровней накопления тяжелых металлов и мышьяка в организме рыб рассчитывались коэффициенты биоаккумуляции (concentration ratio, CR):

$$CR = C_f / C_w, \text{ где}$$

$C_f$  — массовая концентрация элемента в рыбе при естественной влажности, обусловленная всеми путями поступления в организм (вода, корм, донные отложения), мг/кг;

$C_w$  — концентрация элемента в воде водоема, в котором обитает рыба, мг/дм<sup>3</sup>.

**Таблица 1.** Диапазон измерений, значения показателей точности, повторяемости, воспроизводимости и правильности  
**Table 1.** Measuring range and the values of accuracy, repeatability, reproducibility, and trueness

Элемент Element	Диапазон измерений, мг/кг сырой массы Measuring range, mg/kg wet weight	Показатель повторяемости (относительное среднее квадратическое отклонение повторяемости) Repeatability coefficient (relative standard deviation of repeatability) $\sigma_p, \%$	Показатель воспроизводимости (относительное среднее квадратическое отклонение воспроизводимости) Reproducibility coefficient (relative standard deviation of reproducibility) $\sigma_R, \%$	Показатель правильности (границы систематической погрешности при вероятности P=0,95) Trueness coefficient (systematic error bounds at probability P=0.95) $\pm\Delta c, \%$	Показатель точности (границы относительной погрешности при вероятности P=0,95) Accuracy coefficient (relative error bounds at probability P=0.95) $\pm\delta, \%$
1	2	3	4	5	6
Кадмий Cadmium	от 0,005 до 0,10 вкл. from 0.005 to 0.10 inclusive св. 0,10 до 0,20 вкл. over 0.10 to 0.20 inclusive	13 7	19 8	8 4	36 15
Медь Copper	0,10 вкл. 0.10 inclusive св. 0,10 до 0,50 вкл. over 0.10 to 0.50 inclusive св. 0,50 до 10,0 вкл. over 0.50 to 10.0 inclusive	19 12 6	28 19 11	13 9 6	55 36 20
Свинец Lead	от 0,05 до 0,10 вкл. from 0.05 to 0.10 inclusive св. 0,10 до 0,50 вкл. over 0.10 to 0.50 inclusive св. 0,50 до 1,0 вкл. over 0.50 to 1.0 inclusive	15 10 6	25 13 9	12 7 5	50 26 17

Таблица 1 (окончание)  
Table 1 (finished)

1	2	3	4	5	6
Цинк Zinc	от 1,0 до 20,0 вкл. from 1.0 to 20.0 inclusive св. 20,0 до 40,0 вкл. over 20.0 to 40.0 inclusive	7  2	12  6	6  4	26  12
Мышьяк Arsenic	от 0,50 до 1,00 вкл. from 0.50 to 1.00 inclusive св. 1,00 до 2,00 вкл. over 1.00 to 2.00 inclusive	8  4	4  3	21  11	29  16
Ртуть Mercury	от 0,005 до 0,200 вкл. from 0.005 to 0.200 inclusive	9	12	10	26

**Таблица 2.** Допустимые уровни (ДУ) накопления токсикантов в рыбе, мг/кг сырой массы**Table 2.** Permissible levels (PL) of accumulation of toxicants in fish, mg/kg wet weight

Элемент / Element	Объекты исследований / Targets of investigation		
	мышцы muscle	печень liver	икра и молоки eggs and milt
Свинец Lead	1,0	1,0	1,0
Кадмий Cadmium	0,2	0,7	1,0
Мышьяк Arsenic	5,0	не установлено not identified	1,0
Ртуть Mercury	0,5	0,5	0,2

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно усредненным по сезонам и горизонтам отбора проб воды данным, в период наблюдений 1995–2020 гг. среднегодовая концентрация цинка в воде Кавказского шельфа Черного моря варьировала в диапазоне от 2,5 до 20 мкг/л, меди — от 1,0 до 4,7 мкг/л, свинца — от 0,4 до 1,6 мкг/л, кадмия — от 0,20 до 0,59 мкг/л и ртути — от 0,01 до 0,41 мкг/л. Содержание мышьяка в водной толще колебалось на уровне предела определения (2,5 мкг/л). Концентрация ртути превышала норматив примерно в 1/2 проанализированных проб воды (рис. 2), меди и цинка — примерно в 10 % проб, в то время как концентрации свинца и кадмия ни разу не превысили ПДК<sub>р/х</sub>. Наиболее высокие за весь период наблюдений концентрации цинка и ртути отмечались в 1998 г. в районе Новороссийска, свинца — в 2000 г. в районе Сочи, меди и кадмия — в 1995 г. вблизи мыса Железный Рог. Суммарное число случаев превышения ПДК металлов составляло в среднем 7,4 % от общего числа проанализированных проб/год.

В последнее десятилетие отмечено заметное снижение содержания тяжелых металлов в воде северо-восточной части шельфа Черного моря. По сравнению с периодом наблюдений 1995–2002 гг. концентрации цинка и свинца в воде моря снизились в среднем в 1,4 раза, меди — в 1,5 раза, ртути — в 1,6 раза и кадмия — в 1,9 раза; число превышений ПДК<sub>р/х</sub> металлов сократилось до единичных случаев [24]. В целом, в течение всего периода наблюдений уровень загрязненности акватории шельфа отдельными металлами и мышьяком не был высоким.

Важным фактором оценки качества среды обитания водных биоресурсов является распределение концентраций тяжелых металлов по вертикали водной толщи, т. к. для различных видов рыб наиболее комфортными и предпочтительными по физиологическим и кормовым параметрам являются разные глубины. Вертикальное распределение концентраций металлов в толще черноморских вод в 1995–2020 гг. в среднем не отличалось постоянством, но в целом тенденция выглядит следующим образом: содержание меди и ртути практически не зависит от глубины, в то время как содержание цинка, свинца и кадмия, как правило, снижается с увеличением глубины отбора проб (табл. 3).

В донных отложениях (1995–2020 гг.) средняя концентрация цинка варьировала в диапазоне от 32 до 99 мг/кг, меди — от 21 до 36 мг/кг, свинца — от 8,8 до 21 мг/кг, кадмия — от 0,05 до 0,40 мг/кг, мышьяка — от 6,6 до 9,6 мг/кг и ртути — от 0,10 до 0,13 мг/кг сухой массы. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях водоемов российскими нормативными документами не регламентируется; оценка уровня загрязнения проводилась по соответствию среднему содержанию в земной коре [25].

В донных отложениях, отобранных вблизи м. Панагия и по траверзу Большого Сочи, систематически отмечались концентрации цинка до 99 мг/кг (при среднем содержании в земной коре 83 мг/кг), свинца — до 21 мг/кг (при среднем содержании в земной коре 16 мг/кг), ртути — до 0,13 мг/кг (при среднем содержании в земной коре 0,083 мг/кг). Данные факты могут быть обусловлены высокой долей илстой фракции в составе

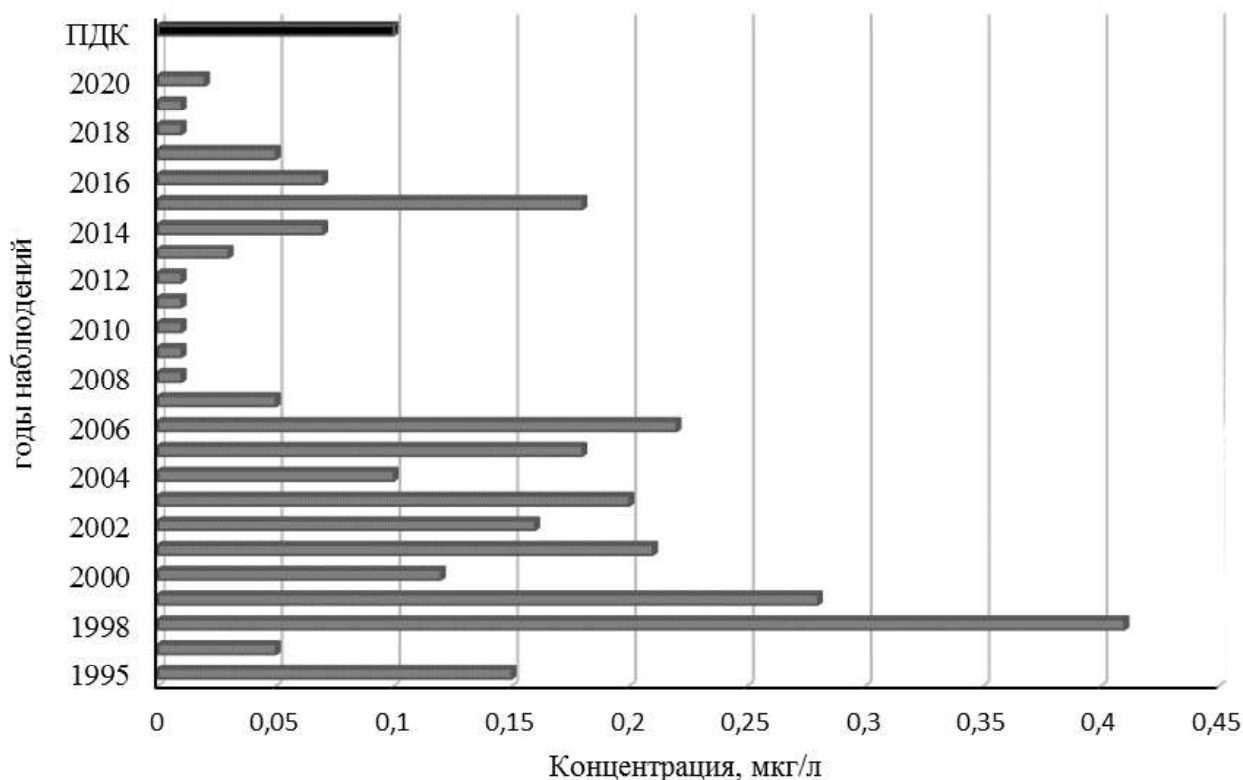


Рис. 2. Усредненное содержание ртути в воде Кавказского шельфа Черного моря, 1995–2018 гг.

