

© Авторы, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 574.64:574.2

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.380-398>
<https://www.elibrary.ru/xfstga>

Территориальные и видовые особенности накопления микроэлементов в промысловых рыбах Охотского моря

А. А. Шестёра¹, К. Р. Масалева¹, А. В. Литвиненко², М. М. Донец¹, М. А. Беланов¹,
А. Д. Боровкова¹, Н. Д. Василенко¹, А. Г. Болдескул¹, В. Ю. Цыганков¹

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Северо-западная часть Тихого океана обладает уникальными геохимическими условиями, обеспечивающими повышенные уровни аккумуляции микроэлементов в морских организмах региона. Несмотря на расположение здесь основных промысловых зон Российской Федерации, систематического контроля и оценки микроэлементного состава представителей местной ихтиофауны не ведется. В рамках исследования определены Fe, Zn, Cu, Mn, Ni, As, Pb, Cd в органах (мышцы, печень, гонады самцов и самок) минтай тихоокеанского (*Gadus chalcogrammus*), сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*) и камбалы желтоперой (*Limanda aspera*) из разных районов Охотского моря, выловленных в 2023–2024 гг. Концентрации микроэлементов определяли методами индуктивно связанной плазменной оптической эмиссионной спектрометрии и атомно-абсорбционной спектрометрии. В органах преобладали цинк и железо. Печень содержала наибольшие концентрации железа, цинка, меди, марганца и кадмия. Мышьяк и свинец накапливались преимущественно в мышцах. Наиболее высокие концентрации железа, меди, никеля и мышьяка отмечены для камбалы желтоперой, что является следствием ее придонного образа жизни. В мышцах сельди тихоокеанской зафиксировано пониженное содержание цинка и марганца. Минтай отличался повышенными концентрациями кадмия. Показано, что микроэлементный профиль рыб Охотского моря является интегральным показателем, отражающим сложное взаимодействие спектра факторов: биохимических свойств конкретных элементов, геохимических особенностей среды обитания, образа жизни, состава рациона и др.

Ключевые слова: микроэлементы, атомная абсорбция, эмиссионная спектрометрия, минтай, тихоокеанская сельдь, желтоперая камбала, органы, Охотское море

Spatial and species-specific features of trace element accumulation in commercial fish of the Sea of Okhotsk

Andrey A. Shestera¹, Kristina R. Masaleva¹, Anna V. Litvinenko², Maksim M. Donets¹,
Maksim A. Belanov¹, Aleksandra D. Borovkova¹, Nikita D. Vasilenko¹,
Anna G. Boldeskul¹, Vasiliy Yu. Tsygankov¹

¹ Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

² Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The northwestern Pacific Ocean is characterized by unique geochemical conditions that promote elevated trace element accumulation in marine organisms of the region. Despite the location of major fishing grounds of the Russian Federation, in this area systematic monitoring and assessment of the trace element composition in the local ichthyofauna have not been conducted. This study quantified Fe, Zn, Cu, Mn, Ni, As, Pb, and Cd concentrations in the organs (muscles, liver, and male and female gonads) of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*), pacific her-

ring (*Clupea pallasii*), and yellowfin sole (*Limanda aspera*) collected from various areas of the Sea of Okhotsk in 2023–2024. Trace element concentrations were determined using inductively coupled plasma optical emission spectrometry and atomic absorption spectrometry. Zinc and iron were predominant in the organs. The liver contained the highest concentrations of iron, zinc, copper, manganese, and cadmium. Arsenic and lead accumulated predominantly in muscles. Yellowfin sole exhibited the highest levels of iron, copper, nickel, and arsenic, which stems from its demersal lifestyle. Pacific herring muscles showed comparatively lower concentrations of zinc and manganese. Walleye pollock had elevated concentrations of cadmium. It was shown that the trace element profile of fish from the Sea of Okhotsk is an integral indicator reflecting the complex interaction of multiple factors, including the biochemical properties of specific elements, geochemical features of the habitat, lifestyle, dietary composition, and other factors.

Keywords: trace elements, atomic absorption, emission spectrometry, walleye pollock, pacific herring, yellowfin sole, organs, Sea of Okhotsk

Финансирование и благодарности

Работа проведена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-74-10032).

Авторы благодарят уважаемых рецензентов за внимание к данной работе и конструктивные замечания.

Funding and Acknowledgements

The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 23-74-10032).

The authors thank the respected reviewers for their attention to this paper and constructive comments.

Для цитирования: Шестёра А.А., Масалева К.Р., Литвиненко А.В., Донец М.М., Беланов М.А., Боровкова А.Д., Василенко Н.Д., Болдескул А.Г., Цыганков В.Ю. Территориальные и видовые особенности накопления микроэлементов в промысловых рыбах Охотского моря. *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 380–398. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.380-398>; <https://www.elibrary.ru/xfstga>

For citation: Shestera A.A., Masaleva K.R., Litvinenko A.V., Donets M.M., Belanov M.A., Borovkova A.D., Vasilenko N.D., Boldeskul A.G., Tsygankov V.Yu. Spatial and species-specific features of trace element accumulation in commercial fish of the Sea of Okhotsk. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 380–398. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.380-398>; <https://www.elibrary.ru/xfstga>

Введение

Северо-западная часть Тихого океана в целом, и Охотское море, в частности – уникальная геохимическая зона. За счет подводного и надводного вулканизма и мощных апвеллингов местные морские экосистемы характеризуются повышенным содержанием биогенных и других элементов [1]. Этот фактор является основой высокой биопродуктивности Охотского моря и определяет промысловую значимость этой зоны. На него приходится около 40 % от общей добычи водных биологических ресурсов России.

Наиболее массовой промысловой рыбой здесь является минтай тихоокеанский (*Gadus chalcogrammus* Pallas, 1814). Это придонно-пелагический вид, доля которого в общей ры-

бодобыче России составила 49 % по данным статистики вылова за 2025 год*. на 2-3-м месте по массе годового вылова в рамках Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна располагается сельдь тихоокеанская (*Clupea pallasii* Valenciennes, 1847), стайная рыба, обитающая исключительно в пелагиали [2]. К придонным видам относится камбала желтоперая (*Limanda aspera* Pallas, 1814), представитель многочисленного сообщества камбалообразных, населяющих шельфовую зону дальневосточных морей. Этот вид также имеет промысловое значение, однако уровень его добычи существенно ниже [3].

Микроэлементный состав морских организмов тесно связан с их биохимическими потребностями, которые в свою очередь зависят от видовой принадлежности и физиологиче-

* Сведения об улове рыбы и добыче других водных биоресурсов за январь–декабрь 2025 года. Федеральное агентство по рыболовству, 2026, 143 с. URL: https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/2026/04/1p_01-12_2025.pdf (дата обращения 21.05.2026). [Data on the catch of fish and extraction of other aquatic bioresources for January–December 2025. Federal Agency for Fisheries, 2026, 143 p. URL: https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/2026/04/1p_01-12_2025.pdf (accessed 21.05.2026). (In Russ.)]

ских характеристик. Также уровни содержания элементов зависят от состава пищи гидробионтов и особенностей среды обитания. Особое влияние на аккумуляцию микроэлементов в Охотском море оказывают региональные геохимические условия [4, 5]. Антропогенные источники способны изменять соотношение химических элементов в водной среде, что в свою очередь может привести к изменению состава морских организмов.

Рыбы обладают выраженной способностью накапливать эссенциальные и токсичные элементы, давая тем самым интегральное отражение всех условий, способных влиять на уровни их содержания в гидробионтах [6]. Общие закономерности биоаккумуляции микроэлементов у морских рыб, органоспецифичность распределения и влияние образа жизни на их аккумуляцию, описаны достаточно полно [4, 7]. Ранее накоплено много данных об элементном составе промысловой ихтиофауны дальневосточных морей [8–11]. Современные исследования микроэлементного состава промысловых гидробионтов Охотского моря

сфокусированы преимущественно на исследовании тихоокеанских лососей [1, 12–14]. Данные о накоплении эссенциальных и токсичных элементов в органах других промысловых рыб, а также о влияющих на это факторах остаются фрагментарными и требуют дальнейшего изучения. Таким образом, цель исследования – определить концентрации микроэлементов в органах минтая (*Gadus chalcogrammus*), тихоокеанской сельди (*Clupea pallasii*) и желтоперой камбалы (*Limanda aspera*) из Охотского моря и выявить закономерности их накопления.

Материалы и методы

Образцы рыб отбирали в различных районах Охотского моря (рис. 1). Особей минтая (*Gadus chalcogrammus*) вылавливали в северо-западной части Амурского лимана в октябрь-ноябре 2023 г., сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*) – в заливе Терпения в ноябре того же года, камбалы желтоперой (*Limanda aspera*) – в юго-западной части залива Анива в мае 2024 г. После вылова рыб замораживали при -20°C

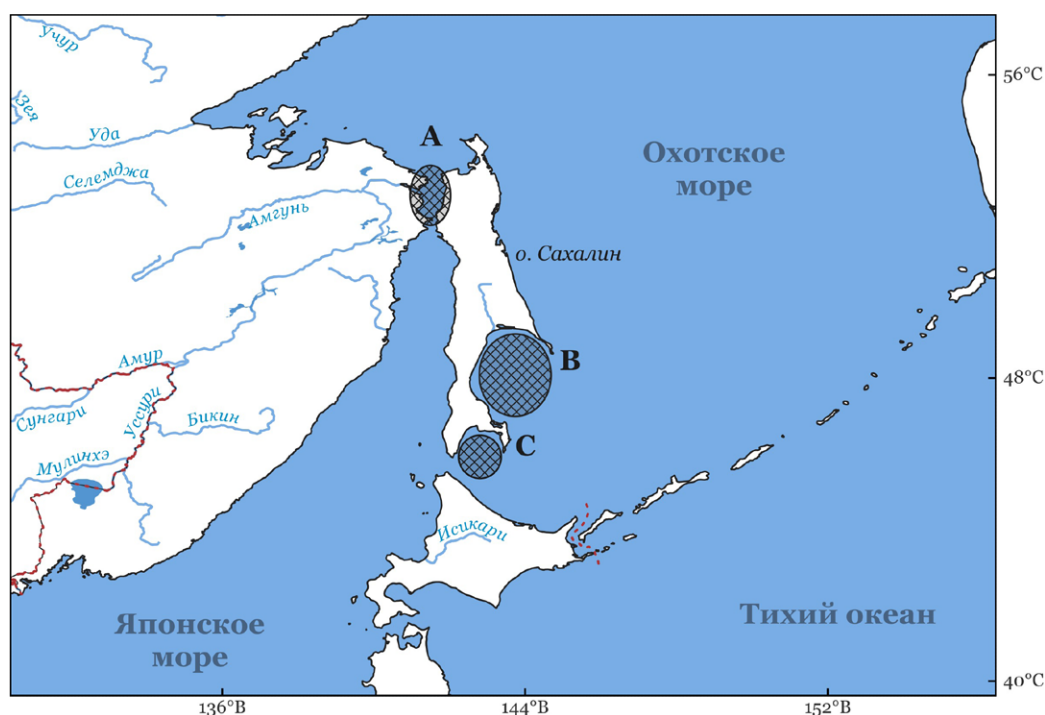


Рис. 1. Карта-схема отбора образцов: А – минтай тихоокеанский (*Gadus chalcogrammus*), В – сельдь тихоокеанская (*Clupea pallasii*), С – камбала желтоперая (*Limanda aspera*).

