



DOI 10.23859/estr-221212

EDN MBKUW

УДК 577.118

Научная статья

Особенности микроэлементного состава нерки (*Oncorhynchus nerka* Walbaum, 1792) из заливов Восточной Камчатки

Н.К. Христофорова^{1, 2} , А.В. Литвиненко^{3*} ,

Д.Д. Данилин⁴ , К.Р. Салимзянова⁴ , М.К. Гамов¹ 

¹ Дальневосточный федеральный университет, 690922, Россия, Приморский край, г. Владивосток, п. Аякс, д. 10

² Тихоокеанский институт географии РАН, 690041, Россия, Приморский край, г. Владивосток, ул. Радио, д. 7

³ Сахалинский государственный университет, 693000, Россия, Сахалинская область, г. Южно-Сахалинск, Коммунистический пр-кт, д. 33

⁴ Камчатский филиал Тихоокеанского института географии РАН, 683000, Россия, Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Партизанская, д. 6

*litvinenko.av@bk.ru

Аннотация. Впервые изучен микроэлементный состав (содержание железа, цинка, меди, никеля, свинца и кадмия) нерки, выловленной в Авачинском и Камчатском заливах. Проведено сравнение полученных данных с опубликованными сведениями для сахалинской горбуши, нагуливавшейся в океане или в Японском море. Показано, что восточно-камчатская нерка отличается низкими концентрациями Ni и Pb, но на порядок большим содержанием Zn и Cu, чем горбуша, пришедшая из океана и прошедшая через Курило-Камчатскую геохимически импактную зону. Количество Zn и особенно Cu в икре в несколько раз превосходит содержание этих элементов в семенниках самцов нерки. Различия в содержании микроэлементов в лососях обсуждаются с позиций их биологии, экологии (характера мест нагула), условия которых заметно различаются и зависят от природных и антропогенных факторов.

Ключевые слова: Тихоокеанский лосось, Авачинский залив, Камчатский залив, геохимические условия среды, миграции, нагул, Сахалино-Курильский регион, горбуша

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22-24-00465.

ORCID:

Н.К. Христофорова, <https://orcid.org/0000-0002-9559-8660>

А.В. Литвиненко, <https://orcid.org/0000-0002-3423-3860>

Д.Д. Данилин, <https://orcid.org/0000-0002-6989-8387>

К.Р. Салимзянова, <https://orcid.org/0000-0001-6484-0752>

М.К. Гамов, <https://orcid.org/0000-0001-8133-4392>

Для цитирования: Христофорова, Н.К. и др., 2024. Особенности микроэлементного состава нерки (*Oncorhynchus nerka* Walbaum, 1792) из заливов Восточной Камчатки. *Трансформация экосистем* 7 (3), 84–96. <https://doi.org/10.23859/estr-221212>

Поступила в редакцию: 12.12.2022

Принята к печати: 12.03.2023

Опубликована онлайн: 26.07.2024



DOI 10.23859/estr-221212

EDN MBKUUV

UDC 577.118

Article

Features of the trace element composition of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka* Walbaum, 1792) from the Eastern Kamchatka bays

N.K. Khristoforova^{1, 2} , A.V. Litvinenko^{3*} , D.D. Danilin⁴ ,
K.R. Salimzyanova⁴ , M.K. Gamov¹ 

¹ Far Eastern Federal University, Ajax 10, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922 Russia

² Pacific Institute of Geography, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, ul. Radio 7, Vladivostok, Primorsky Krai, 690041 Russia

³ Sakhalin State University, Kommunisticheskiy pr-kt 33, Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin Oblast, 693000 Russia

⁴ Kamchatka Branch of the Pacific Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, ul. Partizanskaya 6, Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatka Krai, 683000 Russia

*litvinenko.av@bk.ru

Abstract. This paper is the first study of the trace element content (iron, zinc, copper, nickel, lead, and cadmium) of sockeye salmon caught in Eastern Kamchatka (Avacha and Kamchatka Bays). The results obtained were compared with published data for Sakhalin herds of pink salmon feeding in the open waters of the Pacific Ocean and in the Sea of Japan. The East Kamchatka herds of sockeye salmon are characterized by low concentrations of Ni and Pb, but the content of Zn and Cu are an order of magnitude comparing to pink salmon came here from the open ocean waters and migrating through the Kuril-Kamchatka geochemical impact zone. The content of Zn and especially Cu in the sockeye salmon eggs are several times higher than that in the male testes. Differences in the content of trace elements in salmon are discussed in regard to their biology and ecology, i.e., nature of feeding grounds, where conditions are markedly different and depend on natural and anthropogenic factors.

Keywords: Pacific salmon, Avacha Bay, Kamchatka Bay, geochemical environmental conditions, migration, feeding, Sakhalin-Kuril region, pink salmon, sockeye salmon

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 22-24-00465)

ORCID:N.K. Khristoforova, <https://orcid.org/0000-0002-9559-8660>A.V. Litvinenko, <https://orcid.org/0000-0002-3423-3860>D.D. Danilin, <https://orcid.org/0000-0002-6989-8387>K.R. Salimzyanova, <https://orcid.org/0000-0001-6484-0752>M.K. Gamov, <https://orcid.org/0000-0001-8133-4392>

To cite this article: Khristoforova, N.K. et al., 2024. Features of the trace element composition of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka* Walbaum, 1792) from the Eastern Kamchatka bays. *Ecosystem Transformation* 7 (3), 84–96. <https://doi.org/10.23859/estr-221212>

Received: 12.12.2022

Accepted: 12.03.2023

Published online: 26.07.2024

Введение

Тихоокеанские лососи рода *Oncorhynchus*, по традиционным представлениям, включают в себя 6 видов: горбушу (*Oncorhynchus gorbusha* (Walbaum, 1792)), кету (*O. keta* (Walbaum, 1792)), нерку (*O. nerka* (Walbaum, 1792)), кижуча (*O. kisutch* (Walbaum, 1792)), чавычу (*O. tshawytscha* (Walbaum, 1792)) и симу (*O. masou* (Brevoort, 1876)), из которых первые два распространены наиболее широко. Горбуша, кета и нерка обеспечивают основной объем промысла лососевых в российских водах Тихоокеана. Нерка занимает третье место по величине вылова, однако она обладает очень высокими вкусовыми качествами и наиболее ценна. Самой малочисленной, древней и теплолюбивой является сима; это сугубо приазиатский вид. Остальные виды распространены по обеим сторонам Тихого океана. Нерка, кижуч и чавыча – наиболее холодноводные рыбы.