Fig. 2. Average mercury content in the water of the Caucasian Shelf of the Black Sea, 1995–2018

Таблица 3. Средние концентрации тяжелых металлов в воде Кавказского шельфа Черного моря, 1995–2020 гг.

Table 3. Average concentrations of heavy metals in the water of the Caucasian Shelf of the Black Sea, 1995–2020

Горизонт / Water layer	Концентрация, мкг/дм <sup>3</sup> / Concentration, µg/dm <sup>3</sup>					
	Zn	Cu	Pb	Cd	Hg	As
Поверхностный Surface	10	2,1	0,80	0,13	0,07	2,5
Промежуточный Intermediate	6,6	1,5	0,74	0,11	0,05	2,5
Придонный Bottom	5,2	1,3	0,71	0,10	0,08	2,5
ПДК <sub>р/х</sub> MPC (for the water bodies of fisheries importance)	50	5	10	10	0,1	10

донных отложений означенных районов (более 70 %). В целом, гранулометрический состав донных отложений шельфа на мелководье — песок, галька, скальные обломки, а на глубине 25–50 м — песок или гравий; свыше 50 м дно укрыто обломками створок мидий и модиол, формирующих фазеолиновый ил шельфа. Наблюдается уве-

личение илистости донных осадков с северо-запада на юго-восток (от Керченского пролива к Адлеру), однако синхронного роста содержания металлов не отмечено. Так, в большинстве проанализированных проб донных отложений шельфа содержание мышьяка в среднем находилось в диапазоне 6,6–9,6 мг/кг (при среднем содержании в земной коре



1,7 мг/кг) (рис. 3). В целом, согласно полученным абсолютным значениям концентраций элементов и с учетом различной адсорбционной способности донных осадков их накапливать, можно считать, что содержание рассматриваемых тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях Кавказского шельфа Черного моря остается стабильным в течение последних 25 лет наблюдений [26].

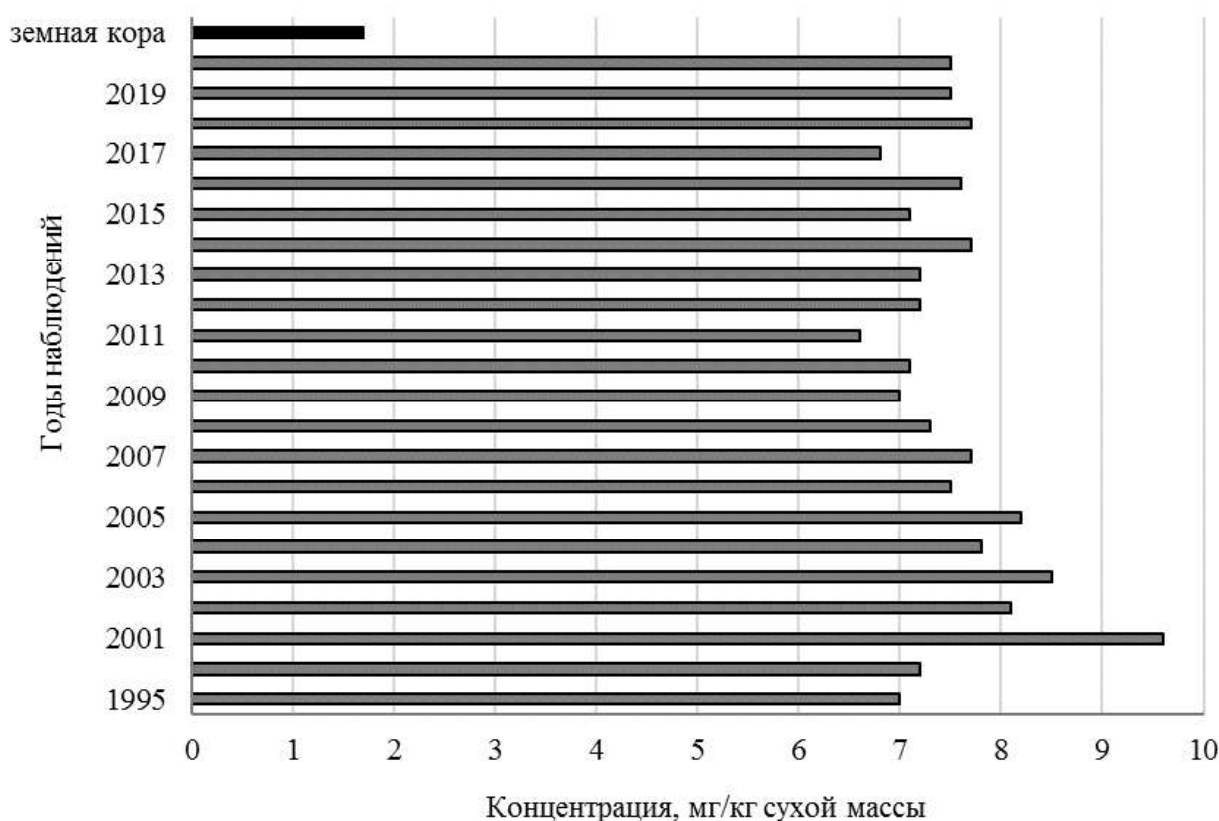
Основными местами нагула калкана на черноморском шельфе являются Керченское предпроливье (м. Панагия, м. Железный Рог), «Анапская банка» и район Большого Сочи. Согласно данным мониторинга Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), суммарный уровень загрязненности тяжелыми металлами воды и донных отложений вышеуказанных акваторий в течение практически всего периода наблюдений, как правило, оказывался повышенным.

В период наблюдений 1995–2020 гг. концентрации цинка в органах и тканях калкана находились в широком диапазоне от 0,76 до 69 мг/кг, составляя в среднем в мышцах 9,7 мг/кг, печени — 16 мг/кг, гонадах — 24 мг/кг сырой массы (табл. 4). Наи-

более высокие уровни накопления цинка отмечены в мышцах и гонадах самок и самцов калкана, выловленных в летние–раннеосенние периоды 1996 и 2004 гг. в «Анапской банке».

В течение всего периода наблюдений уровни содержания цинка в мышцах, печени и гонадах калкана варьировали в узких диапазонах концентраций и существенно отличались лишь в отдельные годы (1996, 2004), что сопоставимо с более высокими концентрациями металла в водной толще. В целом суммарное накопление цинка в органах калкана колебалось в районе физиологической нормы: до 40 мг/кг сырой массы [27]. Тем не менее, на диаграмме многолетних наблюдений достаточно четко отражается тенденция снижения уровней накопления цинка в мышцах ( $R^2=0,11$ ) и гонадах ( $R^2=0,07$ ) и повышения — в печени ( $R^2=0,32$ ) (рис. 4).

Концентрация меди в органах черноморского калкана в 1995–2011 гг. варьировала в диапазоне от 0,12 до 26 мг/кг, составив в мышцах в среднем 0,74 мг/кг, в печени — 5,4 мг/кг, гонадах — 2,3 мг/кг сырой массы (табл. 4). В течение всего периода



**Рис. 3.** Усредненное содержание мышьяка в донных осадках Кавказского шельфа Черного моря, 1995–2020 гг.

**Fig. 3.** Average arsenic content in the bottom sediments of the Caucasian Shelf of the Black Sea, 1995–2020

**Таблица 4.** Диапазон и среднее содержание тяжелых металлов ( $\pm$  СКО) в органах и тканях калкана, выловленного на шельфе Черного моря в 1995–2020 гг., мг/кг сырой массы

**Table 4.** Range and average content of heavy metals ( $\pm$  SD) in organs and tissues of the Black Sea turbot caught at the Black Sea shelf in 1995–2020, mg/kg wet weight