Fig. 1. Map of sampling: A, walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*); B, pacific herring (*Clupea pallasii*); C, yellowfin sole (*Limanda aspera*).

и транспортировали в лабораторию. Анализировались мышцы, печень, гонады самцов (семенники) и икра (гонады самок).

Перед проведением элементного анализа образцы высушивали под током воздуха при 30–32 °С в течение 168 часов до постоянной массы. Определение элементов проводили в кислотных минерализатах проб органов. Высушенный биологический материал измельчали, навески массой 0.5 г помещали в тефлоновые реакционные сосуды и добавляли по 10 мл особо чистой HNO_3 . Кислотное разложение проб осуществляли методом микроволновой минерализации с использованием системы MARS-5 [15, 16]. Полученные минерализаты выпаривали до состояния «влажных солей» [17], остаток перерастворяли в 2 % растворе HNO_3 , доводили до 10 мл и переносили в полипропиленовые пробирки для дальнейшего анализа.

Анализ образцов на содержание всех элементов проводился в ЦКП ЦЛЭДГИС ТИГ ДВО РАН. Концентрации мышьяка (As), меди (Cu), железа (Fe), марганца (Mn) и цинка (Zn) в минерализатах определяли методом индуктивно связанной плазменной оптической эмиссионной спектроскопии (ИСП-ОЭС) на приборе Plasma 3000. Содержание свинца (Pb) и кадмия (Cd) измеряли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с электротермической атомизацией на спектрометре Shimadzu AA-7000. Концентрации никеля (Ni) определяли методом ААС с пламенной атомизацией на том же приборе.

Точность определения содержания элементов, а также возможное загрязнение образцов на стадиях подготовки и анализа контролировали путем регулярного измерения калибровочных растворов, включая холостые. Для проверки правильности результатов и оценки степени восстановления элементов проводили анализ сертифицированного референтного материала рыбных мышц ERM-BB422. Полученные значения находились в пределах, соответствующих паспортным значениям референтного материала.

Концентрации элементов выражали в мг/кг сухой массы. Полученные результаты были об-

работаны с использованием программной среды для статистических вычислений и визуализации R от CRAN (версия 2026.01.2+418). Для оценки нормальности распределения использован критерий Шапиро-Уилка. Достоверность различий определялась U-тестом Манна-Уитни или t-тестом Стьюдента (в зависимости от нормальности распределения обеих выборок), при принятом уровне статистической значимости $p \leq 0.05$. Часть исследованных выборок по органам отдельных видов (46 %) показали ненормальное распределение, имели объем $n \leq 2$ или большое число концентраций ниже предела обнаружения. Последние не учитывались в статистической обработке. В связи с этими фактами результаты представлены в виде диапазонов концентраций (min–max) и медианных значений (Me).

Результаты и обсуждение

Элементный состав органов минтая (*Gadus chalcogrammus*). Результаты определения массового содержания микроэлементов во всех исследуемых образцах приведены в таблице 1.

В мышцах наибольшее содержание среди исследованных элементов характерно для эссенциальных металлов – железа и цинка, что отражает их биологическую активность в организме [14]. Медь, марганец и никель, также являющиеся важными биоэлементами, обнаружены в концентрациях на 1–2 порядка меньше. С сопоставимыми или даже более высокими уровнями обнаружена тройка токсичных элементов – мышьяка, свинца и кадмия. Наибольшие концентрации характерны для As, что сопоставимо с ранее опубликованными результатами других исследований [9, 10].

В печени также преобладали железо и цинк, за ними следовали медь и марганец. Никель обнаруживался в концентрациях на порядок меньше. Мышьяк, свинец и кадмий были обнаружены в концентрациях 3.40–10.82, 0.17–0.82 и 0.84–7.71 мг/кг сух. мас. соответственно.

В икре зафиксировано преобладание цинка (198.64–546.74 мг/кг сух. мас.) над прочи-

ми элементами. Железа обнаружено в 2–3 раза меньше. Медь, марганец и никель зафиксированы в концентрациях 8.78–45.52, 1.30–1.99 и 0.45–0.99 мг/кг сух. мас. соответственно.

Среди тройки токсичных элементов содержание мышьяка было в несколько раз выше, чем у свинца и кадмия. Гонады самцов отличались наиболее низкими уровнями элементов

Таблица 1. Содержание микроэлементов (min–max (**медиана**)) в минтае, тихоокеанской сельди и желтоперой камбале из Охотского моря, мг/кг сухой массы

Table 1. Microelement concentrations (min–max (**median**)) in the walleye pollock, pacific herring, and yellowfin sole from the Sea of Okhotsk, mg/kg dry weight

Вид	Орган	Cu	Fe	Zn	Mn	Ni	As	Pb	Cd
Минтай (<i>Gadus chalcogrammus</i>)	Мышцы (n = 10)	2.03- 7.13 (3.60)	11.12- 46.83 (23.14)	31.69- 61.66 (40.03)	1.11- 3.25 (2.10)	0.20- 0.41 (0.28)	8.25- 19.19 (12.49)	2.09- 7.72 (4.61)	0.05- 0.42 (0.11)
	Печень (n = 9)	4.82- 47.87 (12.32)	28.21- 385.47 (127.50)	22.46- 140.44 (72.06)	0.54- 4.70 (2.81)	0.10- 1.25 (0.31)	3.40- 10.82 (6.36)	0.17- 0.82 (0.61)	0.84- 7.71 (2.66)
	Гонады самцов (n = 2)	1.17- 4.08 (2.62)	12.66- 32.31 (22.48)	38.09- 64.23 (51.16)	0.27- 0.51 (0.39)	0.21- 0.26 (0.23)	0.75- 2.54 (1.65)	0.04- 0.49 (0.27)	0.15- 0.22 (0.19)
	Икра (n = 8)	8.78- 45.52 (14.77)	74.75- 205.86 (110.92)	198.64- 546.74 (326.73)	1.30- 1.99 (1.48)	0.45- 0.99 (0.82)	5.25- 13.95 (9.28)	0.66- 3.57 (1.82)	0.54- 3.69 (1.16)
Тихоокеанская сельдь (<i>Clupea pallasii</i>)	Мышцы (n = 10)	1.21- 3.87 (2.22)	16.00- 59.80 (37.25)	9.88- 32.50 (15.01)	0.59- 1.59 (0.78)	< ПО- 0.29	2.05- 4.75 (3.65)	0.23- 1.45 (0.58)	0.02- 0.08 (0.05)
	Печень (n = 10)	2.05- 31.11 (4.99)	93.29- 2679.04 (349.13)	16.98- 498.45 (89.79)	0.67- 18.24 (3.11)	< ПО- 0.21	0.99- 10.08 (2.69)	0.02- 0.69 (0.17)	1.27- 13.16 (2.41)
	Гонады самцов (n = 4)	3.55- 5.23 (3.94)	53.73- 66.80 (59.94)	26.27- 48.15 (36.08)	0.46- 0.67 (0.57)	< ПО	1.10- 1.93 (1.37)	7.27- 9.18 (8.27)	0.08- 0.12 (0.09)
	Икра (n = 5)	2.60- 4.13 (3.25)	71.56- 132.05 (79.66)	58.74- 74.08 (64.28)	2.57- 4.15 (2.92)	0.23- 0.34 (0.28)	0.60- 1.26 (0.69)	1.54- 2.96 (2.18)	0.07- 0.23 (0.10)
Желтоперая камбала (<i>Limanda aspera</i>)	Мышцы (n = 10)	7.32- 90.66 (22.83)	132.06- 941.08 (314.08)	26.83- 46.07 (33.23)	1.48- 3.71 (2.14)	0.56- 2.01 (0.85)	8.54- 23.60 (15.64)	3.88- 4.27 (4.05)	0.03- 0.08 (0.06)
	Печень (n = 10)	8.20- 30.64 (14.59)	243.54- 1229.47 (447.73)	51.40- 114.98 (82.91)	2.60- 16.66 (4.28)	0.58- 1.69 (0.79)	5.43- 12.36 (9.26)	0.43- 6.07 (0.95)	0.73- 6.09 (1.81)
	Гонады самцов (n = 8)	4.36- 11.16 (9.06)	49.54- 348.73 (62.96)	74.13- 135.74 (89.16)	0.90- 10.87 (2.03)	< ПО- 3.19	1.85- 11.91 (8.33)	0.32- 2.14 (1.51)	0.08- 0.59 (0.20)
	Икра (n = 1)	18.58	147.99	97.21	3.10	3.35	< ПО	0.78	0.37

Примечание: < ПО – ниже пределов обнаружения оборудования.