Накопление различных металлов в органах и тканях гидробионтов, широко используемых в пищу, необходимо строго контролировать вне зависимости от их происхождения. Несмотря на то, что морская часть ареала всех азиатских лососей приурочена к северо-западу Тихого океана, микроэлементный состав рыб из разных популяций существенно отличается даже в пределах одного вида. Содержание тяжелых металлов в тканях лососей зависит от мест нагула и путей их миграции.

В предыдущие годы в Сахалино-Курильском регионе и в Приморье нами детально исследовано содержание микроэлементов в органах и тканях горбуши и кеты (Литвиненко и Христофорова, 2020; Литвиненко и др., 2021; Khristoforova et al., 2019a, b; Khristoforova et al., 2021). Полученные результаты позволили заключить, что большая часть рыб выходит на зимовку в океан через геохимическую провинцию, образуемую Курильской грядой и Курило-Камчатским желобом, являющуюся одновременно высококормной зоной. Курильские острова благодаря наземному и подводному вулканизму, а также поствулканизму поставляют в окружающую среду большой набор ионов металлов, а глубоководная впадина поддерживает высокую продуктивность за счет апвеллинга и подъема глубинных вод, содержащих биогенные и другие химические элементы. В высококормных водах геохимически импактной зоны лососи могут накапливать нежелательные токсичные элементы. Маркером рыб, нагуливавшихся в океане и проходивших через специфическую геохимическую зону в Охотском море, является свинец, высокие концентрации которого в органах и тканях лососей свидетельствуют об особом характере среды и свойствах данного элемента (Христофорова и др., 2015). Однако часть популяций горбуши на зимовку в океан не выходит, а зимует в Японском море, что также можно выявить по ее микроэлементному составу. Являясь почти закрытой акваторией с мелководными проливами, Японское море испытывает заметную антропогенную нагрузку от окружающих стран (России, Японии, Кореи), о чем говорит увеличенное содержание в япономорских рыбах цинка и меди. Повышенное содержание никеля в среде и организмах, в свою очередь, свидетельствует о сжигании углеводородов как судами, так и береговыми теплоэлектростанциями и котельными¹.

Нерка, как и другие лососи, нагуливается на определенных акваториях. Это свидетельствует о «привязанности» к предпочитаемым водным массам в океане (Бирман, 1967, 1985). Проводя от одного до трех лет в пресных водах и от одного до четырех лет в море, нерка возвращается в родные

¹ Правительство Приморского края, 2021. Влияние хозяйственной деятельности на окружающую среду. Доклад об экологической ситуации в Приморском крае в 2020 году, ч. 2, 176–177.

реки на нерест (Бугаев, 1995; Коновалов, 1980; Шунтов и Темных, 2008, 2011). Основными местами морского нагула восточно-камчатской нерки, как полагает ряд авторитетных авторов (Бугаев, 2007; Бугаев и др., 2015; Коновалов, 1980; Шунтов и Темных, 2008), являются западная часть Берингова моря и Камчатско-Командорский район, откуда зимовать она уходит в центральную часть Берингова моря и приалеутские воды. Поскольку данному виду лососей свойственно длительное и неопределенное пребывание как в пресных, так и в морских водах, он наиболее труден для изучения и понимания источников, определяющих его микроэлементный состав. В литературе имеются данные о содержании некоторых макро- и микроэлементов в костных тканях нерки, зашедшей из открытых вод на нерест в водоемы и водотоки Камчатки (Хрусталева и др., 2020), не проливающие, однако, света на источники формирования минерального состава рыбы. Наше исследование позволяет получить первое представление о содержании ряда тяжелых металлов во внутренних органах и тканях этого важного промыслового вида лососей во время анадромной миграции.

Целью работы являлось определение содержания микроэлементов в анадромной нерке из Авачинского и Камчатского заливов юго-восточной Камчатки и сравнение его с выявленными ранее соответствующими показателями для горбуши из Сахалино-Курильского региона.

Материал и методы

Пробы мышечной ткани, печени и гонад нерки (63 образца от 21 особи из Авачинского залива и 42 образца от 14 особей из Камчатского залива) собраны в прибрежных водах Восточной Камчатки в июле 2021 г. (Рис. 1). После проведения полного биологического анализа производителей нерки и отбора образцов пробы замораживали при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ на базе Камчатского филиала Тихоокеанского института географии Российской академии наук. Дальнейшую обработку проб выполняли в ДВФУ (Институт Мирового океана). Подготовку образцов к анализу проводили методом кислотного разложения с помощью микроволновой системы MARS 6 в особо чистой азотной кислоте (70%) согласно общепринятой методике² (ГОСТ 26929-94). Минерализаты органов и тканей анализировали на содержание металлов на атомно-абсорбционном спектрофотометре Shimadzu AA-7000 на пламенном и беспламенном атомизаторах. Точность определения содержания элементов, а также возможное загрязнение образцов во время анализа контролировали путем сравнения с калибровочными растворами, в том числе с холостым (нулевым) раствором. Точность используемого метода подтверждалась регулярным анализом стандартного образца SRM-1566a (ткань устрицы, Национальное бюро стандартов, США). Всего проведено 1260 индивидуальных измерений. Расчет результатов производился с использованием программы MS Excel 2019. Концентрацию металлов выражали в мкг/г сырой массы как среднее значение \pm стандартное отклонение.