Год, количество особей (n) Year, number of individuals (n)	Объект исследования Target of the investigation	Цинк Zinc	Медь Copper	Свинец Lead	Кадмий Cadmium	Ртуть Mercury	Мышьяк Arsenic
1	2	3	4	5	6	7	8
1995, n=8	мышцы muscle	5,4–9,4 7,4 $\pm$ 1,8	1,6–2,2 1,8 $\pm$ 0,6	0,09–1,3 0,18 $\pm$ 0,06	0,012–0,027 0,020 $\pm$ 0,006	0,050–0,070 0,060 $\pm$ 0,014	– –*
	печень liver	7,2–9,5 8,4 $\pm$ 2,4	3,3–13 8,2 $\pm$ 2,7	<0,05–0,14 0,10 $\pm$ 0,03	0,330–0,620 0,475 $\pm$ 0,085	0,020–0,030 0,025 $\pm$ 0,012	–
	гонады gonads	9,4–27 18 $\pm$ 4,3	1,9–4,8 3,4 $\pm$ 0,9	<0,05–1,7 0,42 $\pm$ 0,17	0,015–0,150 0,083 $\pm$ 0,014	0,130–0,150 0,140 $\pm$ 0,034	–
	мышцы muscle	25–49 35 $\pm$ 9,7	0,18–0,42 0,34 $\pm$ 0,14	0,05–0,08 0,07 $\pm$ 0,02	0,005–0,012 0,009 $\pm$ 0,003	0,050–0,150 0,085 $\pm$ 0,033	–
1996, n=5	печень liver	12–25 20 $\pm$ 7,3	3,0–3,8 3,4 $\pm$ 1,2	<0,05–0,05 0,05	0,035–0,160 0,100 $\pm$ 0,032	0,020–0,033 0,029 $\pm$ 0,012	–
	гонады gonads	34–67 55 $\pm$ 16	2,8–4,0 3,1 $\pm$ 0,9	<0,05–0,05 0,05	0,005–0,011 0,008 $\pm$ 0,002	0,023–0,050 0,028 $\pm$ 0,011	–
	мышцы muscle	2,8–9,0 5,8 $\pm$ 1,3	0,31–0,62 0,55 $\pm$ 0,13	0,05–0,08 0,06 $\pm$ 0,02	0,005–0,012 0,011 $\pm$ 0,003	–	–
	печень liver	12–15 13 $\pm$ 4,1	3,5–5,8 4,8 $\pm$ 1,4	<0,05–0,05 0,05	0,040–0,094 0,086 $\pm$ 0,023	–	–
1997, n=7	гонады gonads	30–38 33 $\pm$ 12	2,8–4,2 3,1 $\pm$ 1,4	<0,05 0,05	0,005	–	–
	мышцы muscle	5,8–7,9 6,8 $\pm$ 2,4	0,47–0,87 0,63 $\pm$ 0,19	0,05–0,08 0,06 $\pm$ 0,02	0,011–0,024 0,016 $\pm$ 0,005	0,070–0,100 0,090 $\pm$ 0,014	–
	печень liver	13–21 17 $\pm$ 5,2	3,2–7,4 5,1 $\pm$ 1,9	<0,05–0,05 0,05	0,086–0,170 0,129 $\pm$ 0,045	0,010	–
	гонады gonads	25–33 26 $\pm$ 8,3	1,4–3,1 2,2 $\pm$ 0,9	0,05–0,12 0,07 $\pm$ 0,02	0,005–0,140 0,027 $\pm$ 0,004	0,010–0,020 0,015 $\pm$ 0,007	–

Таблица 4 (продолжение)  
Table 4 (continued)

1	2	3	4	5	6	7	8
2003, n=6	мышцы muscle	7,6-7,8 7,7±0,04	0,10-0,12 0,11±0,04	<0,05	0,009-0,012 0,010±0,001	<0,005	-
	печень liver	12-16 15±4,4	1,9-2,7 2,3±0,4	0,10-0,22 0,18±0,04	0,050-0,096 0,080±0,027	<0,005-0,005 0,005	-
2004, n=6	гонады gonads	21-25 23±9,0	0,90-1,1 1,0±0,04	<0,05-0,05 0,05	<0,005-0,005 0,005	<0,005-0,005 0,005	-
	мышцы muscle	3,6-7,0 4,3±1,2	0,20-0,29 0,25±0,08	<0,05	<0,005-0,005 0,005	0,005-0,030 0,020±0,004	-
2006, n=5	печень liver	12-19 17±3,1	4,1-7,9 7,2±2,3	<0,05	0,050-0,060 0,052±0,014	0,025-0,045 0,030±0,007	-
	гонады gonads	42-69 64±20	4,0-7,1 5,0±1,9	<0,05-0,05 0,05	0,015-0,020 0,017±0,005	0,015-0,025 0,020±0,006	-
2006, n=5	мышцы muscle	7,4-8,5 8,0±2,3	0,74-1,2 0,97±0,21	<0,05	<0,005-0,005 0,005	0,005-0,030 0,020±0,004	-
	печень liver	8,5-37 23±5,5	15-26 21±6,3	<0,05-0,21 0,12±0,05	0,270-0,350 0,310±0,062	0,020-0,050 0,035±0,008	-
2007, n=8	гонады gonads	25-27 26±11	4,8-6,1 5,5±1,3	<0,05-0,05 0,05	0,011-0,017 0,014±0,004	0,015-0,025 0,020±0,005	-
	мышцы muscle	7,1-12 9,1±2,1	0,35-0,89 0,57±0,29	<0,05-0,05 0,05	0,005-0,022 0,012±0,004	0,060-0,090 0,055±0,013	-
2009, n=10	печень liver	13-32 19±5,0	2,4-4,4 3,2±0,7	<0,05-0,05 0,05	0,036-0,110 0,070±0,025	0,030-0,120 0,087±0,022	-
	гонады gonads	19-21 20±6,4	0,66-1,0 0,83±0,26	<0,05-0,05 0,05	0,005-0,015 0,010±0,003	0,008-0,012 0,010±0,002	-
2009, n=10	мышцы muscle	10-14 12±4,1	0,46-0,75 0,61±0,25	<0,05-0,05 0,05	<0,005-0,005 0,005	-	-
	печень liver	19-20 20±1,0	1,7-3,2 2,5±0,8	<0,05	0,007-0,013 0,010±0,002	-	-
2010, n=16	гонады gonads	18-25 22±8,1	0,75-0,87 0,81±0,32	<0,05	0,005	-	-
	мышцы muscle	5,4-10 7,6±1,6	0,18-0,99 0,43±0,14	<0,05-0,05 0,05	<0,005	-	-

Таблица 4 (продолжение)  
Table 4 (continued)

1	2	3	4	5	6	7	8
2010, n=16	печень liver	16-18 17±2,3	1,1-3,5 1,8±0,4	<0,05-0,05 0,05	0,042-0,110 0,057±0,013	-	-
	гонады gonads	21-36 27±7,2	0,64-1,1 0,86±0,16	<0,05	<0,005-0,008 0,005±0,001	-	-
2011, n=12	мышцы muscle	3,5-9,2 5,9±2,0	0,12-0,36 0,20±0,07	0,05-0,27 0,23±0,04	<0,005	-	-
	печень liver	16-25 19±4,2	0,73-2,3 0,90±0,42	0,05-0,21 0,10±0,03	0,016-0,047 0,038±0,013	-	-
2012, n=21	гонады gonads	20-32 22±7,3	0,55-1,1 0,59±0,15	0,05-0,19 0,07±0,04	<0,005-0,005 0,005	-	-
	мышцы muscle	-	-	<0,05-0,13 0,08±0,02	<0,005-0,079 0,028±0,011	0,009-0,100 0,042±0,009	<0,50-0,50 0,50
2013, n=13	печень liver	-	-	<0,05-0,05 0,05	0,056-0,120 0,087±0,017	0,010-3,0 0,620±0,009	<0,50-0,50 0,50
	гонады gonads	-	-	<0,05-0,14 0,10±0,02	0,007-0,096 0,033±0,006	0,008-0,430 0,239±0,007	<0,50-0,50 0,50
2014, n=5	мышцы muscle	-	-	<0,05-0,09 0,06±0,02	<0,005-0,007 0,006±0,001	0,010-0,029 0,020±0,004	<0,50-0,50 0,50
	печень liver	-	-	<0,05-0,08 0,07±0,02	0,056-0,120 0,087±0,020	0,020-0,080 0,067±0,014	<0,50-0,50 0,50
2015, n=17	гонады gonads	-	-	<0,05-0,05 0,05	<0,005-0,057 0,028±0,008	<0,005-0,040 0,019±0,006	<0,50-0,50 0,50
	мышцы muscle	-	-	<0,05-0,09 0,10±0,04	<0,005-0,007 0,005±0,001	<0,005	<0,50-0,50 0,50
2014, n=5	печень liver	-	-	<0,05	0,009-0,040 0,026±0,007	<0,005	<0,50
	гонады gonads	-	-	<0,05-0,39 0,10±0,04	<0,005-0,006 0,005±0,001	<0,005	<0,50
2015, n=17	мышцы muscle	-	-	<0,05-0,18 0,12±0,03	<0,005-0,007 0,006±0,003	<0,005-0,030 0,023±0,002	<0,50 0,50
	печень liver	-	-	<0,05-0,07 0,06±0,003	<0,005-0,100 0,053±0,012	<0,005-0,272 0,051±0,003	<0,50-3,2 0,58±0,14