Note: < ПО, below the detection limits of the equipment.

среди анализируемых органов. Распределение определяемых элементов в гонадах самцов происходило в порядке: Zn (51.16 мг/кг сух. мас.) > Fe (22.48 мг/кг сух. мас.) > Cu (2.62 мг/кг сух. мас.) > As (1.65 мг/кг сух. мас.) > Mn (0.39 мг/кг сух. мас.) > Pb (0.27 мг/кг сух. мас.) > Ni (0.23 мг/кг сух. мас.) > Cd (0.19 мг/кг сух. мас.).

При сравнении концентраций элементов между органами выявлено достоверно ($p \leq 0.0038$) большее содержание Zn в икре по сравнению с мышцами и печенью (рис. 2). Наибольшие уровни Cu и Fe отмечены в печени, при этом они сопоставимы с таковым в икре и достоверно ($p \leq 0.001$) превышают содержание в мышцах. О различиях с уровнем меди в гонадах самцов можно говорить только на уровне тенденции, так как их выборка включала два образца, чего недостаточно для определения достоверности отличий. Концентрации Mn достоверно не различались, однако распределялись в порядке: *печень* > *мышцы* > *икра* > *гонады самцов*, что совпадает с литературными данными [10]. Никель накапливался в органах минтая в наименьших количествах из всех исследуемых элементов, имея следующий порядок уменьшения концентраций: *икра* > *печень* > *мышцы* > *гонады самцов*. Достоверные отличия в

содержании Ni отмечены только между икрой и мышцами ($p = 0.0027$). Такие результаты сопоставимы с другими работами [10, 14].

Токсичные элементы As, Pb и Cd обнаружены во всех пробах, из них в наибольших концентрациях обнаружен мышьяк. Его концентрации максимальны в мышцах минтая, в меньшем количестве он содержится в икре, далее в порядке уменьшения концентраций следуют печень и гонады самцов. Накопление As преимущественно в мышечной ткани было отмечено и в других работах [9, 10]. Наибольшие концентрации свинца отмечены в мышцах. По сравнению с ними в икре Pb содержится в два раза меньше. Минимальные концентрации обнаружены в печени и гонадах самцов. Ранее в промысловых рыбах Японского и Охотского морей было зафиксировано наибольшее накопление свинца в печени по сравнению с другими органами [8, 10]. Кадмий имеет распределение, отличное от двух других токсичных элементов. Концентрация этого тяжелого металла в печени намного выше, чем в икре. В гонадах самцов и мышцах кадмия содержится на порядок ниже. Общая доля As, Pb и Cd среди определяемых элементов наибольшая в мышцах, наименьшая – в икре. Заслуживает внимания соотношение кадмия и свинца в органах минтая. В то время как он до-

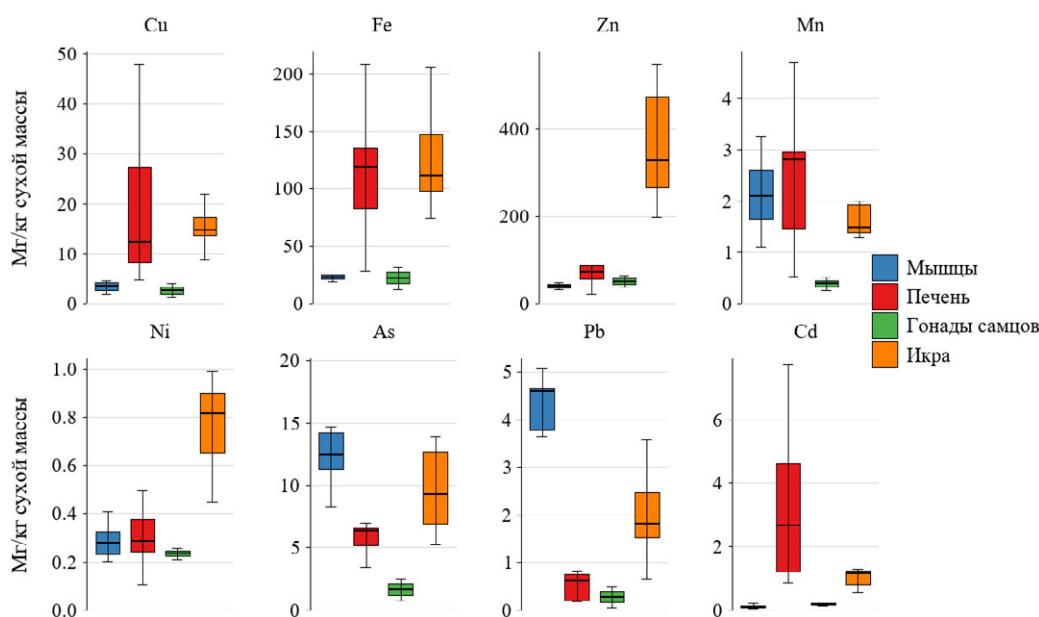


Рис. 2. Концентрации микроэлементов в органах минтая тихоокеанского (*Gadus chalcogrammus*).

Fig. 2. Trace element concentrations in the organs of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*).

минирует в печени и уступает свинцу в мышцах, в половых продуктах эта пара токсичных элементов находится на одном уровне.

Таким образом, во всех исследуемых органах минтая преобладали Zn и Fe. Среди токсичных элементов наибольшие уровни имел As. В порядке уменьшения концентраций этот токсикант следовал за Cu, а в печени и вовсе занял третье место (после Fe и Zn). Как и мышьяк, свинец в большей степени приурочен к мышцам. Кадмий в свою очередь имел наибольшие уровни в печени минтая. Для икры в целом характерно высокое содержание эссенциальных элементов, по сравнению с другими органами. Для гонад самцов отмечена наименьшая способность к аккумуляции исследуемых элементов.

Элементный состав органов тихоокеанской сельди (*Clupea pallasii*). В мышцах сельди тихоокеанской преобладало железо, уровни цинка были вдвое ниже. Другие эссенциальные элементы, медь и марганец, содержались в концентрациях 1.21–3.87 и 0.59–1.59 мг/кг сух. мас. соответственно. Никель был обнаружен только в половине мышечных образцов, наибольшая из зафиксированных концентраций составила 0.29 мг/кг сух. мас. Токсичные элементы имели следующие кон-

центрации: 2.05–4.75 мг/кг сух. мас. для мышьяка, 0.23–1.45 мг/кг сух. мас. для свинца, 0.02–0.08 мг/кг сух. мас. для кадмия.

В печени в высоких концентрациях было зафиксировано железо, содержание цинка было в несколько раз ниже. Меди и марганца, а также мышьяка и кадмия обнаружено на порядок меньше. Концентрации свинца варьировали от 0.02 до 0.69 мг/кг сух. мас. Никель удалось зафиксировать в одной пробе печени (0.21 мг/кг сух. мас.).

В наибольших количествах в образцах икры была обнаружена пара эссенциальных металлов: железо и цинк. Меньше в этом органе содержалось меди, марганца и никеля. В сопоставимых или в меньших количествах обнаружены токсиканты: свинец, мышьяк и кадмий. В гонадах самцов концентрации микроэлементов уменьшались в следующем порядке: железо (59.94 мг/кг сух. мас.) > цинк (36.08 мг/кг сух. мас.) > свинец (8.27 мг/кг сух. мас.) > медь (3.94 мг/кг сух. мас.) > мышьяк (1.37 мг/кг сух. мас.) > марганец (0.57 мг/кг сух. мас.) > кадмий (0.09 мг/кг сух. мас.). Концентрации никеля в этом органе оказались ниже предела обнаружения оборудования.

Сравнение органов сельди тихоокеанской по содержанию определяемых элементов (рис. 3) показало, что эссенциальные элементы

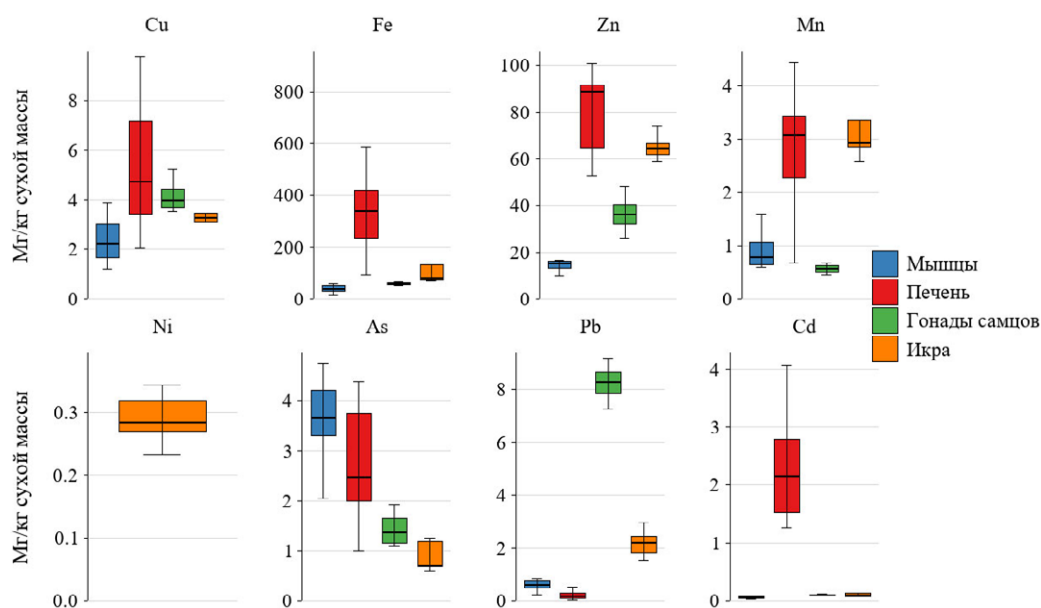


Рис. 3. Концентрации микроэлементов в органах тихоокеанской сельди (*Clupea pallasii*).

Fig. 3. Trace element concentrations in the organs of pacific herring (*Clupea pallasii*).