Результаты и обсуждение

Для демонстрации влияния мест нагула на микроэлементный состав органов и тканей лососей представлены данные о содержании ионов тяжелых металлов как в камчатской нерке, так и в сахалинской горбуше, пойманной в предыдущие годы в заливе Терпения (Юго-Восточный Сахалин) и заливе Анива (юг Сахалина) (Табл. 1).

Как можно видеть, максимальной концентрации в минеральном составе лососей, как нерки, так и горбуши, достигают железо, медь и цинк, являющиеся истинными биоэлементами. В наибольших количествах металлы концентрируются в печени, что, несомненно, связано с ее функциональной ролью органа-аккумулятора и детоксиканта. Наличие железа свидетельствует о терригенном влиянии; этот элемент может поступать в больших количествах в организм рыб в пресноводных водоемах. Медь и цинк, помимо природного происхождения, являются характерными компонентами бытовых стоков и попадают в водотоки в результате хозяйственной деятельности, отражая техногенное и антропогенное воздействие на биотопы (Христофорова и др., 2018a).

Медь является важным эссенциальным элементом, однако она оказывает токсическое действие на гидробионтов, если ее концентрации превышают потребности организма. Токсичность Cu сильно зависит от качества воды (Playle et al., 1992; Sciera et al., 2004). У рыб и наземных позвоночных печень является основным органом, участвующим в гомеостазе и метаболизме Cu (Cousins, 1985; Crosell and Wood, 2002). После захвата жабрами и всасывания медь выводит-

² ГОСТ 26929–94, 1994. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов.



Рис. 1. Места сбора проб нерки на Камчатке и горбуши на Сахалине.

ся через печень, хранится в Cu-белковых комплексах или выбрасывается с желчью (Crosell and Wood, 2002; Handy, 1996).

Основные пути поступления цинка, как и других микроэлементов из воды – через жабры и с пищей; главным путем всасывания Zn как у пресноводных, так и у морских рыб является желудочно-кишечный тракт (Spry et al., 1988). Цинк, содержащийся в воде, также является потенциальным источником этого минерала для лососевых и морских рыб, поскольку они пьют морскую воду. У рыб цинк выводится с желчью, отторжением слизистой оболочки кишечника с фекалиями и через жабры (Lall and Bishop, 1977; Pentreath, 1973).

Как показывают данные анализа (Табл. 1), в тканях восточнокамчатской нерки концентрация свинца значительно ниже, чем в горбуше из Охотского моря. В то же время для нее характерны гораздо более высокие уровни содержания цинка и меди, а также железа и кадмия в яичниках и печени, хотя среднее значение последнего элемента в печени отличается очень высокой дисперсией. Низкая концентрация свинца у нерки дает основание полагать, что лососи не проходили через импактную зону и не нагуливались в прикурильских водах, а уходили в открытые воды (скорее всего, Берингова моря) из своих заливов и в них же возвращались перед заходом в реки. Как было показано нами ранее, концентрации микроэлементов в горбуше, выловленной в р. Фирсовке (залив Терпения), свидетельствуют о ее зимовке в океане. В горбуше же из зал. Анива, зимующей в Японском море, выявлено высокое содержание Zn, Cu, а также Ni, что говорит и об антропогенной нагрузке на акваторию этого замкнутого моря и о высоком трафике судов, рабо-

Табл. 1. Содержание микроэлементов в нерке из заливов юго-восточной Камчатки и горбуше из заливов юга Сахалина, мкг/г сырой массы. Полу жирным шрифтом выделены наиболее высокие значения концентраций каждого элемента в органах и тканях; «-» – показатель не определяли. ПДК (мкг/г сырой массы) в морепродуктах: Pb – 1.0, Cd – 0.21³.

Органы и ткани	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb	Fe
Нерка, Авачинский залив, 2021 г.; диапазон массы тела 1200–2330 г						
Мышцы	5.33 ± 0.63	0.62 ± 0.13	0.43 ± 0.09	0.010 ± 0.007	0.10 ± 0.08	7.91 ± 3.35
Печень	47.18 ± 5.51	260.71 ± 95.31	0.39 ± 0.19	1.310 ± 0.560	0.22 ± 0.09	250.29 ± 73.17
Семенники	18.63 ± 1.35	0.91 ± 0.12	0.31 ± 0.18	0.011 ± 0.005	0.34 ± 0.06	7.62 ± 3.22
Яичники	46.35 ± 4.26	59.16 ± 6.27	0.61 ± 0.27	0.034 ± 0.020	0.08 ± 0.04	33.63 ± 7.16
Нерка, Камчатский залив, 2021 г.; диапазон массы тела 1650–3280 г						
Мышцы	6.20 ± 2.28	0.99 ± 0.37	0.31 ± 0.15	0.006 ± 0.003	0.16 ± 0.06	6.85 ± 4.42
Печень	41.4 ± 9.38	173.57 ± 88.93	0.33 ± 0.12	0.820 ± 0.650	0.21 ± 0.08	171.52 ± 55.71
Семенники	20.89 ± 3.66	1.69 ± 0.77	0.28 ± 0.15	0.014 ± 0.008	0.27 ± 0.09	25.34 ± 6.49
Яичники	40.70 ± 11.03	60.84 ± 12.47	0.32 ± 0.15	0.010 ± 0.006	0.21 ± 0.06	23.37 ± 6.42
Горбуша, о-в Сахалин, залив Терпения, 2016 г.; диапазон массы тела 780–2100 г. (Христофорова и др., 2019а)						
Мышцы	1.74 ± 0.06	0.20 ± 0.04	0.09 ± 0.01	0.080 ± 0.000	0.59 ± 0.05	-
Печень	2.86 ± 0.06	0.28 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.190 ± 0.020	0.92 ± 0.04	-
Семенники	2.76 ± 0.02	0.26 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.120 ± 0.010	0.87 ± 0.01	-
Яичники	2.51 ± 0.06	0.25 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.110 ± 0.020	0.82 ± 0.04	-
Горбуша, о-в Сахалин, залив Анива, 2019 г.; диапазон массы тела 1027–1508 г. (Литвиненко и др., 2022)						
Мышцы	6.45 ± 0.89	0.21 ± 0.16	0.83 ± 0.17	0.008 ± 0.008	0.15 ± 0.03	4.7 ± 1.0
Печень	37.29 ± 6.72	44.20 ± 28.69	0.77 ± 0.25	0.570 ± 0.307	0.19 ± 0.06	84.7 ± 31.4
Семенники	16.57 ± 1.32	0.29 ± 0.13	0.71 ± 0.24	0.016 ± 0.001	0.24 ± 0.05	9.8 ± 2.8
Яичники	24.55 ± 2.19	5.39 ± 0.27	1.20 ± 0.17	0.006 ± 0.012	0.25 ± 0.07	22.1 ± 2.2

³ СанПиН 2.3.2.1078-01, 2002. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов.