Таблица 4 (окончание)  
Table 4 (finished)

1	2	3	4	5	6	7	8
2015, n=17	гонады gonads	-	-	0,06-0,19 0,13±0,04	<0,005-0,006 0,005±0,002	<0,005-0,013 0,007±0,002	<0,50
	мышцы muscle	-	-	<0,05-0,12 0,07±0,02	<0,005-0,007 0,005±0,001	<0,005-0,006 0,005±0,001	<0,50-1,1 0,53±0,23
2016, n=7	печень liver	-	-	<0,05-0,11 0,05±0,02	0,026-0,190 0,084±0,024	<0,00-0,005 0,005	<0,50-7,8 4,0±1,6
	гонады gonads	-	-	<0,05-0,05 0,05	<0,005-0,013 0,008±0,002	<0,005-0,005 0,005	<0,50
2017, n=5	мышцы muscle	-	-	<0,05-0,15 0,07±0,04	<0,005-0,015 0,006±0,001	<0,005-0,036 0,015±0,003	<0,50-0,79 0,50±0,15
	печень liver	-	-	<0,05-0,05 0,05	0,005-0,034 0,014±0,003	<0,005-0,030 0,011±0,002	<0,50-1,5 3,7±1,41
	гонады gonads	-	-	<0,05-0,08 0,05±0,02	0,005-0,300 0,141±0,004	<0,005-0,034 0,014±0,003	1,9-7,8 3,7±0,5
	мышцы muscle	-	-	0,05	0,005-0,006 0,006±0,001	<0,005-0,007 0,006±0,004	<0,50-1,3 0,80±0,20
2018, n=7	печень liver	-	-	0,05	0,017-0,093 0,015±0,005	<0,005 0,005	3,2-1,5 10±2,0
	гонады gonads	-	-	<0,05-0,06 0,06±0,01	0,005-0,008 0,006±0,001	<0,005-0,005 0,005	<0,50-0,50 0,50
2019, n=2	мышцы muscle	-	-	0,05-0,10 0,08±0,02	0,008-0,014 0,011±0,004	<0,005-0,008 0,007±0,001	1,3-1,8 1,6±0,4
	печень liver	-	-	0,48	0,110	<0,005	18
2020, n=2	гонады gonads	-	-	0,05	0,024	<0,005	<0,50
	мышцы muscle	-	-	0,50-0,71 0,61±0,15	0,040-0,059 0,050±0,015	0,009-0,010 0,010±0,001	1,0-8,7 4,9±1,9
	печень liver	-	-	0,48	0,250	<0,005	84
	гонады gonads	-	-	0,28	0,027	0,005	0,72

Примечание: \* — определение не проводилось; < — значение ниже предела обнаружения

Note: \* — identification has not been conducted; < — value below the detection limit

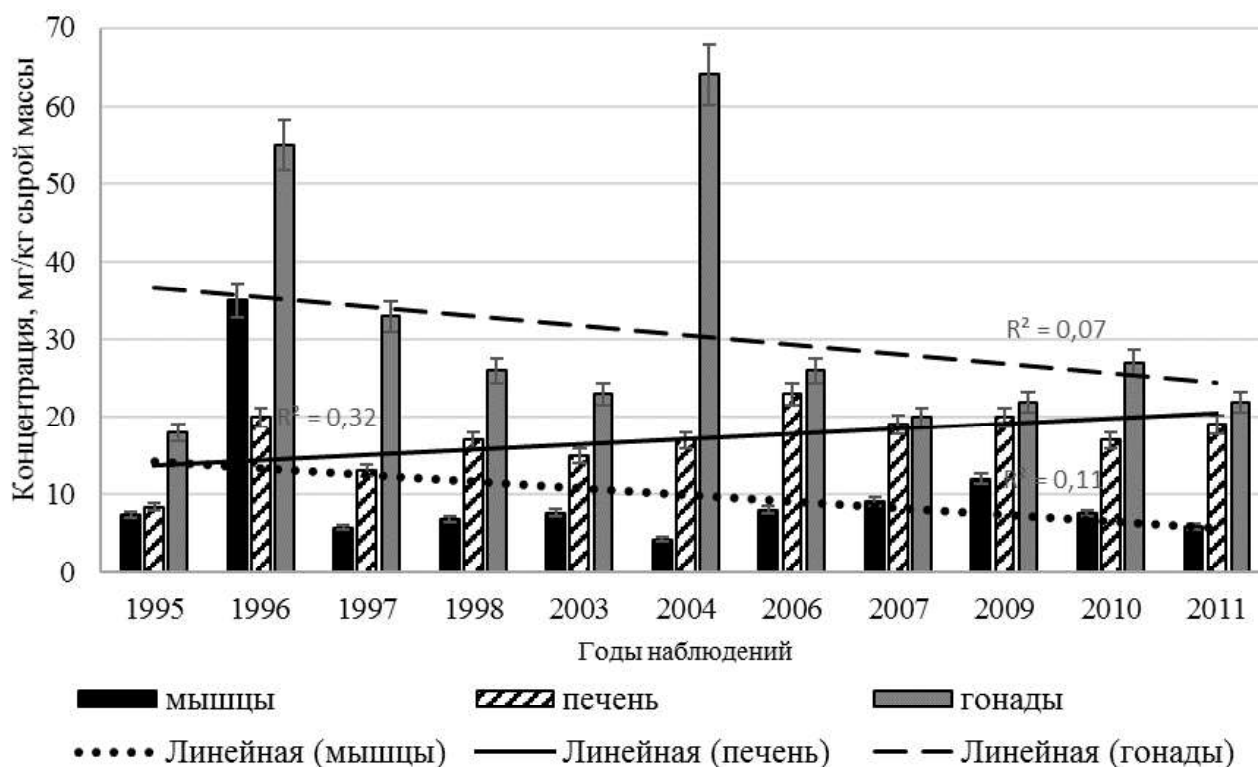


Рис. 4. Накопление цинка в органах черноморского калкана, 1995–2011 гг.

Fig. 4. Accumulation of zinc in the organs of the Black Sea turbot, 1995–2011

наблюдений содержание меди в мышцах было крайне низким. Уровни накопления в печени в целом близки между собой по величине, за исключением максимальных показателей 2006 г. Содержание меди в гонадах калкана в период 1995–2006 гг. в среднем в 3 раза выше, чем в 2006–2011 гг. Общий тренд — снижение уровней накопления в печени и гонадах при минимальной концентрации в мышцах (рис. 5).

Диапазон концентраций свинца в органах черноморского калкана в 1995–2020 гг. составлял  $<0,05$ – $1,7$  мг/кг, находясь в мышцах в среднем на уровне  $0,23$  мг/кг в 1995–2012 гг. и  $0,08$  мг/кг в 2013–2020 гг., в печени —  $0,08$  и  $0,05$  мг/кг, соответственно, в гонадах —  $0,21$  и  $0,07$  мг/кг сырой массы, соответственно. Случаи превышения ДУ зафиксированы только в 1995 г. в мышцах и гонадах калкана, выловленного в весенний–раннелетний период в Керченском предпроливье (табл. 4). В 2020 г. суммарное содержание свинца в мышцах, печени и гонадах составляло около  $1,4$  мг/кг сырой массы, не превысив ДУ для каждого из отдельных органов. В целом, положительные тенденции накопления свинца в мышцах ( $R^2=0,10$ ) и печени ( $R^2=0,18$ ) выражены слабо и практически совпадают (рис. 6).

Концентрации кадмия в органах и тканях камбалы-калкана в 1995–2020 гг. варьировали в диапазоне от  $<0,005$  до  $0,62$  мг/кг, демонстрируя в среднем близкие величины в мышцах и печени ( $0,010$  и  $0,092$  мг/кг), в гонадах —  $0,026$  мг/кг сырой массы (табл. 4). Случаев превышения ДУ кадмия в органах и тканях калкана за весь период наблюдений не отмечено. Наиболее высокое содержание кадмия в печени и гонадах самок и самцов калкана отмечалось в 1995 г. (рыба отловлена в весенний–раннелетний период в «Анапской банке») и в икре в 2006 и 2020 гг. Необходимо отметить, что концентрация кадмия в водной толще в 1995 г. также была наиболее высокой за весь период наблюдений (в среднем  $0,59$  мкг/л). Среднемноголетние тенденции — снижение уровней накопления свинца в печени и гонадах ( $R^2=0,11$  в обоих случаях) при крайне низком постоянном содержании в мышцах (рис. 7).