Cu, Fe, Zn и Mn максимально накапливаются в печени. Наименьшие концентрации этих элементов отмечены в мышцах за исключением марганца, который в наименьших количествах обнаружен в гонадах самцов, однако его концентрации в этих органах практически одинаковы. Распределение эссенциальных элементов так же, как и в органах минтая, соотносится с общими закономерностями для промысловой ихтиофауны дальневосточных морей [10]. Железа в органах *Clupea pallasii* обнаружено больше, чем цинка. В разы меньше концентрации Cu, еще меньше в органах тихоокеанской сельди содержится Mn. Никель в наибольших количествах содержался в икре.

Наибольшие концентрации мышьяка отмечены в мышцах, при этом достоверное различие зафиксировано с икрой ($p = 0.004$) и гонадами самцов ($p = 0.012$). Содержание As в печени уступает таковому в мышцах и достоверно превышает его в икре ($p = 0.048$). Уровни мышьяка в гонадах самцов были ниже, чем в печени и больше, чем в икре (на уровне тенденций). Достоверно большее ($p \leq 0.001$) содержание свинца, по сравнению с другими органами, характерно для гонад самцов (рис. 2). Минимальное содержание характерно для мышц (достоверно ниже, чем в половых продуктах при $p \leq 0.01$) и печени (достоверно ниже, чем в других органах при $p \leq 0.05$). Полученное для свинца распределение среди органов отличается от описанного ранее при исследовании промысловых видов Японского и Охотского морей, которое имело противоположный вид: *печень* > *мышцы* > *гонады* [10]. Кадмий, за исключением печени, обнаружен в более низких концентрациях по сравнению со свинцом, что подчеркивает ее выраженную способность аккумулировать Cd. В икре сельди никеля содержится больше, чем кадмия.

Полученные результаты позволяют говорить о существенном преобладании во всех исследуемых органах *Clupea pallasii* Fe и Zn. Концентрации этих биоэлементов в печени, как и Cu, Mn, а также токсичного Cd превышают уровни в прочих органах. Икра содержит наименьший уровень As, что не было харак-

терно для *Gadus chalcogrammus*. Среди отличий между двумя видами также отмечено повышенное содержание Pb в гонадах самцов и низкие концентрации в мышцах сельди.

Элементный состав органов желтопёрой камбалы (*Limanda aspera*). В образцах мышц, как и печени, обнаружены все элементы. Выражено превалирование железа (132.06–941.08 мг/кг сух. мас.). Прочие эссенциальные элементы были обнаружены в концентрациях 26.83–46.07, 7.32–90.66, 1.48–3.71, 0.56–2.01 мг/кг сух. мас. для цинка, меди, марганца и никеля соответственно. Уровни токсичных элементов имели следующие значения: 8.54–23.60 (мышьяк), 3.88–4.27 (свинец), 0.03–0.08 (кадмий) мг/кг сух. мас.

Анализ печени показал, что в наибольших концентрациях содержится железо, цинк – в несколько раз меньше. Более низкие уровни отмечены для прочих эссенциальных элементов: меди, марганца и никеля. Для мышьяка, свинца и кадмия зафиксированы концентрации 5.43–12.36, 0.43–6.07 и 0.73–6.09 мг/кг сух. мас. соответственно.

В гонадах самцов наибольшие уровни характерны для цинка и железа. Остальные элементы были обнаружены в концентрациях на 1–2 порядка ниже. В образце икры, как и в гонадах самцов, наибольшие уровни отмечены для железа (147.99 мг/кг сух. мас.) и цинка (97.21 мг/кг сух. мас.), наименьшие – для свинца (0.78 мг/кг сух. мас.) и кадмия (0.37 мг/кг сух. мас.). Мышьяк обнаружен не был.

При сравнении органов по содержанию определяемых элементов (рис. 4) отмечено, что больше всего железа накапливала печень (при этом достоверное превышение отмечено только по сравнению с гонадами самцов при $p \leq 0.01$) и мышцы (достоверное отличие от концентраций в семенниках при $p \leq 0.01$). Различия между печенью и мышцами статистически не значимы. В гонадах самцов биологически активный металл накапливается в несколько раз меньше. Второе место по величине концентраций занимает цинк, в мышцах его обнаружено меньше, чем в гонадах самцов ($p = 0.0003$) и печени ($p = 0.0001$). Медь

в основном накапливалась в мышцах (достоверное отличие только от гонад самцов при $p = 0.0373$), меньше – в печени. Минимальное количество Cu отмечено в гонадах самцов. Наибольшие концентрации Mn содержатся в печени (достоверное отличие от мышц и семенников при $p \leq 0.05$), наименьшие – в мышцах и гонадах самцов. Наименьшие концентрации никеля (ниже предела обнаружения) отмечены для семенников. Практически одинаковые результаты дал анализ мышц и печени.

Максимальные уровни As достоверно ($p \leq 0.05$) зафиксированы в мышцах, более низкие уровни – в печени и гонадах самцов. В образце икры этого токсичного элемента оказалось меньше предела обнаружения. Свинец в наиболее высоких концентрациях накапливался в мышцах, однако достоверное отличие только от семенников ($p = 0.0003$), где его более чем в два раза меньше. Наименьший уровень свинца отмечен для печени. Кадмий в органах камбалы уступает свинцу, за исключением печени. Содержание Cd убывает в следующем порядке: *печень* > *икра* > *гонады самцов* > *мышцы*. При этом в мышцах достоверно ($p \leq 0.001$) самые низкие концентрации Cd, в печени – достоверно ($p \leq 0.001$) самые высокие. Содержание в мышцах и гонадах статистически значимо не различается. Концен-

трации никеля в органах камбалы желтоперой достоверно не отличались.

Таким образом, для органов *Limanda aspera* характерно превалирование железа, особенно оно выражено в мышцах и печени. После Fe и Zn в порядке уменьшения концентраций (среди эссенциальных элементов) во всех исследуемых органах следует Cu, за ней Mn. Среди токсичных элементов наиболее высокие концентрации отмечены для As. Распределение Pb похоже на наблюдаемое у минтая, наибольшие концентрации металла характерны для мышц. Уровни Cd у всех трех видов рыб были максимальны в печени и превышали содержание Pb.

Закономерности распределения элементов в органах исследуемых рыб. Цинк – один из элементов, которые превалировали в организмах всех исследуемых промысловых видов. Это объясняется тем, что Zn является важным биогенным элементом, входит в состав более 40 ферментов, влияет на рост клеток, участвует в синтезе белков [18]. При этом наибольшие его концентрации в целом наблюдаются в икре (особенно это выражено у минтая) и печени, также высокое содержание этого элемента зафиксировано в гонадах самцов камбалы. Накопление Zn характерно для печени как для

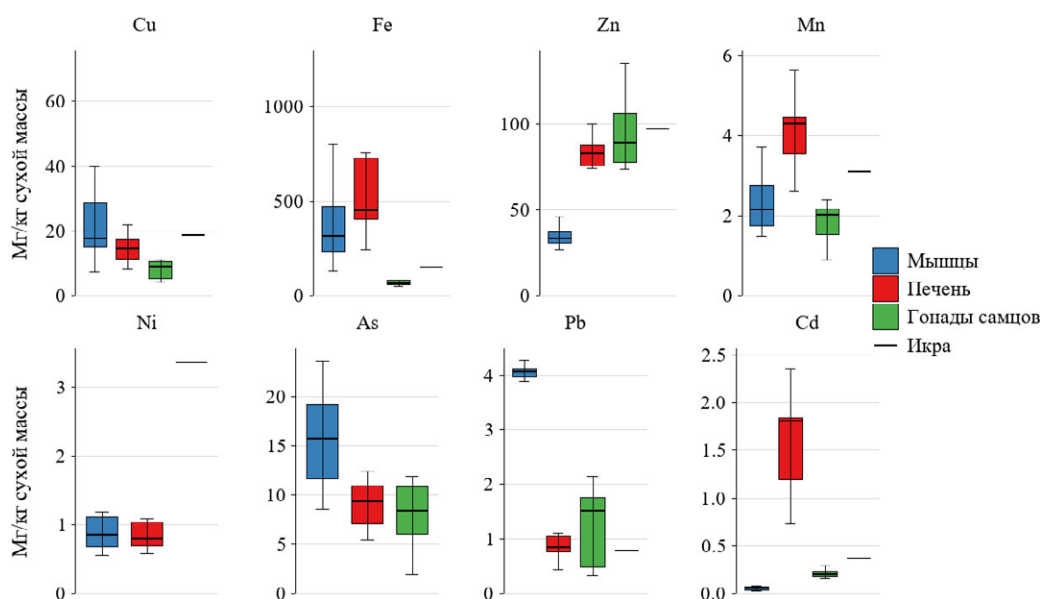


Рис. 4. Концентрации элементов в органах желтоперой камбалы (*Limanda aspera*).

Fig. 4. Trace element concentrations in the organs of yellowfin sole (*Limanda aspera*).

обменно-депонирующего органа [19]. Кроме этого, он играет важную роль в размножении живых организмов: усиливает активность гонадотропных ферментов, влияет на плодовитость и жизнеспособность эмбрионов рыб [7, 20].

Исследование микроэлементного состава тех же видов из Японского и Охотского морей показало большую приуроченность цинка к половым продуктам, чем к печени и мышцам [10]. Анализ органов и тканей других рыб показал более высокое содержание эссенциальных элементов Zn, Cu и Fe в икре по сравнению с гонадами самцов [14, 19], что совпадает с нашими результатами. Такую половую специфичность можно объяснить повышенной потребностью в накоплении эссенциальных элементов в отдельных органах (в том числе и в яичниках) и тканях самок рыб в период созревания половых желез [19].