тающих на углеводородном топливе (Литвиненко и др., 2021). При его сжигании в окружающую среду поступает большой набор химических элементов, среди которых заметно преобладают Ni и V (Христофорова и др., 2018a, b).

В печени как камчатской нерки, так и анивской горбуши доминирует железо, самый распространенный в среде и биоте микроэлемент. Наименьшая концентрация, особенно в мышцах, отмечена для кадмия, однако он тоже заметно аккумулируется в печени обоих видов рыб, превышая ПДК для морепродуктов в несколько раз⁴. Наименьшие концентрации микроэлементов наблюдаются в мышечных тканях независимо от места вылова нерки. В икре содержание Zn, Cu и Fe значительно выше, чем в мышцах, что согласуется с исследованиями других авторов (Scalecki et al., 2020; Torus et al., 2017). Наблюдаются также существенные различия концентрации некоторых элементов в зависимости от пола. Так, содержание Zn и особенно Cu в икре в несколько раз выше, чем в семенниках самцов (Рис. 2).

Согласно полученным результатам, анадромная нерка из Авачинского и Камчатского заливов имеет более высокие концентрации железа, меди и цинка, чем сахалинская горбуша, особенно пришедшая в р. Фирсовку (залив Терпения), что может свидетельствовать о более интенсивной антропогенной и терригенной нагрузке на места выроста и нагула нерки (Рис. 3). Разные уровни концентраций ионов металлов в лососях отражают географические различия в условиях среды (Khristoforova et al., 2019a). В каких именно речных и озерных системах выростала нерка, однозначно сказать нельзя. Несомненно, что на характере окружающей ее среды сказался и терригенный сток многочисленных рек, дренирующих обширную территорию, и вулканогенное влияние, и, конечно, антропогенное (самые крупные города Петропавловск-Камчатский, Елизово, Вилючинск, где проживает большинство населения, расположены на крайнем юго-востоке Камчатского по-

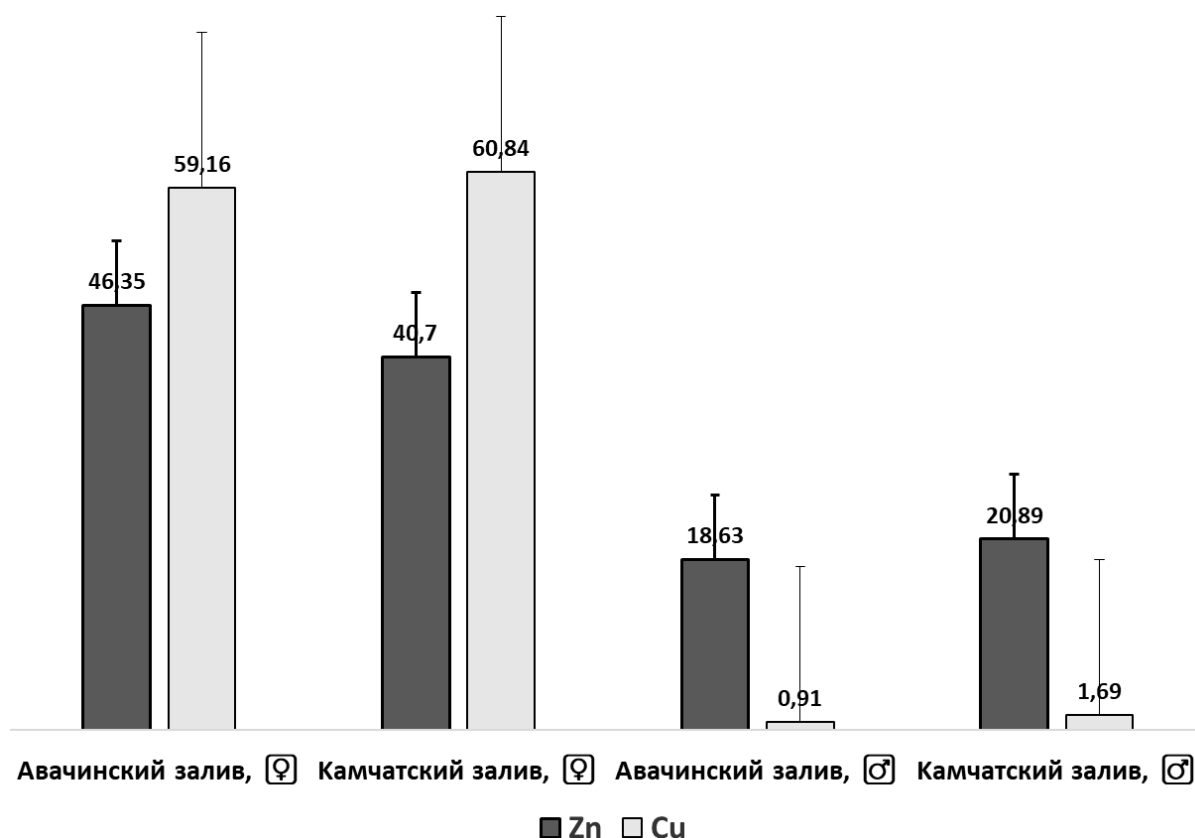


Рис. 2. Различия в содержании цинка и меди в печени и гонадах самок и самцов нерки из юго-восточных заливов Камчатки, мкг/г сырой массы.