Диапазон концентраций ртути в годы ее определения в органах калкана составлял  $<0,005$ – $3,0$  мг/кг сырой массы. Содержание ртути в мышцах и гонадах было близким, в среднем  $0,032$  и  $0,038$  мг/кг, в печени — вдвое выше:  $0,071$  мг/кг (табл. 4). Превышения ДУ ртути в печени в 6 раз и в гонадах в

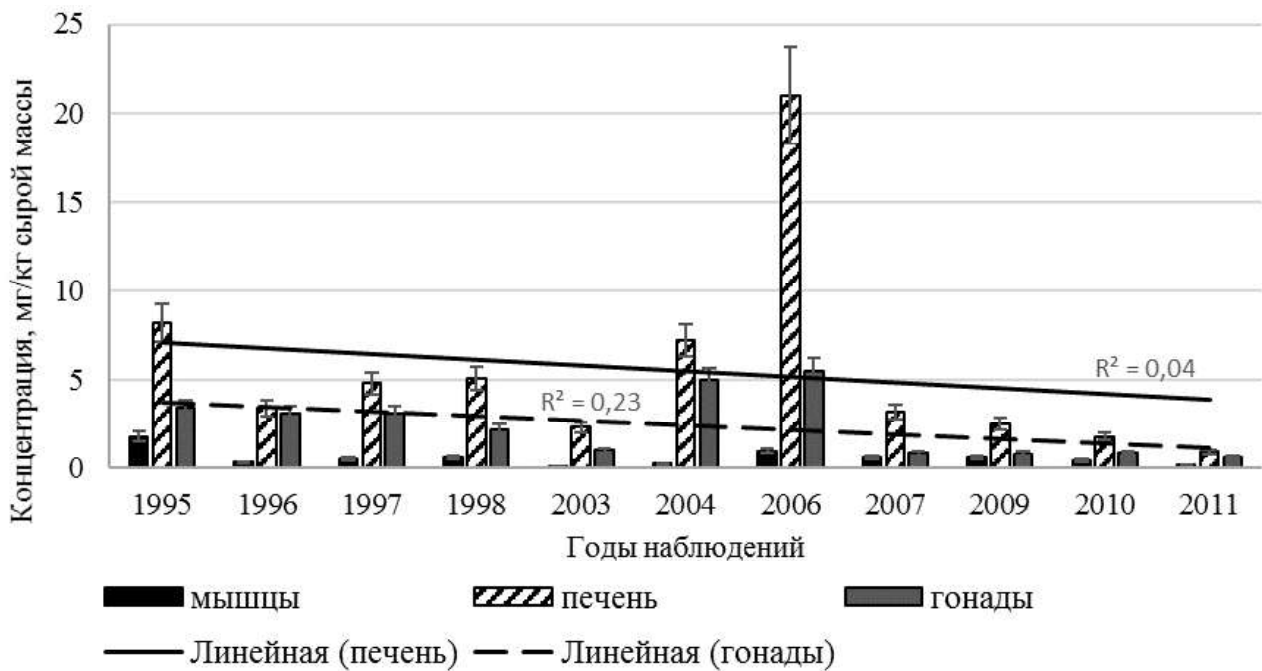


Рис. 5. Накопление меди в органах черноморского калкана, 1995–2011 гг.

Fig. 5. Accumulation of copper in the organs of the Black Sea turbot, 1995–2011

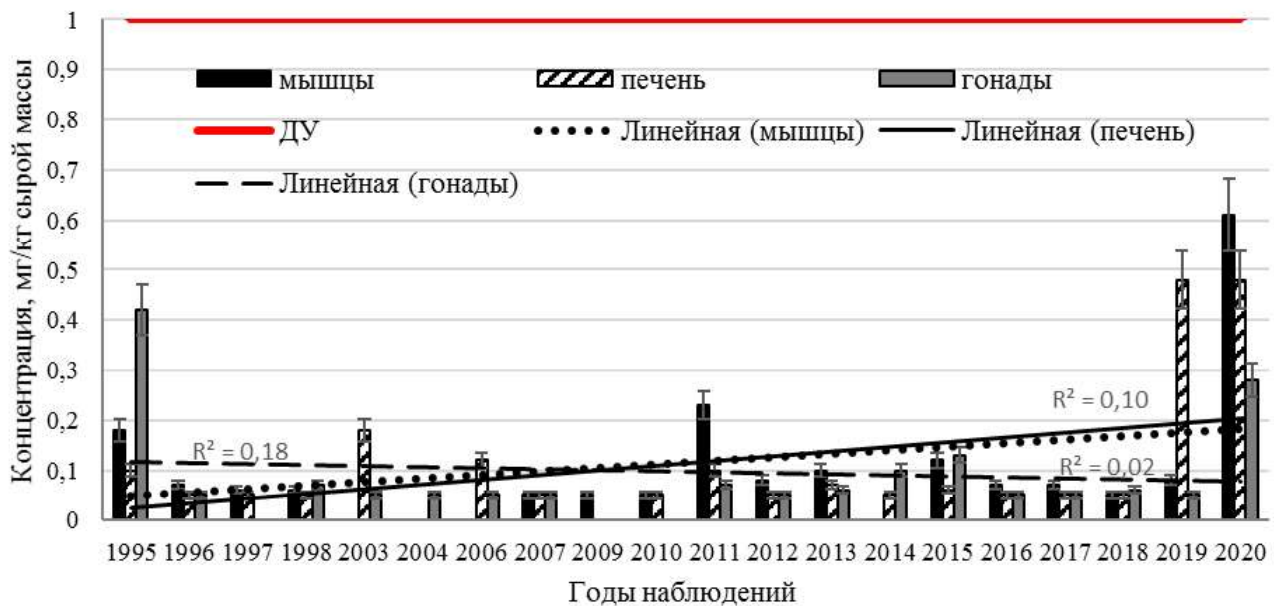


Рис. 6. Накопление свинца в органах черноморского калкана, 1995–2020 гг.

Fig. 6. Accumulation of lead in the organs of the Black Sea turbot, 1995–2011

2,2 раза зафиксированы в единичных случаях у самцов калкана, выловленных в летний–раннеосенний период 2012 г. в «Анапской банке». За исключением 2012 г., накопление ртути в органах черноморского калкана было низким и в основном фиксировалось

в печени. В последние 5 лет наблюдений ртуть в камбале практически отсутствует. В целом прослеживается слабая тенденция увеличения уровня накопления ртути в печени рыб при крайне низких концентрациях в мышцах и гонадах (рис. 8).

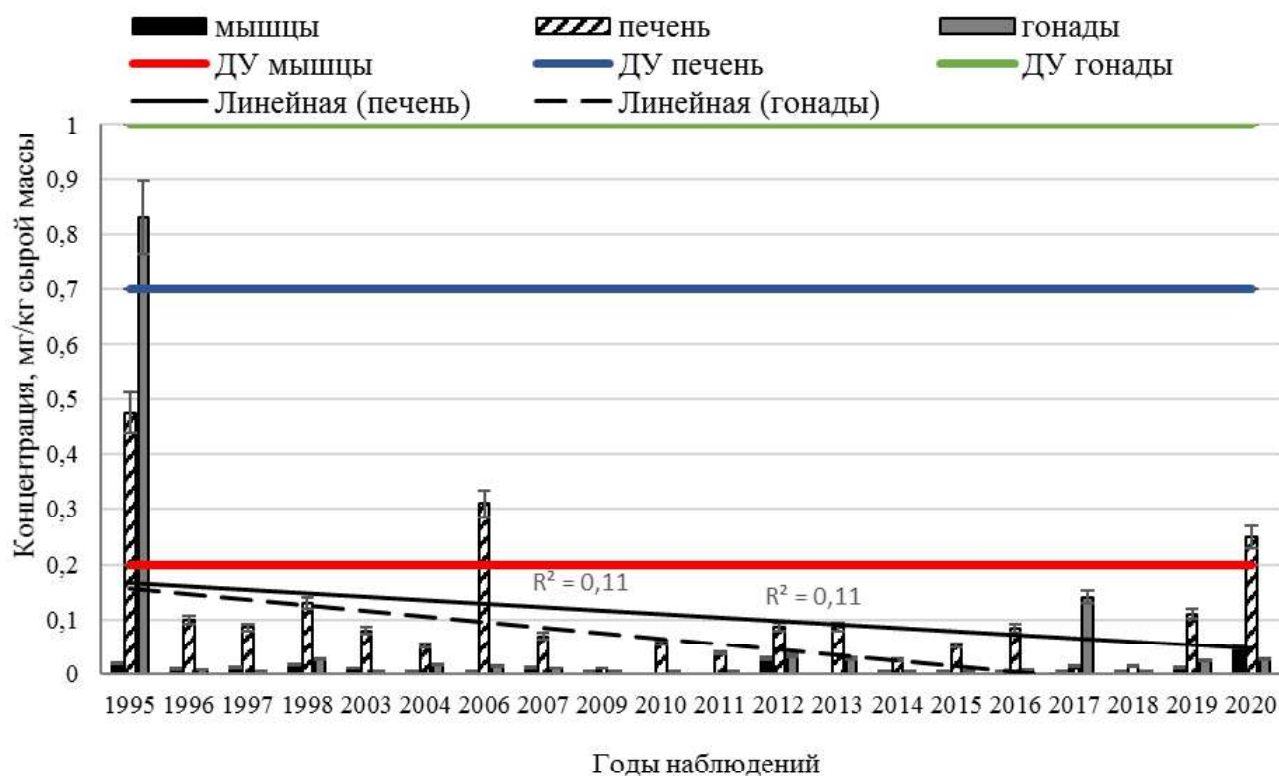


Рис. 7. Накопление кадмия в органах черноморского калкана, 1995–2020 гг.