Второй превалирующий металл – железо. Для него, как и для цинка, характерны более высокие концентрации в печени и икре, чем в мышцах и гонадах самцов. В печени всех исследуемых видов превалировал именно этот металл. Это объясняется важной ролью этого органа в обмене железа. Часть Fe в составе трансферрина от места всасывания (кишечник) переносится не к костному мозгу, а попадает в печень, где хранится в виде запасного фонда, в основном в составе ферритина. Также макрофаги этого депонирующего органа утилизируют старые или поврежденные эритроциты, осуществляют деградацию гемоглобина, тем самым высвобождая железо, которое затем вновь поступает в кровоток [21]. Присутствие железа в икре рыб в составе цитохромов и железоплазминов необходимо на ранних стадиях онтогенеза [14].

Медь у минтая и сельди в большей степени накапливалась в печени. Для этого микроэлемента орган также является функциональным «депо» [8]. Большая часть меди, поглощенной организмом, в составе альбумина поступает в печень, где более 90 % от нее связывается церулоплазмином. Затем Cu при необходимости поступает в кровоток или же выводится из организма [22].

У камбалы желтоперой в свою очередь медь в большей степени аккумулировалась в мышцах. В них же были обнаружены высокие концентрации железа. Это может быть связано с повышенным содержанием этих элементов в среде обитания этого вида.

У всех трех видов печень отличалась наибольшим содержанием марганца. Этот орган является главным регуляторным центром гомеостаза марганца, где он накапливается, а затем оттуда либо направляется на потребности организма (например, этот микроэлемент важен для работы митохондрий, которых много в самой печени), либо выводится с желчью [23].

При анализе тех же промысловых рыб из Охотского и Японского морей отмечалось более высокое накопление железа, меди и марганца в печени по сравнению с мышцами, икрой и гонадами самцов [10]. Сравнительно высокое содержание Ni в икре всех исследуемых видов может быть обусловлено важностью этого микроэлемента в раннем развитии рыб [24].

Рассматривая токсичные элементы, важно отметить, что все исследуемые виды промысловых рыб Охотского моря отличаются относительно высокими концентрациями мышьяка, зачастую близкими к содержанию меди. В настоящей работе не дифференцировали химические формы As, поэтому его повышенное содержание следует рассматривать прежде всего как особенность элементного профиля и биоаккумуляции, а не как свидетельство токсикологического риска.

Мышьяк больше всего накапливался в мышцах, за ними следует печень в порядке уменьшения концентраций, затем половые продукты. Лишь у минтая в икре концентрации As выше, чем в печени. Эти закономерности вполне согласуются с результатами исследования промысловых рыб Дальневосточных морей. Как в элементном профиле рыб, так и в морской воде, As занимал одно из первых мест по уровням содержания. Авторы приводят распределение As в следующем виде: *мышцы* > *печень* > *гонады*, что совпадает с нашим [10].

Свинец в печени рыб обнаружен в невысоких концентрациях относительно других органов, несмотря на известную способность

накапливаться преимущественно в этой структуре организма. Уровни поллютанта в мышцах были выше, чем в печени у всех анализируемых видов. Можно предположить, что свинец накапливается преимущественно в мышечной ткани из-за способности имитировать ионы кальция в ее ферментах при его дефиците [25]. К тому же для вод Охотского моря характерно обогащение свинцом из-за вулканической активности [1].

Имеются сведения о регистрации у рыб наибольших уровней Pb в гонадах, мышечной ткани и мозге [26]. У минтая и камбалы среди исследуемых органов в мышцах обнаружены наибольшие концентрации Pb. Обращает внимание повышенный уровень свинца в гонадах самцов сельди, превосходящий содержание в других органах в несколько раз, что не сопоставимо с предыдущими исследованиями [10]. С другой стороны, подобная нашей ситуация была отмечена при исследовании уровней свинца в органах горбуши из зал. Анива [1]. Результаты анализа показали более высокие концентрации Pb в семенниках, чем в мышцах и печени. Такая специфика накопления распределения свинца в органах минтая, сельди тихоокеанской и камбалы желтоперой из Охотского моря требует дополнительного изучения.

Кадмий во всех трех видах подчиняется одной закономерности: его концентрации уменьшаются в порядке: *печень* > *икра* > *гонады самцов* > *мышцы*, что согласуется с результатами анализа содержания Cd в этих же видах из Охотского и Японского морей [10]. Превышение концентраций кадмия в печени над другими органами у всех видов подтверждает известную способность печени рыб, как и теплокровных животных, накапливать кадмий в этом органе [8]. В этом органе за счет высокого содержания металлонионов происходит связывание Cd в комплексы, чтобы предотвратить токсическое воздействие тяжелого металла [27].

Результаты исследования показали четкие и вполне объяснимые закономерности распределения элементов среди органов рыб. Среди эссенциальных металлов превалируют цинк и

железо, что преимущественно объясняется их высокой биологической значимостью. Печень демонстрировала свою депонирующую функцию, накапливая максимальные концентрации железа, цинка, меди, марганца и кадмия. Мышьяк и свинец, напротив, аккумулировались преимущественно в мышцах, что обусловлено локальной геохимической ситуацией или собственными свойствами элементов.

Сравнение элементного состава органов минтая, тихоокеанской сельди и желтоперой камбалы. В первую очередь, сравнивая результаты элементного анализа всех трех видов рыб, важно отметить, что в камбале в целом в большей мере накапливаются эссенциальные элементы Fe и Cu. Концентрации железа в мышцах (рис. 5) этой бентосной рыбы достоверно ($p \leq 0.01$) выше, чем у минтая и сельди. В половых продуктах камбалы железа содержится намного больше по сравнению с парой других видов. При этом в печени (рис. 6) *Limanda aspera* железо содержится в количествах, сопоставимых с таковыми у *Clupea pallasii*, но с более высокой верхней границей диапазона концентраций. В этом органе у *Gadus chalcogrammus* содержание Fe достоверно ($p \leq 0.05$) самое низкое.

Столь высокое содержание железа в органах камбалы желтоперой можно объяснить ее экологическим статусом. Рыба является бентосным организмом, питается обитателями морского дна, которые в свою очередь накапливают труднорастворимые соединения железа. Ими же обогащены донные отложения [7]. Однако в результате исследования промысловых рыб залива Петра Великого были зафиксированы достоверно более высокие концентрации железа в мышцах сельди тихоокеанской *Clupea pallasii* по сравнению с этим же органом камбал полосатой *Liopsetta pinnifasciata* и остроголовой *Cleisthenes herzensteini* [8]. Это может свидетельствовать о влиянии на концентрации железа (как и других веществ) не только от принадлежности к какой-либо экологической группе, но и других факторов. Например, различной геохимической обстановки в районах исследований. В этом же исследовании было

отмечено большее накопление железа в печени рыб-бентофагов по сравнению с питающейся планктоном сельдью, что в свою очередь сопоставимо с нашими результатами.

Содержание меди в мышцах камбалы желтоперой также достоверно ($p \leq 0.001$) превышает таковое у минтая и сельди тихоокеан-

ской. По концентрациям в печени значимое ($p = 0.0086$) превышение уровня Cu отмечено только для камбалы по сравнению с сельдью. Полученные нами видовые различия не совпадают с установленными ранее. При анализе уровня содержания Cu в промысловой ихтиофауне залива Петра Великого были зафиксированы

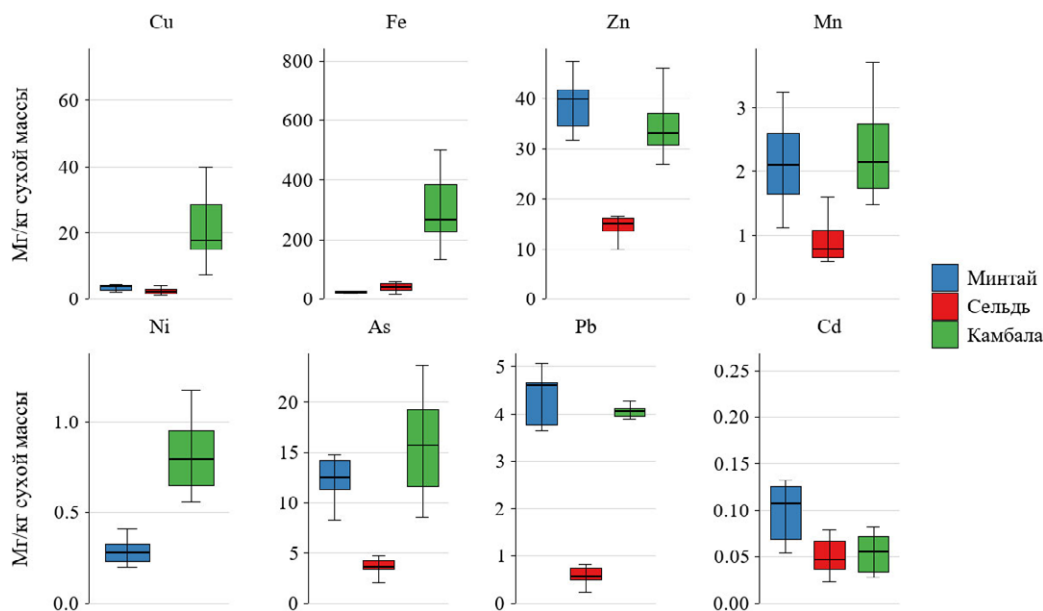


Рис. 5. Сравнение концентраций микроэлементов в мышцах минтая (*Gadus chalcogrammus*), сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*) и камбалы желтоперой (*Limanda aspera*).

Fig. 5. Comparison of trace element concentrations in the muscles of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*), Pacific herring (*Clupea pallasii*), and yellowfin sole (*Limanda aspera*).