⁴ СанПин 2.3.2.1078-01, 2002. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов.

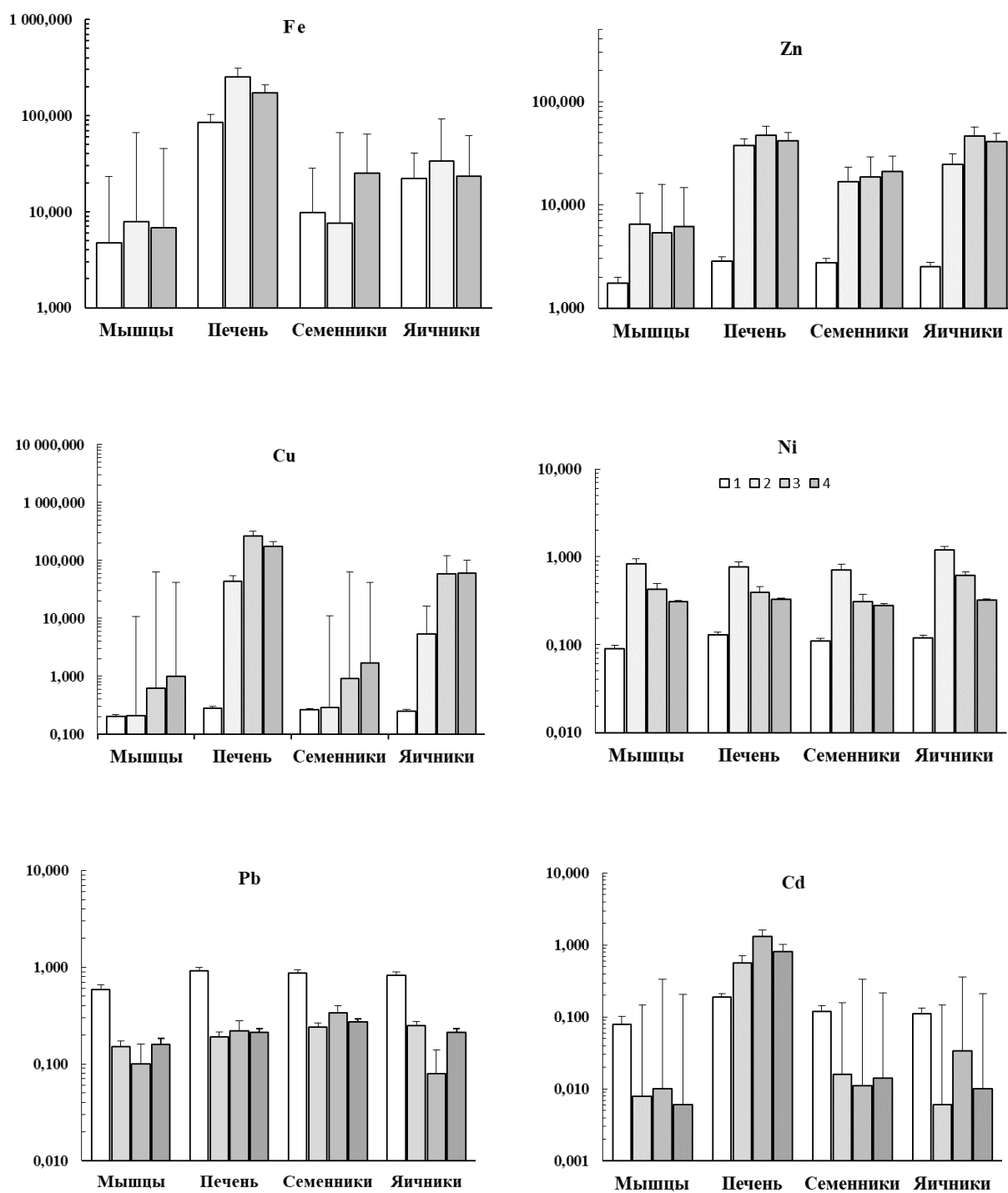


Рис. 3. Содержание микроэлементов в органах и тканях горбуши и нерки, мкг/г сырой массы.

луострова). Воздействие этих факторов заметно проявляется, по меньшей мере на уровне тенденций. Кроме того, влияние действующих вулканов (Вилючинского, Авачинского и Корякского), «нависающих» над Авачинским заливом, также обнаруживается в более высоких концентрациях металлов (прежде всего Fe, Cu и даже Cd) в мягких тканях авачинской нерки по сравнению с камчатской (Хрусталева и др., 2020). Вулканогенное влияние на окружающую среду отмечали и исследователи почв Камчатки. По их данным, содержание валовой меди в почвах юго-востока полуострова колеблется от 13 до 100 мг/кг и составляет в среднем 33 мг/кг, что почти в 1.5 раза превышает кларковое значение (20 мг/кг) (Заварихина и Литвиненко, 2011).

Заключение

На микроэлементном составе нерки из двух восточно-камчатских заливов, по-видимому, сказывается как терригенное и вулканогенное, так и антропогенное влияние. Судя по всему, эти воздействия в основном происходили еще в пресноводный (до выхода на нагул в море) период ее онтогенеза.

Выполненные ранее исследования по содержанию некоторых металлов в тканях и органах горбуши, а также аналогичные данные, впервые полученные по анадромной восточно-камчатской нерке, позволяют подтвердить литературные сведения о том, что районы морского нагула этих видов рыб не совпадают и условия среды по-разному влияют на формирование их минерального состава.

Важно также подчеркнуть, что вулканическая деятельность сказывается на микроэлементном составе как горбуши, так и нерки. Для горбуши, зимующей в океане, воздействие вулканизма и апвеллингов происходит при переходе через геохимически импактную и в то же время высококормную Курило-Камчатскую зону и выявляется по заметному преобладанию в ней свинца. В то же время для нерки с длительным периодом пребывания в пресных водоемах и водотоках, дренирующих районы, прилегающие к наземным вулканам Камчатки, это влияние обнаруживается, прежде всего, по повышенным концентрациям в ее органах и тканях таких элементов, как медь и цинк.