Fig. 7. Accumulation of cadmium in the organs of the Black Sea turbot, 1995–2020

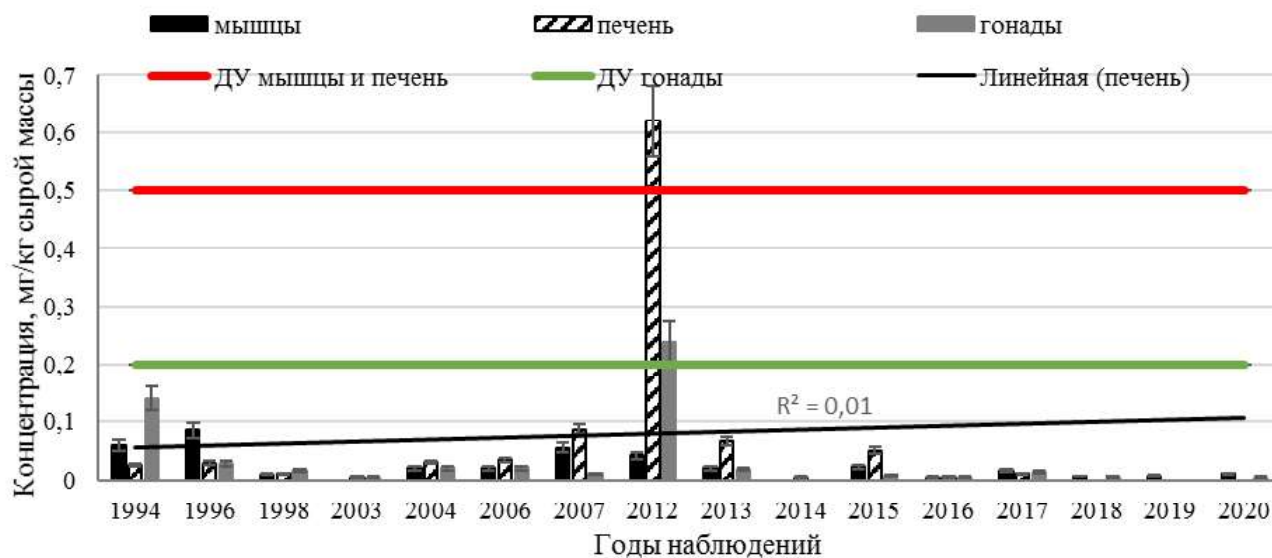


Рис. 8. Накопление ртути в органах черноморского калкана, 1995–2020 гг.

Fig. 8. Accumulation of mercury in the organs of the Black Sea turbot, 1995–2011



Содержание мышьяка в органах черноморского калкана в 2012–2020 гг. находилось в диапазоне  $<0,50\text{--}84$  мг/кг сырой массы (табл. 4). В 2012–2015 гг. концентрация мышьяка в камбале колебалась на уровне предела определения. С 2016 г. фиксируется прирост накопления мышьяка в рыбе — главным образом за счет увеличения содержания в печени (однако в действующих нормативных документах содержание мышьяка в печени не нормируется). В летний–раннеосенний период 2017 г. в единичной пробе икры камбалы-калкана, выловленной в Керченском предпроливье, зафиксировано превышение ДУ мышьяка в 7,8 раза; в летний–раннеосенний периоды 2018 и 2020 гг. — в мышцах самок и самцов в 1,3 и 1,7 раза, соответственно. Видимых причин, приведших к увеличению уровня накопления мышьяка в черноморском калкане, не выявлено. Очевидна тенденция четырех последних лет наблюдений — значительный рост накопления мышьяка в печени ( $R^2=0,48$ ) (рис. 9).

Величина коэффициента накопления конкретного элемента зависит от вида рыб, сезона выло-

ва, массы, характеристик конкретного водоема, включая концентрацию в воде макроионов, и ряда других факторов. Авторами были рассчитаны коэффициенты накопления тяжелых металлов и мышьяка в органах и тканях калкана за период 1995–2022 гг. Наиболее низкие коэффициенты накопления цинка, меди, ртути и кадмия оказались в мышцах, свинца — в печени, мышьяка — в гонадах калкана; наиболее высокие коэффициенты накопления меди, кадмия и мышьяка выявлены в печени, цинка и ртути — в гонадах, свинца — в мышцах рыб. Максимальные коэффициенты биоаккумуляции определены для мышьяка во всех объектах исследования (период вылова калкана — 2018–2020 гг.) (табл. 5).

Несмотря на индивидуальные особенности отдельных особей, в накоплении контролируемых тяжелых металлов и мышьяка, обнаруженных в значимых концентрациях во всех проанализированных образцах черноморского калкана, практически всегда наблюдалась закономерность  $Zn > Cu > As > Pb > Cd > Hg$ .

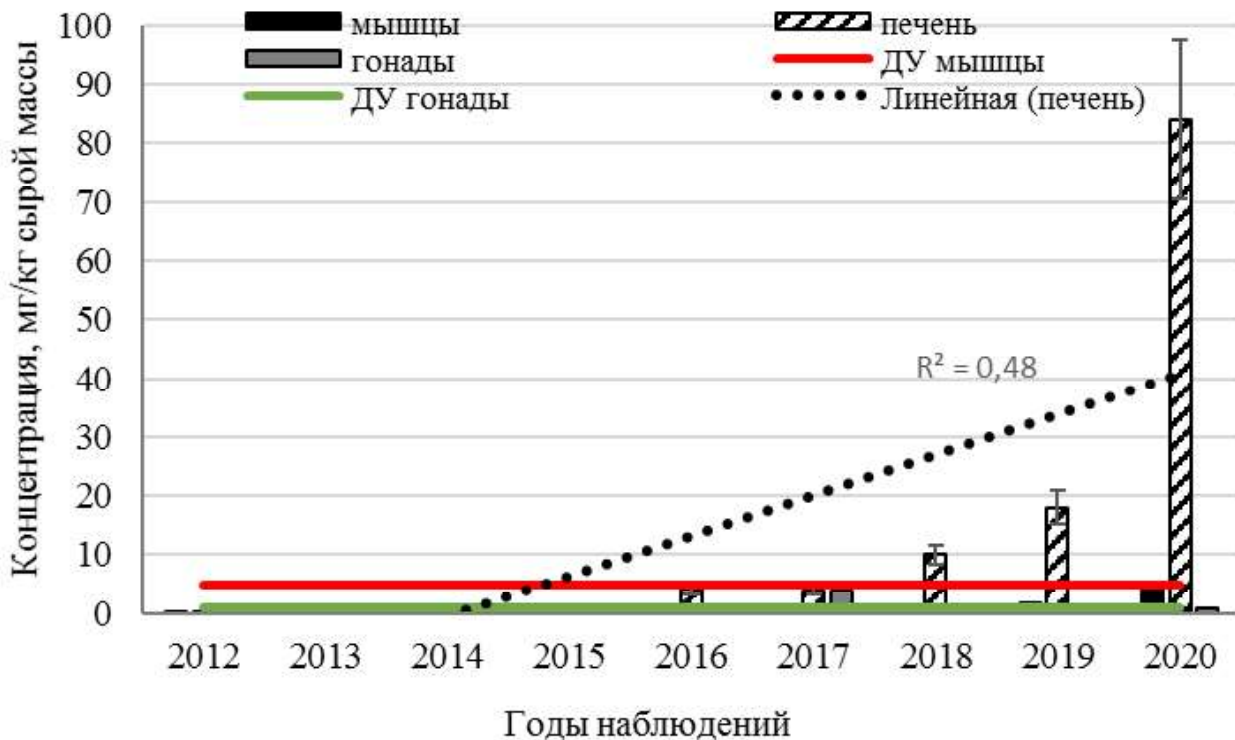


Рис. 9. Накопление мышьяка в органах черноморского калкана, 2012–2020 гг.

Fig. 9. Accumulation of arsenic in the organs of the Black Sea turbot, 2012–2020

**Таблица 5.** Диапазоны коэффициентов накопления тяжелых металлов и мышьяка в органах и тканях калкана, выловленного на шельфе Черного моря в 1995–2020 гг.