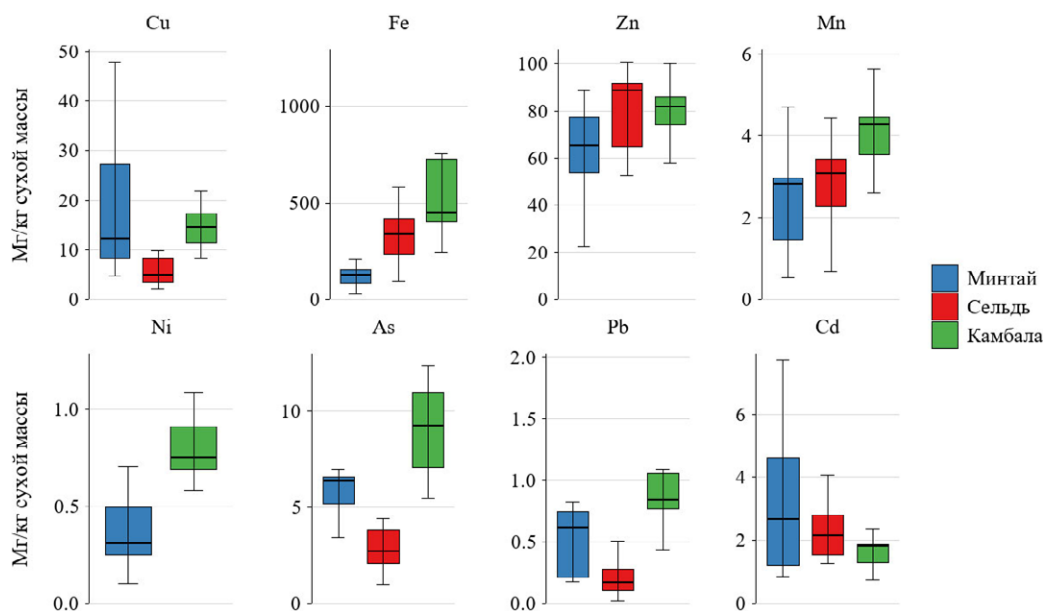


Рис. 6. Сравнение концентраций элементов в печени минтая (*Gadus chalcogrammus*), сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*) и камбалы желтоперой (*Limanda aspera*).

Fig. 6. Comparison of trace element concentrations in the liver of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*), Pacific herring (*Clupea pallasii*), and yellowfin sole (*Limanda aspera*).

достоверно более высокие концентрации Cu в мышцах сельди тихоокеанской по сравнению с камбалами [8]. Это объяснялось тем, что сельдь питается планктонными организмами, которые характеризуются высокими коэффициентами накопления тяжелых металлов из морской среды.

Предположительно особенность наших результатов обусловлена обилием соединений меди в донных отложениях залива Анива, где были отобраны особи *Limanda aspera*. Это в свою очередь может быть связано с влиянием вулканической активности или поступлением Cu с материковым и речным стоком, в результате которого соединения меди депонируются в донных грунтах. Медь при возможном вулканическом происхождении также является свидетелем антропогенного воздействия на морскую среду [1]. В залив Анива впадает ряд рек, и на его берегу расположен Корсаковский морской торговый порт.

Анализ концентраций цинка в мышцах показал достоверное ($p \leq 0.001$) превышение его содержания у минтая и камбалы над таковым у сельди. Мышцы минтая и камбалы содержали сходные концентрации цинка. При исследовании этих же видов из Японского моря [10] в мышцах сельди тихоокеанской были обнаружены концентрации более высокие (14–17 мкг/г сух. мас.), чем в том же органе у камбалы желтоперой (0.8–1.4 мкг/г сух. мас.). Для этого органа у минтая диапазон составил 4.3–15 мкг/г сух. мас. В этих результатах, в отличие от наших, не наблюдаются наименьшие концентрации для мышц сельди.

Следует предположить, что на соотношение уровней Zn в органах рыб большее влияние оказали не экологические особенности видов, а другие факторы. Например, это может указывать на более высокое содержание цинка в среде обитания *Gadus chalcogrammus* и *Limanda aspera* по сравнению с пелагиалью зал. Терпения. В печени камбалы, минтая и сельди Zn содержится примерно в одних и тех же концентрациях, достоверные отличия не обнаружены.

Марганец, как и цинк, в достоверно ($p \leq 0.001$) больших количествах содержится в

мышцах минтая и камбалы, чем сельди. В отношении печени достоверно ($p = 0.0398$) больше Mn содержится в камбале по сравнению с сельдью. Сельдь и минтай по содержанию марганца в печени близки. Такие результаты дают еще одно основание для предположения о том, что сравнительно низкие концентрации эссенциальных элементов в организме сельди тихоокеанской из зал. Терпения являются следствием их невысокого содержания в среде обитания и пище.

Концентрации Ni максимальны в органах желтоперой камбалы, в ее мышцах ($p = 0.0002$) и печени ($p = 0.0101$) содержится существенно больше этого элемента, чем у минтая. Минимальные количества в целом характерны для тихоокеанской сельди. Ранее ученые отмечали, что в организме бентофагов концентрации никеля выше по сравнению с другими рыбами [28].

Анализируя содержание As в мышцах, печени и гонадах, мы можем отметить, что виды рыб по накоплению этого токсичного элемента в целом убывают в порядке: *камбала* > *минтай* > *сельдь*. Мышцы и печень тихоокеанской сельди достоверно ($p \leq 0.05$) накапливали наименьшие количества мышьяка.

Существенное превышение уровней As в минтае над таковым у сельди может быть связано с химическим составом рациона, основную массу которого составляют планктонные ракообразные [29]. Анализ содержания мышьяка в промысловых ракообразных Японского моря показал его повышенные уровни, которые даже превышают таковые в рыбах [30]. Превышение ПДК (5 мг/кг сырой массы) было зафиксировано в 17–68 % особей, в зависимости от исследуемого вида [31]. Предположительно и для планктонных ракообразных характерны высокие концентрации As.

Важно отметить, что и сельдь тихоокеанская питается главным образом планктонными ракообразными [32]. Следовательно, на концентрации мышьяка в рыбах влияет не столько видовой состав их рациона, сколько содержание элементов в среде обитания в целом. Минтай совершает миграции в более глубокие водные горизонты, там он может питаться

организмами, которые содержат больше свинца, чем планктон из верхних слоев воды. Или же воды Амурского лимана, где был выловлен минтай, более обогащены Pb по сравнению с акваторией залива Терпения, где обитала сельдь тихоокеанская.

Камбала желтоперая в свою очередь питается главным образом червями (эхиуридами и полихетами), ракообразные занимают намного меньшую долю. Такой вывод был получен при анализе ее рациона в заливе Петра Великого [33]. Наши данные сопоставимы с результатами, полученными при исследовании элементного состава промысловых рыб дальневосточных морей, где также отмечались более высокие уровни мышьяка в мышцах камбал, по сравнению с минтаем и сельдью [11]. Возможно, это связано с более высоким содержанием в донных осадках, откуда они поступают в организм рыб в ходе питания.

В мышцах минтая и камбалы достоверно ($p \leq 0.001$) накапливается больше свинца, чем в этих же органах у сельди. В печени концентрации Pb также больше у камбалы ($p = 0.0002$) и минтая (тенденция, $p = 0.0516$) по сравнению с сельдью. Это можно объяснить тем, что рыбы-бентофаги подвержены аккумуляции токсичных элементов из детрита и мелких бентосных организмов, концентрирующих самое большое количество тяжелых металлов среди остальных компонентов морских экосистем [34]. Учитывая, что Северо-Западная Пацифика обогащена различными тяжелыми металлами (в том числе свинцом) [1], причина значительного накопления Pb мышцами и печенью придонных и мигрирующих ко дну рыб вполне может быть обоснована их экологической стратегией и элементным составом рациона.

Кадмий преимущественно аккумулялировали исследуемые особи минтая, в его мышцах элемента достоверно ($p \leq 0.05$) больше, чем у сельди и камбалы. Образцы печени существенно не отличаются по содержанию токсичного металла, однако по медианным значениям и по диапазонам концентраций можно выстроить следующий ряд уменьшения концентраций: *минтай* > *сельдь* > *камбала*. Такие закономерности не согласуются с нашими предыдущими

рассуждениями о том, что рыбы-бентофаги в большей мере подвержены накоплению различных элементов. Можно предположить в отношении кадмия большее влияние того, что минтай занимает более высокий трофический уровень и имеет более разнообразный рацион. Этот промысловый вид по характеру питания можно назвать универсалом. С одной стороны, он питается планктонными организмами, которые характеризуются высокими коэффициентами накопления различных элементов [8]. Также в рацион минтая могут входить зообентос, нектон и макрофиты, которые тоже могут аккумулировать тяжелые металлы. Стоит учитывать, что преобладание в питании минтая тех или иных организмов изменчиво, оно зависит от сезона, возраста и конкретного места обитания [35]. Помимо этого, можно полагать, что в среде обитания рыбы (Амурский лиман) содержатся более высокие концентрации кадмия, чем в акваториях вылова сельди и камбалы.

Следует отметить, что наименьшая совокупная концентрация токсичных элементов (As, Pb и Cd) в органах сельди тихоокеанской характерна для икры. Это объясняется тем, что у рыб развита защита женских половых продуктов от воздействия токсикантов. После оплодотворения, при дальнейшем росте, концентрации различных элементов в молодых особях начинают возрастать пропорционально их содержанию в воде [14]. У минтая такая закономерность не обнаружена. В его икре мышьяка и свинца содержится больше, чем в печени. Это может быть обусловлено какими-либо биологическими особенностями минтая или геохимической спецификой акватории отбора.

Сравнение трех видов показало, что наибольшие концентрации Fe, Cu, Ni и As характерны для камбалы желтоперой. Это объясняется ее питанием донными организмами и постоянным контактом с обогащенными металлами донными осадками. Сравнительно низкие концентрации Zn и Mn в мышцах сельди тихоокеанской могут указывать на относительно низкое содержание этих элементов в пелагиали Охотского моря. Превышение концентраций Cd в органах минтая над таковыми у сельди и камбалы может быть обусловлено

особым трофическим статусом минтая либо локальным обогащением кадмием вод Амурского лимана. Таким образом, экологическая принадлежность вида является значимым, но не единственным фактором, определяющим элементный состав органов. Значительный вклад вносят локальные геохимические условия и особенности питания. Также необходимо учитывать, что рыбы для исследования были отобраны в разные сезоны и годы. Это могло обусловить нахождение организмов на разных этапах жизненного цикла, что в свою очередь влияет на потребность в микроэлементах и их концентрации в органах. Этот факт следует принимать во внимание при интерпретации выявленных межвидовых различий.

