

МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ГОРБУШИ ИЗ РЕК БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО И ОХОТОМОРСКОГО БАССЕЙНОВ

©2023 Христофорова Н.К.^{a,b}, Литвиненко А.В.^{c,*}, Алексеев М.Ю.^d, Цыганков В.Ю.^a

^a Институт Мирового океана, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690091, Россия

^b Тихоокеанский институт географии РАН, Владивосток, 690041, Россия

^c Институт естественных наук и техносферной безопасности, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, 693008, Россия

^d Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО», Мурманск, 183038, Россия

*e-mail: litvinenko.av@bk.ru

Поступила в редакцию 18.09.2022. После доработки 20.03.2023. Принята к публикации 10.05.2023

Определены концентрации Pb, Cd, Ni, Cu и Zn в горбуше-вселенце, зашедшей на нерест в реки Кола и Тулома Кольского п-ова, впадающие в Баренцево море, в июле 2019 г. Проведено сравнение содержания микроэлементов в органах и тканях горбуши, интродуцированной в Евро-Арктических водах России, и горбуши из её естественного ареала, вернувшейся для нереста в реки островов Сахалин и Итуруп в 2016–2018 гг. Установлено, что во всех органах и тканях баренцевоморской горбуши заметно преобладают концентрации Zn, Cu и Ni, в охотоморской горбуше – Pb и Cd. Очевидно, что различия в микроэлементном составе рыб вызваны условиями нагула. В Баренцевом море они формируются под влиянием Гольфстрима, а также антропогенно-техногенного воздействия Кольского п-ова, характеризующегося добычей, переработкой и выплавкой ряда металлов, прежде всего, Ni и Cu, а также Zn. В Сахалино-Курильском бассейне микроэлементный состав лососей формируется под влиянием природных факторов – вулканизма и апвеллингов. Стада горбуши во время нагула и миграций в Тихом океане пересекают высококормную и в то же время геохимически импактную природную зону, образуемую Курильской грядой и Курило-Камчатской впадиной, поставляющей химические элементы в поверхностные воды. Здесь в рыбе наиболее заметно повышена концентрация Pb. Освоению интродуцированной горбушей нового региона способствует происходящий в последние годы рост температуры в водах Северной Атлантики, поэтому количество рыбопродукции в ней будет расти. Овладение горбушей новых районов обитания ставит перед наукой задачи наблюдения за динамикой её численности, принятия адекватных мер по регулированию промысла и контроля качества рыбы.

Ключевые слова: тихоокеанские лососи, горбуша, микроэлементы, Кольский полуостров, Баренцево море, Охотское море.

DOI: 10.35885/1996-1499-16-2-272-287

Введение

В последнее десятилетие общий вылов тихоокеанских лососей рода *Oncorhynchus* в российских тихоокеанских водах ежегодно превышает 350 тыс. т, в 2018 г. он достиг рекордного количества – 686 тыс. т. Эти рыбы играют важную роль в экономике России благодаря своей высокой пищевой и товарной ценности, причём для отдельных районов Дальнего Востока, например, Сахалинской обл. и Камчатского края, лососёвое рыболовство, искусственное воспроизводство и переработка уловов, как главные отрасли рыбного хозяйства, являются основой экономики и занятости населения. Наиболее многочисленным видом тихоокеанских лососей, как по

азиатскому, так и по американскому побережью Северной Пацифики, является горбуша (*O. gorbuscha*). В российских водах этот вид лососей имеет основное промысловое значение.

В реках Евро-Арктического региона горбуша «закрепилась» в начале 1980-х гг., несмотря на многочисленные попытки Главрыбвода СССР интродуцировать этот вид с Дальнего Востока, начиная с 1930-гг. Тогда предполагали, что горбуша освоит резервную кормовую базу Белого моря и не будет совершать дальних миграций.

Только после завоза в 1985 г. икры горбуши, взятой от производителей из р. Ола Магаданской обл., удалось добиться устой-

чивых заходов горбуши нечётной линии. На протяжении десятилетий над искусственным воспроизводством этого вида трудились несколько рыболовных заводов Кольского п-ова. В течение десятилетнего периода она распространилась по всем рекам Белого моря [Алтухов и др., 1997; Салменкова, 2016].

Начиная с 2003 г. популяция горбуши воспроизводится самостоятельно, без участия рыболовов. И в настоящее время можно утверждать, что вид, по крайней мере, его линия нечётных лет, прижился в условиях «нового ареала» [Гордеева и др., 2015].

В последние 20 лет количество горбуши нечётной линии в реках Кольского п-ова значительно выросло. Промышленное освоение её в Мурманской обл. всеми направлениями лова имеет значительную перспективу развития, поскольку запас нечётной линии быстро растёт. По данным официальной статистики, общий вылов в 2015 г. составил 160 т, в 2017 г. – 280 т, в 2019 – 380, в 2021 – более 600 т [Состояние запасов..., 2021].

Производители горбуши мигрируют не только в российские реки бассейнов Баренцева и Белого морей, но и в реки ряда североевропейских государств, где горбушу считают опасным вселенцем, угрозой для атлантического лосося, призывая общественность предпринимать всевозможные меры для уничтожения «вида-оккупанта» [Pettit, 2017; Nielsen et al., 2020]. Негативному восприятию горбуши в новом районе обитания в немалой степени способствует и современный взгляд на межрегиональную интродукцию животных, согласно которому любое перемещение за пределы естественного ареала определяется не иначе как биологическое загрязнение (инвазия) [Зеленников и др., 2006].