**Table 5.** Ranges of accumulation coefficients for heavy metals and arsenic in organs and tissues of the Black Sea turbot caught at the Black Sea shelf in 1995–2020

Объект исследования Target of the investigation	Цинк Zinc	Медь Copper	Свинец Lead	Кадмий Cadmium	Ртуть Mercury	Мышьяк Arsenic
мышцы muscle	20–820	10–130	10–840	10–790	20–450	20–3480
печень liver	40–2640	30–3530	10–160	60–1840	30–600	20–33600
гонады gonads	90–5310	10–3230	10–280	10–960	20–800	20–3120

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивая экологическое состояние черноморского шельфа в 1995–2020 гг., можно заключить, что от начала периода наблюдений к настоящему моменту наблюдается отчетливая тенденция снижения уровня загрязнения водной толщи тяжелыми металлами. Ситуация в донных осадках сохраняется стабильной в течение практически всего периода наблюдений. Однако даже умеренное содержание тяжелых металлов в воде и донных отложениях неизбежно приводит к их накоплению в рыбе, снижая ее хозяйственную и пищевую ценность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Поспелова Н.В., Егоров В.Н., Приймак А.С., Поспелов С.С., Штрунц А.С., Посторонюк К.М., Проскурнин В.Ю. Влияние взвешенного вещества на биогеохимический цикл тяжелых металлов в прибрежной акватории г. Севастополя // Актуальные проблемы изучения Черноморских экосистем — 2020 : тезисы докл. Всерос. онлайн-конф. (г. Севастополь, 19–22 октября 2020 г.). Севастополь: Изд-во Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», 2020. С. 68–69. doi: 10.21072/978-5-6044865-4-2.
- Часовников В.К., Чжу В.П., Очередник О.А. Анализ концентраций загрязняющих веществ (нефтепродуктов, фенолов, СПАВ, ХОП, ПАУ, тяжелых металлов и др.) в водной толще и донных осадках Геленджикской и Голубой бухт // Некоторые результаты комплексной прибрежной экспедиции «Черное море — 2017» / Под ред. А.Г. Зацепина, С.Б. Куклева. М.: Научный мир, 2018. 172 с.
- Лобанова Т.А. Особенности накопления тяжелых металлов промысловыми видами рыб // Вестник Костромского государственного университета. 2008. № 1. С. 18–21.
- Бедрицкая И.Н. Влияние тяжелых металлов на организм рыб, выращиваемых на сбросных водах электростанций : дис. канд. биол. наук. СПб: Изд-во Государственного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства им. Л.С. Берга, 2000. 153 с.
- Евсеева А.И., Кораблина И.В., Геворкян Ж.В., Каталевский Н.И., Горгола Л.Г. Оценка загрязнения воды и донных отложений Кавказского района Черного моря тяжелыми металлами и мышьяком в современный период // Водные ресурсы и среда обитания. 2020. Т. 3, № 3. С. 7–16. doi: 10.47921/2619-1024\_2020\_3\_3\_7.
- Петренко А.А., Кораблина И.В., Каталевский Н.И. Накопление и пространственное распределение тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях прибрежных районов Крымского полуострова в период 2016–2018 гг. // Труды АзНИИРХ. 2019. Т. 2. С. 162–168.
- Перевозников М.А., Богданова Е.А. Тяжелые металлы в пресноводных экосистемах. СПб: Изд-во Государственного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства им. Л.С. Берга, 1999. 228 с.
- Короткова Л.И., Кораблина И.В., Барабашин Т.О. Аккумуляция приоритетных поллютантов в рыбах Азовского моря за последнее десятилетие // Водные ресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 3. С. 20–32. doi: 10.47921/2619-1024\_2019\_2\_3\_20.
- Заботкина Е.А., Лапирова Т.Б. Влияние тяжелых металлов на иммунофизиологический статус рыб // Успехи современной биологии. 2003. Т. 123, № 4. С. 401–408.
- Миронов О.Г., Кирюхина Л.Н., Алемов С.В. Санитарно-биологические аспекты экологии севавтопольских бухт в XX веке. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с.
- Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале

- XXI века / Под ред. О.Г. Миронова, С.В. Алемова. Симферополь: АРИАЛ, 2018. 276 с. doi: 10.21072/978-5-907118-89-8.
12. Самышев Э.З., Золотарев П.Н. Механизмы антропогенного воздействия на бенталь и структуру донных биоценозов северо-западной части Черного моря. Севастополь: Колорит, 2018. 208 с. doi: 10.21072/978-5-6042012-2-0.
  13. Кораблина И.В., Барабашин Т.О., Каталевский Н.И., Евсеева А.И. Тяжелые металлы в органах и тканях промысловых рыб пресноводных объектов Северо-Кавказского региона // Труды ВНИРО. 2019. Т. 177. С. 151–164. doi: 10.36038/2307-3497-2019-177-151-166.
  14. Моисеенко Т.И. Оценка качества вод и «здоровья» экосистем с позиций экологической парадигмы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 3. С. 104–124. doi: 10.35567/1999-4508-2017-3-7.
  15. ГОСТ 31861-2012 Вода. Общие требования к отбору проб. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097520> (дата обращения 01.12.2021).
  16. ГОСТ 17.1.5.01-80 Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность (с Изменением № 1). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012787> (дата обращения 02.12.2021).
  17. ГОСТ 31339-2006 Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Правила приемки и методы отбора проб (с Изменениями № 1, 2). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200049977> (дата обращения 02.12.2021).
  18. ГОСТ 27484-2002 Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030884> (дата обращения 16.02.2022).
  19. Барабашин Т.О., Кораблина И.В., Павленко Л.Ф., Скрыпник Г.В., Короткова Л.И. Методическое обеспечение мониторинга загрязнения водных объектов Азово-Черноморского бассейна // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1, № 3–4. С. 9–27. doi: 10.47921/2619-1024\_2018\_1\_3-4\_9.
  20. Практическое руководство по химическому анализу элементов водных экосистем. Приоритетные токсиканты в воде, донных отложениях, гидробионтах / Под ред. Т.О. Барабашина. Ростов-н/Д.: Мини Тайп, 2018. 436 с.
  21. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (ред. от 10 марта 2020 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120?marker=6520IM> (дата обращения 02.12.2021).
  22. ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции». URL: <http://docs.cntd.ru/document/420394425> (дата обращения 02.12.2021).
  23. ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» (ред. от 14 июля 2021 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902320560> (дата обращения 02.12.2021).
  24. Кораблина И.В., Барабашин Т.О., Геворкян Ж.В., Евсеева А.И. Динамика распределения тяжелых металлов в водной толще северо-восточной части Черного моря после 2000 г. // Труды ВНИРО. 2021. Т. 183. С. 96–112. doi: 10.36038/2307-3497-2021-183-96-112.
  25. Виноградов А.П. Избранные труды. Геохимия океана. М.: Наука, 1989. 220 с.
  26. Korablina I.V., Barabashin T.O., Katalevsky N.I. Heavy metals in the bottom sediments of the Black Sea north-western shelf in recent years // *Physical Oceanography*. 2021. Vol. 28, issue 5. Pp. 549–565. doi: 10.22449/1573-160X-2021-5-549-566.
  27. Егоров В.Н. Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем. Севастополь: Изд-во Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», 2019. 356 с.

## REFERENCES

1. Pospelova N.V., Egorov V.N., Priymak A.S., Pospelov S.S., Shtrunts A.S., Postoronyuk K.M., Proskurnin V.Yu. Vliyaniye vzveshennogo veshchestva na biogeokhimicheskiy tsikl tyazhelykh metallov v pribrezhnoy akvatorii g. Sevastopolya [The effect of suspended matter on the biogeochemical cycle of heavy metals in the coastal waters of the city of Sevastopol]. In: *Aktual'nye problemy izucheniya Chernomorskikh ekosistem — 2020 : tezisy dokladov Vserossiyskoy onlayn-konferentsii (g. Sevastopol', 19–22 oktyabrya 2020 g.)* [Pressing issues of the Black Sea ecosystem research — 2020. Abstracts of the All-Russian Online Conference (Sevastopol, 19–22 October, 2020)]. Sevastopol: Federal'nyy issledovatel'skiy tsentr “Institut biologii yuzhnykh morey im. A.O. Kovalevskogo RAN” [Federal Research Center “A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS”] Publ., 2020, pp. 68–69. doi: 10.21072/978-5-6044865-4-2. (In Russian).
2. Chasovnikov V.K., Chzhu V.P., Ocherednik O.A. Analiz kontsentratsiy zagryaznyayushchikh veshchestv (nefteproduktov, fenolov, SPAV, KhOP, PAU, tyazhelykh metallov i dr.) v vodnoy tolshche i donnykh osadkakh Gelendzhikskoy i Goluboy bukht [Analysis of the concentrations of pollutants (petroleum products, phenols, synthetic surfactants, OCPs, PAHs, heavy metals, etc.) in the water column and bottom sediments of the Gelendzhik and Golubaya Bays]. In: *Nekotorye rezul'taty kompleksnoy pribrezhnoy ekspeditsii “Chernoje more — 2017”* [Some results of the multi-