Заключение

Таким образом, выявлены выраженные закономерности распределения микроэлементов между органами изученных промысловых рыб Охотского моря. Печень выступает основным «депо» для эссенциальных элементов Fe, Zn, Cu, Mn и токсичного Cd, что объясняется ее важной ролью в метаболизме и детоксикации. Мышечная ткань характеризуется повышенным накоплением мышьяка. Распределение свинца различается. У минтая тихоокеанского и камбалы желтоперой оно сходно, а у сельди тихоокеанской отличается превалированием Pb не в мышцах, а в гонадах самцов. Семенники содержат минимальные концентрации исследуемых веществ, а икра в большинстве случаев обогащена эссенциальными элементами, что, вероятно, связано с их значением для развития молоди из икринок.

Установлены межвидовые различия, обусловленные экологическим статусом и трофическими особенностями. Желтоперая камбала аккумулирует больше железа, меди, никеля и мышьяка, что, предположительно, отражает контакт с донными отложениями и питание бентосом. Тихоокеанская сельдь отличается пониженными или наименьшими уровнями большинства элементов, вероятно, вследствие пелагического образа жизни и локального дефицита некоторых элементов в пелагиали за-

лива Терпения. Более высокие концентрации кадмия у минтая тихоокеанского могут быть связаны со спецификой его питания или локальной геохимической обстановкой района вылова. Таким образом, элементный профиль исследованных промысловых рыб Охотского моря формируется под комплексным влиянием биохимических свойств микроэлементов, специфики органов, экологического статуса организма (бентосный, пелагический или мигрирующий), химического состава рациона и региональных геохимических условий. При этом пространственно-временная разобщенность выборок не позволяет полностью разграничить влияние видовых особенностей и локальной геохимической обстановки.

Список литературы

1. Литвиненко А.В., Христофорова Н.К., Цыганков В.Ю. Влияние мест нагула на содержание тяжелых металлов в горбуше (*Oncorhynchus gorbuscha*, Salmonidae). *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2022,62:98–116. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2022-62-98-116>
2. Антонов Н.П., Датский А.В., Мазникова О.А., Митенкова Л.В. Современное состояние промысла тихоокеанской сельди в дальневосточных морях. *Рыбное хозяйство*. 2016,1:54–58. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25911565>
3. Антонов Н.П., Кузнецова Е.Н. Динамика вылова основных промысловых видов рыб в морях Дальнего Востока. *Рыбное хозяйство*. 2021,1:34–41. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-1-34-41>
4. Монин А.С., Лисицын А.П. (ред.). *Биогеохимия океана*. Москва: Наука; 1983, 368 с.
5. Litvinenko A.V., Alekseev M.Y., Danilin D.D., Tsygankov V.Yu. Food safety of salmon from the Euro-Arctic and Sakhalin-Kuril Regions of Russia: Heavy metals in pink salmon. In: Karev V. (ed.). *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes: Proceedings of the 10th International scientific school for young scientists, Moscow, October 18-20, 2024*. Cham: Springer, 2025, p. 271–278. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88459-7_30
6. Моисеенко Т.И. Влияние геохимических факторов водной среды на биоаккумуляцию металлов в организме рыб. *Геохимия*. 2015,3:222–233. <https://doi.org/10.7868/S0016752515030097>
7. Морозов Н.П., Петухов С.А. *Микроэлементы в промысловой ихтиофауне Мирового океана*. Москва: Агропромиздат, 1986. 159 с.

8. Симоконь М.В. Тяжёлые металлы в промысловых рыбах залива Петра Великого в связи с условиями обитания: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: Дальневост. гос. ун-т; 2003, 24 с.
9. Жадько Е.А., Стеблевская Н.И., Полякова Н.В., Чусовитина С.В. Микроэлементы в тканях некоторых видов гидробионтов залива Петра Великого. *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2013,30:19–27. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21166395>
10. Ковековдова Л.Т., Симоконь М.В., Кику Д.П. Микроэлементный состав промысловых рыб дальневосточных морей. *Проблемы региональной экологии*. 2013,2:72–75. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19100158>
11. Ковековдова Л.Т., Кику Д.П., Касьяненко И.С. Мониторинг водной среды и безопасности промысловых объектов в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне (токсичные элементы). В кн.: *Морские биологические исследования: достижения и перспективы: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Севастополь, 19–24 сентября. 2016*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016, т. 3, с. 111–114. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27547401>
12. Gamov M.K., Ivanova A.E., Mironova E.K., Tsygankov V.Yu. Heavy metals and arsenic in commercial fish of the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and Bering Sea: Current status (literature review). *Marine Biological Journal*. 2022,7(4):14–30. <https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.4.02>
13. Христофорова Н.К., Цыганков В.Ю., Боярова М.Д., Лукьянова О.Н. Отражение биогеохимических условий морской среды на содержании микроэлементов в тихоокеанских лососях. *Успехи наук о жизни*. 2014,8:91–100. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23086730>
14. Литвиненко А.В., Салимзянова К.Р., Христофорова Н.К., Данилин Д.Д., Цыганков В.Ю. Половые различия в содержании микроэлементов в органах и тканях нерки из восточных заливов полуострова Камчатка. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2023,65:111–122. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2023-65-111-122>
15. Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D., Lukyanova O.N. Heavy metal contents in the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 from Kuril oceanic waters during anadromous migration. *Russian Journal of Marine Biology*. 2015,41(6):479–484. <https://doi.org/10.1134/S1063074015060085>
16. Эйрих С.С., Колотушкина Л.В., Серых Т.Г. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани мирных и хищных рыб реки Иртыш. *Известия АО РГО*. 2024,2(73):77–94. <https://doi.org/10.24412/2410-1192-2024-17306>
17. Яблоков Н.О., Анищенко О.В., Зуев И.В. Распределение металлов в красной и белой осевой мускулатуре трех видов рыб Красноярского водохранилища. *Журнал Сибирского фед. ун-та. Серия: Биология*. 2019,12(4):430–444. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0310>
18. Христофорова Н.К., Шулькин В.М., Кавун В.Я., Чернова Е.Н. Тяжелые металлы в промысловых и культивируемых моллюсках залива Петра Великого. Владивосток: Дальнаука, 1993, 296 с.
19. Степаненко Е.А., Волкова И.В., Чаплыгин В.А., Исаева Е.К. Содержание цинка в органах и тканях каспийского рыбца *Vimba vimba persa* (Pallas, 1814). *Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство*. 2025,1:95–101. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-1-95-101>
20. Converse A, Thomas P. The zinc transporter ZIP9 (Slc39a9) regulates zinc dynamics essential to egg activation in zebrafish. *Scientific Reports*. 2020,10:15673. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72515-4>
21. Лукина Е.А., Деженкова А.В. Метаболизм железа в норме и при патологии. *Клиническая онкогематология. Фундаментальные исследования и клиническая практика*. 2015,8(4):355–361. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25223915>
22. Коджакова С.З. Биологическая роль меди в живых организмах. *Новая наука: От идеи к результату*. 2016,5–3(84):8–12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26104564>
23. Adam S., Grama A., Mititelu A., Bența G., Pop T.L. Dysregulation of trace elements in pediatric cholestasis: From pathophysiology to nutritional approaches. *International Journal of Molecular Sciences*. 2026,27(6):2710. <https://doi.org/10.3390/ijms27062710>
24. Lapointe D., Couture P. Accumulation and effects of nickel and thallium in early-life stages of fathead minnows (*Pimephales promelas*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2010;73(4):572–578. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.01.004>
25. Goyer R.A. Nutrition and metal toxicity. *American Journal of Clinical Nutrition*. 1995,61(3 Suppl):646S–650S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/61.3.646S>
26. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Карапетян Т.А., Доршакова Н.В. Влияние свинца на живые организмы. *Журнал общей биологии*. 2020,81(2):147–160. <https://doi.org/10.31857/S0044459620020086>
27. Фазлыева А.С., Усманова Э.Н., Даукаев Р.А., Каримов Д.О., Валова Я.В., Смолянкин Д.А., Байгильдин С.С. Распределение кадмия и экспрессия металлотионеина в органах крыс при острой интоксикации. *Гигиена и санитария*. 2020,99(9):1011–1015. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-1011-1015>
28. Морозов Н.П., Патин С.А., Никоненко Е.М. Микроэлементы в воде, взвешях и гидробионтах Черного моря. *Геохимия*. 1976,9:1391–1399.