Список литературы

- Бирман, И.Б., 1967. Лососи в морском периоде жизни. В: Расс, Т.С. (ред.). *Биология Тихого океана. Рыбы открытых вод*. Наука, Москва, СССР, 67–87.
- Бирман, И.Б., 1985. Морской период жизни и вопросы динамики стада тихоокеанских лососей. Агропромиздат, Москва, СССР, 208 с.
- Бугаев, В.Ф., 1995. Азиатская нерка. Колос, Москва, Россия, 464 с.
- Бугаев, В.Ф., 2007. Рыбы бассейна реки Камчатки (численность, промысел, проблемы). Камчатпресс, Петропавловск-Камчатский, Россия, 192 с.
- Бугаев, А.В., Растягаева, Н.А., Ромаденкова, Н.Н., Кудзина, М.А., Давидюк, Д.А. и др., 2015. Результаты многолетнего биологического мониторинга тихоокеанских лососей рыбозаводных заводов Камчатского края. *Известия ТИНРО* **180**, 273–309.
- Заварихина, Л.В., Литвиненко, Ю.С., 2011. Генетические и геохимические особенности почв Камчатки. Наука, Москва, Россия, 45 с.
- Коновалов, С.М., 1980. Популяционная биология тихоокеанских лососей. Наука, Ленинград, СССР, 237 с.
- Литвиненко, А.В., Христофорова, Н.К., 2020. Отражение геохимических условий среды на микроэлементном составе тихоокеанских лососей. *Сборник VIII Международной научной конференции «Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов» в рамках Балтийского морского форума*. Калининград, Россия, 139–147.
- Литвиненко, А.В., Христофорова, Н.К., Цыганков, В.Ю., Ковальчук, М.В., 2021. Микроэлементный состав западносахалинской кеты. *Сборник международной научной конференции, посвященной 150-летию Севастопольской биологической станции – Института биологии южных морей*

им. А.О. Ковалевского и 45-летию НИС «Профессор Водяницкий» «Изучение водных и наземных экосистем: история и современность». Севастополь, Россия, 403 с.

Литвиненко, А.В., Христофорова, Н.К., Цыганков, В.Ю., 2022. Влияние мест нагула на содержание тяжелых металлов в горбуше (*Oncorhynchus gorbuscha*, Salmonidae). *Вестник Камчатского технического государственного университета* **62**, 52–78. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2022-62-98-116>

Христофорова, Н.К., Цыганков, В.Ю., Боярова, М.Д., Лукьянова, О.Н., 2015. Содержание микроэлементов в тихоокеанских и атлантических лососях. *Океанология* **55** (5), 751–758. <https://doi.org/10.7868/S0030157415050068>

Христофорова, Н.К., Емельянов, А.А., Ефимов, А.В., 2018а. Биоиндикация загрязнения прибрежно-морских морских вод о. Русского (залив Петра Великого, Японское море) тяжелыми металлами. *Известия ТИНРО* **192**, 157–166. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-192-157-166>

Христофорова, Н.К., Литвиненко, А.В., Цыганков, В.Ю., Ковальчук, М.В., 2018b. Сравнение микроэлементного состава горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 из Сахалино-Курильского региона и Японского моря. *Материалы Международной конференции «Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей», Петропавловск-Камчатский, 14–15.11.2018*. Камчатпресс, Петропавловск-Камчатский, Россия, 386–390.

Хрусталева, А.М., Углова, Т.Ю., Ксенофонтова, А.А., Ксенофонтов, Д.А., Кловач, Н.В., 2020. Содержание макро- и микроэлементов в тканях нерки из водоемов полуострова Камчатка. *Труды ВНИРО* **179**, 26–36. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2020-179-26-36>

Шунтов, В.П., Темных, О.С., 2008. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Т. 1. ТИНРО-центр, Владивосток, Россия, 481 с.

Шунтов, В.П., Темных, О.С., 2011. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Т. 2. ТИНРО-центр, Владивосток, Россия, 473 с.

Cousins, R.J., 1985. Absorption, transport, and hepatic metabolism of copper and zinc: Special reference to metallothionein and ceruloplasmin. *Physiological Reviews* **65**, 238–309. <https://doi.org/10.1152/physrev.1985.65.2.238>

Crosell, M., Wood, C.M., 2002. Copper uptake across rainbow trout gills: Mechanisms of apical entry. *Journal of Experimental Biology* **205**, 1179–1188. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.8.1179>

Handy, R.D., 1996. Dietary exposure to trace metals in fish. In: Taylor, E.W. (ed.), *Toxicology of Aquatic Pollution*. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 29–60.

Khristoforova, N.K., Litvinenko, A.V., Tsygankov, V.Yu., Kovalchuk, M.V., Erofeeva, N.I., 2019a. The trace-element content in the pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) from the Sakhalin-Kuril region. *Russian Journal of Marine Biology* **45** (3), 221–227. <https://doi.org/10.1134/S1063074019030064>

Khristoforova, N.K., Litvinenko, A.V., Tsygankov, V.Yu., Kovalchuk, M.V., Erofeeva, N.I., 2019b. Trace elements content in the Pink Salmon (*Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792) from Sakhalin-Kuril Region. *Document on the Second NPAFC-IYS Workshop on Salmon Ocean Ecology in a Changing Climate, Technical Report*. Portland, Oregon, USA, 59–62.