- disciplinary expedition "Black Sea — 2017"*. A.G. Zatsepina, S.B. Kukleva (Eds.). Moscow: Nauchnyy mir [Scientific World], 2018, 172 p. (In Russian).
- Lobanova T.A. Osobennosti nakopleniya tyazhelykh metallov promyslovymi vidami ryb [Features of the accumulation of heavy metals by commercial fish species]. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Kostroma State University]*, 2008, no. 1, pp. 18–21. (In Russian).
  - Bedritskaya I.N. Vliyanie tyazhelykh metallov na organizm ryb, vyrashchivaemykh na sbrosnykh vodakh elektrostantsiy : dis. kand. biol. nauk [The influence of heavy metals on the organism of fish reared in the waste waters of power plants. Candidate's (Biology) Thesis]. Saint Petersburg: Gosudarstvennyy nauchno-issledovatel'skiy institut ozernogo i rechnogo rybnogo khozyaystva im. L.S. Berga [State Research Institute on Lake and River Fisheries] Publ., 2000, 153 p. (In Russian).
  - Evseeva A.I., Korablina I.V., Gevorkyan Zh.V., Katalevskiy N.I., Gorgola L.G. Otsenka zagryazneniya vody i donnykh otlozheniy Kavkazskogo rayona Chernogo morya tyazhelymi metallami i mysh'yakom v sovremennyy period [Assessment of water and bottom sediment pollution with heavy metals and arsenic in the Caucasus Region of the Black Sea at the present time]. *Vodnye resursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources & Environment]*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 7–16. doi: 10.47921/2619-1024\_2020\_3\_3\_7. (In Russian).
  - Petrenko A.A., Korablina I.V., Katalevskiy N.I. Nakoplenie i prostranstvennoe raspredelenie tyazhelykh metallov i mysh'yaka v donnykh otlozheniyakh pribrezhnykh rayonov Krymskogo poluostrova v period 2016–2018 gg. [Accumulation and spatial distribution of heavy metals and arsenic in bottom sediments of coastal areas of the Crimean Peninsula in 2016–2018]. *Trudy AzNIIRKH [AzNIIRKH Proceedings]*, 2019, vol. 2, pp. 162–168. (In Russian).
  - Perevoznikov M.A., Bogdanova E.A. Tyazhelye metally v presnovodnykh ekosistemakh [Heavy metals in freshwater ecosystems]. Saint Petersburg: Gosudarstvennyy nauchno-issledovatel'skiy institut ozernogo i rechnogo rybnogo khozyaystva im. L.S. Berga [State Research Institute on Lake and River Fisheries] Publ., 1999, 228 p. (In Russian).
  - Korotkova L.I., Korablina I.V., Barabashin T.O. Akkumulyatsiya prioritnykh pollyutantov v rybakh Azovskogo morya za poslednee desyatiletie [Accumulation of priority pollutants in the fish of the Azov Sea over the last decade]. *Vodnye resursy i sreda obitaniya [Aquatic Resources & Environment]*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 20–32. doi: 10.47921/2619-1024\_2019\_2\_3\_20. (In Russian).
  - Zabotkina E.A., Lapirova T.B. Vliyanie tyazhelykh metallov na immunofiziologicheskiy status ryb [Effect of heavy metals on fish immunophysiological status]. *Uspekhi sovremennoy biologii [Advances of Modern Biology]*, 2003, vol. 123, no. 4, pp. 401–408. (In Russian).
  - Mironov O.G., Kiryukhina L.N., Alemov S.V. Sanitarno-biologicheskie aspekty ekologii sevastopol'skikh bukht v XX veke [Sanitary-biological aspects of the Sevastopol bays ecology in XX century]. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika [EKOSI-Hydrophysics], 2003, 185 p. (In Russian).
  - Sanitarno-biologicheskie issledovaniya pribrezhnykh akvatoriy yugo-zapadnogo Kryma v nachale XXI veka [Sanitary and biological studies of the south-western Crimea coastal waters at the beginning of XXI century]. O.G. Mironov, S.V. Alemov (Eds.). Simferopol: ARIAL, 2018, 276 p. doi: 10.21072/978-5-907118-89-8. (In Russian).
  - Samyshev E.Z., Zolotarev P.N. Mekhanizmy antropogennogo vozdeystviya na bental' i strukturu donnykh biotsenozov severo-zapadnoy chasti Chernogo morya [Pattern of anthropogenic impact on benthos and structure of bottom biocenoses in the north-west part of the Black Sea]. Sevastopol: Kolorit [Coloring], 2018, 208 p. doi: 10.21072/978-5-6042012-2-0. (In Russian).
  - Korablina I.V., Barabashin T.O., Katalevskiy N.I., Evseeva A.I. Tyazhelye metally v organakh i tkanyakh promyslovykh ryb presnovodnykh ob'ektov Severo-Kavkazskogo regiona [Heavy metals in the organs and tissues of commercial fishes in the freshwater objects of the North Caucasian Region]. *Trudy VNIRO [VNIRO Proceedings]*, 2019, vol. 177, pp. 151–164. doi: 10.36038/2307-3497-2019-177-151-166. (In Russian).
  - Moiseenko T.I. Otsenka kachestva vod i "zdorov'ya" ekosistem s pozitsiy ekologicheskoy paradigmy [Assessment of water quality and ecosystem health from the ecological paradigm position]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management]*, 2017, no. 3, pp. 104–124. doi: 10.35567/1999-4508-2017-3-7. (In Russian).
  - GOST 31861-2012 Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob [State Standard 31861-2012 Water. General requirements for sampling]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200097520> (accessed 01.12.2021). (In Russian).
  - GOST 17.1.5.01-80 Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozheniy vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagryaznenost' (s Izmeneniyami N 1) [State Standard 17.1.5.01-80 Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis (with Amendment No. 1)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200012787> (accessed 02.12.2021). (In Russian).
  - GOST 31339-2006 Ryba, nerybnye ob'ekty i produktsiya iz nikh. Pravila priemki i metody otbora prob (s Izmeneniyami N 1, 2) [State Standard 31339-

- 2006 Fish, non-fish objects and products of their processing. Acceptance rules and sampling methods (with Amendments No. 1, 2)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200049977> (accessed 02.12.2021). (In Russian).
18. GOST 27484-2002 Voda. Normy pogreshnosti izmereniy pokazateley sostava i svoystv [State Standard 27484-2002 Water. Rates of measurement error of characteristics of composition and properties]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030884> (data obrashcheniya 16.02.2022). (In Russian).
19. Barabashin T.O., Korablina I.V., Pavlenko L.F., Skrypnik G.V., Korotkova L.I. Metodicheskoe obespechenie monitoringa zagryazneniya vodnykh ob"ektov Azovo-Chernomorskogo basseyna [Methodological support of pollution monitoring of the Azov and Black Seas water bodies]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources & Environment]*, 2018, vol. 1, no. 3–4, pp. 9–27. doi: 10.47921/2619-1024\_2018\_1\_3-4\_9. (In Russian).
20. Prakticheskoe rukovodstvo po khimicheskomu analizu elementov vodnykh ekosistem. Prioritetnye toksikanty v vode, donnykh otlozheniyakh, gidrobiontakh [Practice guidelines for chemical analysis of the components of aquatic ecosystems. Priority toxicants in water, bottom sediments, and hydrobionts]. T.O. Barabashin (Ed.). Rostov-on-Don: Mini Tayp [Mini Type], 2018, 436 p. (In Russian).
21. Prikaz Ministerstva sel'skogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 13 dekabrya 2016 g. N 552 "Ob utverzhenii normativov kachestva vodnykh ob"ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob"ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya" (red. ot 10 marta 2020 g.) [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated December 13, 2016 No. 552 "On approval of water quality standards for water bodies used for fishery, including standards on maximal allowable concentrations of hazardous substances in water of water bodies used for fishery" (amended March 10, 2020)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420389120?marker=6520IM> (accessed 02.12.2021). (In Russian).
22. TR EAES 040/2016 "O bezopasnosti ryby i rybnoy produktsii" [Technical Regulation of the Eurasian Economic Union 040/2016 "On safety of fish and fish products"]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420394425> (accessed 02.12.2021). (In Russian).
23. TR TS 021/2011 "O bezopasnosti pishchevoy produktsii" (red. ot 14 iyulya 2021 g.) [Technical Regulation of the Eurasian Customs Union 021/2011 "On safety of food" (amended July 14, 2021)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902320560> (accessed 02.12.2021). (In Russian).
24. Korablina I.V., Barabashin T.O., Gevorkyan Zh.V., Evseeva A.I. Dinamika raspredeleniya tyazhelykh metallov v vodnoy tolshche severo-vostochnoy chasti Chernogo morya posle 2000 g. [The dynamics of the distribution of heavy metals in the water column of the north-eastern part of the Black Sea after 2000]. *Trudy VNIRO [VNIRO Proceedings]*, 2021, vol. 183, pp. 96–112. doi: 10.36038/2307-3497-2021-183-96-112. (In Russian).
25. Vinogradov A.P. Izbrannye trudy. Geokhimiya okeana [Selected works. Ocean geochemistry]. Moscow: Nauka [Science], 1989, 220 p. (In Russian).
26. Korablina I.V., Barabashin T.O., Katalevsky N.I. Heavy metals in the bottom sediments of the Black Sea northwestern shelf in recent years. *Physical Oceanography*, 2021, vol. 28, issue 5, pp. 549–565. doi: 10.22449/1573-160X-2021-5-549-566.
27. Egorov V.N. Teoriya radioizotopnogo i khimicheskogo gomeostaza morskikh ekosistem [Theory of radioisotope and chemical homeostasis of marine ecosystems]. Sevastopol: Federal'nyy issledovatel'skiy tsentr "Institut biologii yuzhnykh morey im. A.O. Kovalevskogo RAN" [Federal Research Center "A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS"] Publ., 2019, 356 p. (In Russian).

Поступила 13.12.2021

Принята к печати 26.02.2022