29. Кузнецова Н.А., Шебанова М.А. Питание минтая и его кормовая база в Чукотском море в летне-осенний период. *Известия ТИНРО*. 2023,203:179–199. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2023-203-179-199>
30. Ковековдова Л.Т., Симоконов М.В., Наревич И.С. Особенности формирования элементного состава морскими ракообразными (*Paralithodes camchaticus*) и (*Chionoecetes opilio*). *Проблемы региональной экологии*. 2022,5:32–38. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-32-38>
31. Донец М.М., Цыганков В.Ю. Современные уровни загрязняющих веществ в промысловых объектах дальневосточных морей России. *Вестник ДВО РАН*. 2019;4(206):90–103. <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.206.4.010>
32. Горбатенко К.М., Мельников И.В. Трофические исследования охотоморской сельди в 2000-е гг. (состав пищи, суточные рационы, оценка выедания кормовых объектов в годовом цикле). *Известия ТИНРО*. 2016,185:185–193. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-185-193>
33. Пушина О.И., Соломатов С.Ф., Будникова Л.Л., Надточий В.А. Питание и пищевые отношения камбал зал. Петра Великого (Японское море) в летний период. *Известия ТИНРО*. 2012,171:240–266. EDN: WCAMLR
34. 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*. 2021,28(5):549–566. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-5-549-566>
35. Ефимкин А.Я. Питание минтая в Охотском море в весенний и осенний периоды. *Известия ТИНРО*. 2012,171:213–225.
5. Litvinenko A.V., Alekseev M.Y., Danilin D.D., Tsygankov V.Yu. Food safety of salmon from the Euro-Arctic and Sakhalin-Kuril Regions of Russia: Heavy metals in pink salmon. In: Karev V. (ed.) *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes: Proceedings of the 10th International scientific school for young scientists, Moscow, October 18-20, 2024*. Cham: Springer, 2025, p. 271–278. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88459-7_30
6. Moiseenko T.I. Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish. *Geochemistry International*. 2015,53(3):213–223. <https://doi.org/10.1134/S001670291503009X>
7. Morozov N.P., Petukhov S.A. [Trace elements in commercial ichthyofauna of the World Ocean]. Moscow: Agropromizdat, 1986, 159 p. (In Russ.).
8. Simokon' M.V. [Heavy metals in commercial fishes of Peter the Great Bay in relation to habitat conditions]: abstr. of diss. ... Cand. of Sci. in Biology. Vladivostok: Far Eastern State University; 2003, 24 p. (In Russ.).
9. Zhad'ko E.A., Steblevskaya N.I., Polyakova N.V., Chusovitina S.V. Trace element in tissues of some species of aquatic organisms of Peter the Great Bay. *Nauchnye trudy Dal'rybvtuza = Scientific Proceedings of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2013,30:19–27. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21166395>
10. Kovekovdova L.T., Simokon' M.V., Kiku D.P. Microelemental composition of Far Eastern commercial fishes. *Regional Environmental Issues*. 2013,2:72–75. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19100158>
11. Kovekovdova L.T., Kiku D.P., Kasyanenko I.S. Monitoring of water environment and food safety of commercial objects in the Far East fishery basin (toxic elements). In: *Marine biological research: achievements and perspectives: proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation, Sevastopol, Sept. 19–24, 2016*. Sevastopol: EKO-SI-Gidrofizika: 2016, vol. 3, p. 111–114. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27547401>
12. Gamov M.K., Ivanova A.E., Mironova E.K., Tsygankov V.Yu. Heavy metals and arsenic in commercial fish of the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and Bering Sea: Current status (literature review). *Marine Biological Journal*. 2022,7(4):14–30. <https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.4.02>
13. Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D., Luk'yanova O.N. The role of the biogeochemical conditions of the marine environment on the trace element content in pacific salmon. *Achievements in the life sciences*. 2014,8(1):55–60. <https://doi.org/10.1016/j.als.2014.06.009>
14. Litvinenko A.V., Salimzyanova K.R., Khristoforova N.K., Danilin D.D., Tsygankov V.Yu. Gender differ-

References

1. Litvinenko A.V., Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu. Feeding location influence on the heavy metal content in pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*, Salmonidae). *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2022,62:98–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2022-62-98-116>
2. Antonov N.P., Datsky A.V., Maznikova O.A., Mitenkova L.V. Current state of pacific herring fishery in the Far Eastern seas of Russia. *Fisheries*. 2016,1:54–58. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25911565>
3. Antonov N.P., Kuznetsova E.N. The catch dynamics of main commercial fish species in the Far East seas. *Fisheries*. 2021,1:34–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-1-34-41>
4. Monin A.S., Lisitsyn A.P. (eds.). [Biogeochemistry of the ocean]. Moscow: Nauka, 1983, 368 p. (In Russ.).

- ences in the content of trace elements in the organs and tissue of sockeye salmon from the eastern gulfs of Kamchatka peninsula. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2023,65:111–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2023-65-111-122>
15. Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D., Lukyanova O.N. Heavy metal contents in the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 from Kuril oceanic waters during anadromous migration. *Russian Journal of Marine Biology*. 2015,41(6):479–484. <https://doi.org/10.1134/S1063074015060085>
 16. Eyrikh S.S., Kolotushkina L.V., Serykh T.G. Content of heavy metals in the muscle tissue of predatory and non-predatory fishes of the Irtysh river. *Bulletin of the Russian Geographical Society*. 2024,2(73):77–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2410-1192-2024-17306>
 17. Yablokov N.O., Anishchenko O.V., Zuev I.V. Distribution of metals in red and white axial muscles of three fish species from the Krasnoyarsk reservoir. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2019,12(4):430–444. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0310>
 18. Khristoforova N.K., Shul'kin V.M., Kavun V.Ya., Chernova E.N. [Heavy metals in commercial and cultivated molluscs of Peter the Great Bay]. Vladivostok: Dal'nauka, 1993, 296 p. (In Russ.).
 19. Stepanenko E.A., Volkova I.V., Chaplygin V.A., Isaeva E.K. Zinc content in organs and tissues of the Caspian vimba *Vimba vimba persa* (Pallas, 1814). *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2025,1:95–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-1-95-101>
 20. Converse A., Thomas P. The zinc transporter ZIP9 (Slc39a9) regulates zinc dynamics essential to egg activation in zebrafish. *Scientific Reports*. 2020,10:15673. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72515-4>
 21. Lukina E.A., Dezhenskova A.V. Iron metabolism in normal and pathological conditions. *Clinical Oncohematology. Basic Research and Clinical Practice*. 2015,8(4):355–361. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25223915>
 22. Kodzhakova S.Z. [Biological role of copper in living organisms]. *Novaya nauka: Ot idei k rezul'tatu = New Science: From Idea to Result*. 2016,5–3(84):8–12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26104564> (In Russ.).
 23. Adam S., Grama A., Mititelu A., Bența G., Pop T.L. Dysregulation of trace elements in pediatric cholestasis: From pathophysiology to nutritional approaches. *International Journal of Molecular Sciences*. 2026,27(6):2710. <https://doi.org/10.3390/ijms27062710>
 24. Lapointe D., Couture P. Accumulation and effects of nickel and thallium in early-life stages of fathead minnows (*Pimephales promelas*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2010,73(4):572–578. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.01.004>
 25. Goyer R.A. Nutrition and metal toxicity. *American Journal of Clinical Nutrition*. 1995,61(3 Suppl):646S–650S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/61.3.646S>
 26. Titov A.F., Kaznina N.M., Karapetyan T.A., Dorshakova N.V. Lead as a contaminant for living things. *Journal of General Biology*. 2020,81(2):147–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044459620020086>
 27. Fazlieva A.S., Usmanova E.N., Daukaev R.A., Karimov D.O., Valova Ya.V., Smolyankin D.A., Baigil'din S.S. Cadmium distribution and metallothionein expression in rat organs following acute intoxication. *Hygiene and Sanitation*. 2020,99(9):1011–1015. (In Russ.). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-1011-1015>
 28. Morozov N.P., Patin S.A., Nikonenko E.M. [Trace elements in water, suspended matter, and aquatic organisms of the Black Sea]. *Geochemistry International*. 1976,9:1391–1399. (In Russ.).
 29. Kuznetsova N.A., Shebanova M.A. Feeding of walleye pollock and its feeding base in the Chukchi Sea in summer-autumn period. *Izvestiya TINRO*. 2023,203(1):179–199. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2023-203-179-199>
 30. Kovekovdova L.T., Simokon' M.V., Narevich I.S. The features of the elemental composition formation by marine crustaceans *Paralithodes camchaticus* and *Chionoecetes opilio*. *Regional Environmental Issues*. 2022,5:32–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-32-38>
 31. Donets M.M., Tsygankov V.Yu. Current levels of pollutants in commercial hydrobionts of the Russian Far Eastern seas. *Vestnik DVO RAN = Vestnik FEB RAS*. 2019,4(206):90–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.206.4.010>
 32. Gorbatenko K.M., Mel'nikov I.V. Trophic studies on the Okhotsk Sea herring in the 2000s (food composition, daily rations, assessment of consumption in the annual cycle). *Izvestiya TINRO*. 2016,185:185–193. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-185-193>
 33. Pushchina O.I., Solomatov S.F., Budnikova L.L., Nadochy V.A. Feeding and food relations of flatfishes in Peter the Great Bay (Japan Sea) in summer season. *Izvestiya TINRO*. 2012,171:240–266. EDN: WCAMLR (In Russ.).
 34. 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*. 2021,28(5):549–566. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-5-549-566>
 35. Efimkin A.Ya. Feeding of walleye pollock in the Okhotsk Sea in spring and autumn seasons. *Izvestiya TINRO*. 2012,171:213–225. (In Russ.).

Об авторах

✉ **Шестёра Андрей Александрович**, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, shestera.2017@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0001-1217-7423>

Масалева Кристина Руслановна, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, masaleva.kr@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-6393-8533>

Литвиненко Анна Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры экологии, биологии и природных ресурсов, ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет», Южно-Сахалинск, Россия, litvinenko.av@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3423-3860>

Донец Максим Михайлович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, maksim.donecz@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

Беланов Максим Андреевич, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, belanov.ma@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>

Боровкова Александра Дмитриевна, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, borovkovasdm@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

Василенко Никита Дмитриевич, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, skameika00@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0004-2364-4658>

Болдескул Анна Геннадьевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, boldeskul@tigdvo.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9014-2405>

Цыганков Василий Юрьевич, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии, ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, tsig_90@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

About the Authors

✉ **Shestera, Andrey A.**, Postgraduate Student, Junior Researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, shestera.2017@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0001-1217-7423>

Masaleva, Kristina R., Postgraduate Student, Junior Researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, masaleva.kr@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-6393-8533>

Litvinenko, Anna V., Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology, Biology and Natural Resources, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, litvinenko.av@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3423-3860>

Donets, Maksim M., Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Laboratory Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, maksim.donecz@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

Belanov, Maksim A., Junior Researcher of the Laboratory Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, belanov.ma@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>

Borovkova, Aleksandra D., Junior Researcher of the Laboratory Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, borovkovasdm@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

Vasilenko, Nikita D., Postgraduate Student, Junior Researcher of the Laboratory Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, skameika00@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0004-2364-4658>

Boldeskul, Anna G., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, boldeskul@tigdvo.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9014-2405>

Tsygankov, Vasiliy Yu., Doctor of Biology, Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, tsig_90@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

Поступила 03.06.2026

Принята к публикации 22.08.2026

Received 03 June 2026

Accepted 22 August 2026