Khristoforova, N.K., Litvinenko, A.V., Tsygankov, V.Yu., Kovalchuk, M.V., 2021. Comparative characteristics of the trace elemental composition of Chum Salmon *Oncorhynchus keta* Walbaum, 1792 from the Sea of Japan and the sea of Okhotsk. *Marine Biological Journal* **6** (4), 92–104. <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.4.08>

- Lall, S.P., Bishop, F.J., 1977. Studies on mineral and protein utilization by Atlantic salmon grown in seawater. *Fisheries and Marine Service, Environment Canada, Technical Report 688*, 16 p.
- Pentreath, R.J., 1973. The accumulation and retention of ⁶⁵Zn and ⁵⁴Mn by the plaice, *Pleuronectes platessa* L. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **12**, 1–18.
- Playle, R., Gensemer, R., Dixon, D., 1992. Copper accumulation on gills of fathead minnows – influence of water hardness, complexation, and pH of the gill micro-environment. *Environmental Toxicology and Chemistry* **11**, 381–391. <https://doi.org/10.1002/etc.5620110312>
- Scalecki, P., Florek, M., Kedzierska-Matysek, M., Poleszak, E., Domaradski, P., Kaliniak-Dziura A., 2020. Mineral and trace element composition of the roe and muscle tissue of farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with respect to nutrient requirements: Elements in rainbow trout products. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* **62**, 126619 p. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126619>
- Sciera, K.L., Isley, J., Tomasso, J.R., Klaine, S.J., 2004. Influence of multiple water-quality characteristics on copper toxicity to fathead minnows (*Pimephales promelas*). *Environmental Toxicology and Chemistry* **23** (12), 2900–2905. <https://doi.org/10.1897/03-574.1>
- Spry, D.I., Hodson, P.V, Wood, C.M., 1988. Relative contributions of dietary and waterborne zinc in rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **45**, 32–41. <https://doi.org/10.1139/f88-005>
- Topus, O.K., Yerlikaya, P., Yatmaz, H.A., Kaya, A., Aip, A.C., 2017. Comparison of essential trace element profiles of rainbow trout fish (*Oncorhynchus mykiss*) meat and egg. *Scientific Papers Series D. Animal Science* **21**(2) 312–315.

References

- Birman, I.B., 1967. Lososi v morskome periode zhizni [Salmon in the sea period of life]. In: Rass, T.S. (ed.), *Biologiya Tikhogo okeana. Ryby okrytykh vod* [Biology of the Pacific Ocean. Fish of open waters]. Nauka, Moscow, USSR, 67–87. (In Russian).
- Birman, I.B., 1985. Morskoi period zhizni i voprosy dinamiki stada tikhookeanskikh lososei [Marine period of life and issues of the dynamics of the Pacific salmon herd]. Agropromizdat, Moscow, USSR, 208 p. (In Russian).
- Bugaev, V.F., 1995. Aziatskaya nerka [Asian sockeye]. Kolos, Moscow, Russia, 464 p. (In Russian).
- Bugaev, V.F., 2007. Ryby basseina reki Kamchatki (chislennost', promysel, problemy) [Fishes of the Kamchatka River Basin (numbers, fishery, problems)]. Kamchatpress, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 192 p. (In Russian).
- Bugaev, A.V., Rastyagaeva, N.A., Romadenkova, N.N., Kudzina, M.A., Davidiuk, D.A. et al., 2015. Rezul'taty mnogoletnego biologicheskogo monitoringa tikhookeanskikh lososei rybovodnykh zavodov Kamchatskogo kraja [Results of long-term biological monitoring of Pacific salmon from fish hatcheries in the Kamchatka Territory]. *Izvestiya TINRO [Bulletin of the Pacific Fisheries Research Center]* **180**, 273–309. (In Russian).
- Cousins, R.J., 1985. Absorption, transport, and hepatic metabolism of copper and zinc: Special reference to metallothionein and ceruloplasmin. *Physiological Reviews* **65**, 238–309. <https://doi.org/10.1152/physrev.1985.65.2.238>
- Crosell, M., Wood, C.M., 2002. Copper uptake across rainbow trout gills: Mechanisms of apical entry. *Journal of Experimental Biology* **205**, 1179–1188. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.8.1179>

- Handy, R.D., 1996. Dietary exposure to trace metals in fish. In: Taylor, E.W. (ed.), *Toxicology of Aquatic Pollution*. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 29–60.
- Khristoforova, N.K., Tsygankov, V.Yu., Boiarova, M.D., Luk'ianova, O.N., 2015. Soderzhanie mikroelementov v tikhoookeanskikh i atlanticheskikh lososyakh [Trace element content in Pacific and Atlantic salmon]. *Okeanologiya [Oceanology]* **55** (5), 751–758. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0030157415050068>
- Khristoforova, N.K., Emel'yanov, A.A., Efimov, A.V., 2018a. Bioindikatsiya zagryazneniya pribrezhnomorskikh vod o. Russkogo (zaliv Petra Velikogo, Yaponskoe more) tyazhelymi metallami [Bioindication of pollution of coastal sea waters of Russky Island (Peter the Great Bay, Sea of Japan) with heavy metals]. *Izvestiya TINRO [Bulletin of the Pacific Fisheries Research Center]* **192**, 157–166. (In Russian). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-192-157-166>
- Khristoforova, N.K., Litvinenko, A.V., Tsygankov, V.Yu., Koval'chuk, M.V., 2018b. Sravnenie mikroelementnogo sostava gorbushi *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 iz Sakhalino-Kuril'skogo regiona i Yaaponskogo morya [Comparison of trace element composition of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 from the Sakhalin-Kuril region and the Sea of Japan.]. *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii "Sokhranenie bioraznoobraziya Kamchatki i prilegayushchikh morei" [Proceedings of international conference "Preservation of the biodiversity of Kamchatka and adjacent seas"]*, Petropavlovsk-Kamchatsky, November 14–15, 2018). Kamchatpress, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 386–390. (In Russian).
- Khristoforova, N.K., Litvinenko, A.V., Tsygankov, V.Yu., Kovalchuk, M.V., Erofeeva, N.I., 2019a. The trace-element content in the pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) from the Sakhalin-Kuril region. *Russian Journal of Marine Biology* **45** (3), 221–227. <https://doi.org/10.1134/S1063074019030064>
- Khristoforova, N.K., Litvinenko, A.V., Tsygankov, V.Yu., Kovalchuk, M.V., Erofeeva, N.I., 2019b. Trace elements content in the Pink Salmon (*Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792) from Sakhalin-Kuril Region. *Document on the Second NPAFC-IYS Workshop on Salmon Ocean Ecology in a Changing Climate, Technical Report*. Portland, Oregon, USA, 59–62.
- Khristoforova, N.K., Litvinenko, A.V., Tsygankov, V.Yu., Kovalchuk, M.V., 2021. Comparative characteristics of the trace elemental composition of Chum Salmon *Oncorhynchus keta* Walbaum, 1792 from the Sea of Japan and the sea of Okhotsk. *Marine Biological Journal* **6** (4), 92–104. <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.4.08>
- Khrustaleva, A.M., Uglova, T.Yu., Ksenofontova, A.A., Ksenofontov, D.A., Klovach, N.V., 2020. Soderzhanie makro- i mikroelementov v tkanyakh nerki iz vodoemov poluoostrova Kamchatka [The content of macro- and microelements in the tissues of sockeye salmon from water bodies of the Kamchatka Peninsula]. *Trudy VNIRO [Proceedings of All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography]* **179**, 26–36. (In Russian). <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2020-179-26-36>
- Konovalov, S.M., 1980. Populyacionnaya biologiya tikhoookeanskikh lososei [Population biology of Pacific salmon]. Nauka, Leningrad, USSR, 237 p. (In Russian).
- Lall, S.P., Bishop, F.J., 1977. Studies on mineral and protein utilization by Atlantic salmon grown in seawater. *Fisheries and Marine Service, Environment Canada, Technical Report* **688**, 16 p.
- Litvinenko, A.V., Khristoforova, N.K., 2020. Otrazhenie geokhimicheskikh uslovii sredy na mikroelementnom sostave tikhoookeanskikh lososei [Reflection of geochemical environmental conditions on the trace element composition of Pacific salmon]. *Sbornik VIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Vodnye bioresursy, akvakul'tura i ekologiya vodoemov" v ramkakh Baltiiskogo morskogo foruma [Materials of the VIII International scientific conference "Aquatic bioresources, aquaculture and ecology of water bodies" within the framework of the Baltic Sea Forum]*. Kaliningrad, Russia, 139–147. (In Russian).

- Litvinenko, A.V., Khristoforova, N.K., Tsygankov, V.Yu., Koval'chuk, M.V., 2021. Mikroelementnyi sostav zapadnosakhalinskoi kety [Trace element composition of the West Sakhalin chum salmon]. *Sbornik mezhdunarodboi nauchnoi konferentsii, posvjashchennoi 150-letiyu Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii – Instituta biologii yuzhnykh morei im. A.O. Kovalevskogo i 45-letiyu NIS "Professor Vodyanitskii" "Izuchenie vodnykh i nazemnykh ekosistem: istoriya i sovremennost'"* [Materials of international scientific conference, dedicated to 150th anniversary of the Sevastopol biological station – A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas and the 45th anniversary of the research vessel "Professor Vodyanitsky" "Study of aquatic and terrestrial ecosystems: history and modernity"]. Sevastopol', Russia, 403 p. (In Russian).
- Litvinenko, A.V., Khristoforova, N.K., Tsygankov, V.Yu. 2022. Vliyanie mest nagula na sodержanie tyzhelykh metallov v gorbushe (*Oncorhynchus gorbuscha*, Salmonidae) [Influence of feeding places on the content of heavy metals in pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*, Salmonidae)] *Vestnik Kamchatskogo tekhnicheskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Kamchatka Technical State University] **62**, 52–78. (In Russian). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2022-62-98-116>
- Pentreath, R.J., 1973. The accumulation and retention of 65Zn and 54Mn by the plaice, *Pleuronectes platessa* L. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **12**, 1–18.
- Playle, R., Gensemer, R., Dixon, D., 1992. Copper accumulation on gills of fathead minnows – influence of water hardness, complexation, and pH of the gill micro-environment. *Environmental Toxicology and Chemistry* **11**, 381–391. <https://doi.org/10.1002/etc.5620110312>
- Scalecki, P., Florek, M., Kedzierska-Matysek, M., Poleszak, E., Domaradski, P., Kaliniak-Dziura A., 2020. Mineral and trace element composition of the roe and muscle tissue of farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with respect to nutrient requirements: Elements in rainbow trout products. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* **62**, 126619 p. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126619>
- Sciera, K.L., Isley, J., Tomasso, J.R., Klaine, S.J., 2004. Influence of multiple water-quality characteristics on copper toxicity to fathead minnows (*Pimephales promelas*). *Environmental Toxicology and Chemistry* **23** (12), 2900–2905. <https://doi.org/10.1897/03-574.1>
- Shuntov, V.P., Temnykh, O.S., 2008. Tikhookeanskije lososi v morskikh i okeanicheskikh ekosistemakh. T. 1 [Pacific salmon in marine and ocean ecosystems. Vol. 1]. Pacific Fisheries Research Center, Vladivostok, Russia, 481 p. (In Russian).
- Shuntov, V.P., Temnykh, O.S., 2011. Tikhookeanskije lososi v morskikh i okeanicheskikh ekosistemakh. T. 2 [Pacific salmon in marine and ocean ecosystems. Vol. 2]. Pacific Fisheries Research Center, Vladivostok, Russia, 473 p. (In Russian).
- Spry, D.I., Hodson, P.V., Wood, C.M., 1988. Relative contributions of dietary and waterborne zinc in rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **45**, 32–41. <https://doi.org/10.1139/f88-005>
- Topus, O.K., Yerlikaya, P., Yatmaz, H.A., Kaya, A., Aip, A.C., 2017. Comparison of essential trace element profiles of rainbow trout fish (*Oncorhynchus mykiss*) meat and egg. *Scientific Papers Series D. Animal Science* **21**(2) 312–315.
- Zavarikhina, L.V., Litvinenko, Yu.S., 2011. Geneticheskie i geokhimicheskie osobennosti pochv Kamchatki [Genetic and geochemical features of Kamchatka soils]. Nauka, Moscow, Russia, 45 p. (In Russian).