Публикации в изданиях стран Североатлантического бассейна: Норвегии, Исландии, Дании, Ирландии, Великобритании, Франции, Германии, сообщают, что горбуша-вселенец к настоящему времени широко распространилась в их морских и внутренних пресных водах [Whelan, 2017; Sandlund et al., 2019; Paulsen et al., 2021]. Имеются сведения о проникновении горбуши в реки Канады и Гренландии [Whelan, 2017; Assessment of the risk..., 2020]. В пределах морских аква-

торий этих государств, а также в реках стали частыми поимки рыб этого вида. Из-за высокого стресса, характерного для горбуши, уже после первых выпусков её молоди, полученной от завезённой на Кольский п-ов икры, единичные экземпляры рыб, возвращающихся на нерест, практически сразу начали отмечать в реках многих стран [Азбелев, Яковенко, 1963; Алексеев и др., 2019], однако вспышка численности пришлась на последние годы [Sandlund et al., 2019]. Тем не менее, относительно небольшое количество зафиксированных поимок (десятки или сотни экземпляров) даёт основание полагать, что лишь незначительная доля вселенцев заходит в реки североатлантических государств на нерест. Основное же количество производителей горбуши мигрирует на нерест в реки Кольского п-ова, где её численность в нечётные годы оценивают в сотни тысяч экземпляров [Состояние запасов..., 2021].

Для решения задач по управлению запасами вселенца вызывает несомненный интерес вопрос о районах нагула и путях морских миграций горбуши, интродуцированной в реки Кольского п-ова, который на сегодняшний день изучен крайне слабо.

Если результативные программы мечения молоди атлантического лосося (сёмги) естественного и заводского происхождения в реках осуществлялись неоднократно [Азбелев, Лагунов, 1956; Бакштанский, Нестеров, 1973; Бакштанский и др., 1976; и др.], то к интродуцированной горбуше до настоящего времени современных методик мечения рыб не применяли.

Наиболее вероятно, что горбуша распространяется на той же акватории, что и сёмга. Районы нагула и миграций производителей и постсмортов атлантического лосося (как и, предположительно, горбуши) из рек Кольского п-ова находятся, преимущественно, в Норвежском море. Область нагула – тёплое Норвежское течение, являющееся северной ветвью Гольфстрима. Миграции интродуцированной горбуши к местам морского нагула документально не подтверждены, но, по-видимому, её молодь, может мигрировать теми же путями, что и молодь атлантического лосося, используя энергию морских течений.

Рассматривая возможные пути миграций постсмолтов сёмги из баренцевоморских рек Кольского п-ова, Г.Г. Новиков и К.В. Кузищин [1990] предположили, что они могут мигрировать сначала не в западном, а в восточном и северо-восточном направлении, к берегам Новой Земли, и далее – по струям западной ветви Новоземельского течения. В то же время известно, что осенью-зимой подросшие экземпляры скатившейся из рек сёмги встречались в уловах на восток до о. Колгуев в поверхностном слое (0–10 м) [Шестопа, 1976]. Дальнейшее её передвижение может проходить вдоль стыка холодных и тёплых течений вдоль берегов Новой Земли, Земли Франца-Иосифа, Шпицбергена, после чего она попадает в Норвежское море и доходит до зоны Фарерских островов. Сроки миграции молоди из рек Кольского п-ова совпадают с началом гидрологической весны в этих районах, то есть с развитием кормовой базы. Данная гипотеза подтвердилась при анализе результатов работы российских судов в этих районах в 2002–2005 гг. по приловам постсмолтов лосося (весом до 300 г) при промысле пелагических рыб в районе островов Шпицберген, Ян-Майен и Медвежий [Зубченко, 2006]. Таким образом, постсмолты в период миграции к местам нагула используют энергию морских течений, что имеет приспособительное значение, позволяющее экономить силы. Миграции и нагул производителей и постсмолтов атлантического лосося (как и, предположительно, горбуши) из рек Кольского п-ова происходят в обширнейшей акватории: от о. Ян-Майен, Фарерских островов и побережья Норвегии на северо-западе, западе и юго-западе до Шпицбергена, Новой Земли, Колгуева и бассейна Белого моря на севере, востоке и юго-востоке, преимущественно, в Норвежском море. Область нагула – тёплое Норвежское течение, являющееся северной ветвью Гольфстрима. Норвежское течение, переходящее после мыса Нордкап в Нордкапское, «омывает» северное побережье Кольского п-ова. От этого течения отделяется ветвь – течение Дерюгина, которое входит в горло Белого моря и включается в циркуляцию его вод, выходя обратно через горло в виде течения Тимонова [Степанюк, 2019].

В коротких реках горного типа, характерных для естественного ареала горбуши, её молодь питается мало или вообще не питается [Смирнов, 1975]. Процесс адаптации к морской среде происходит быстро, и мальки начинают как расселяться вдоль побережий, так и удаляться от берегов. В эстуарной зоне молодь горбуши держится от 2 до 7 дней, где она интенсивно истребляется хищниками, но подросшая до массы 600–900 мг молодь уже свободно уходит от хищников и держится открытой воды [Азбелев, 1960; Веселов и др., 2016]. По мере роста молоди её эвригалинность увеличивается и, скатившись в море, молодь нагуливается при океанической солёности (34–36‰) [Зубченко и др., 2004].

В пределах естественного ареала заселение молодью горбуши открытых вод из разных районов происходит в различных направлениях. В сентябре-октябре молодь охотоморской горбуши отходит от берегов и начинает мигрировать в океан в зону Субарктического, или Полярного, фронта, располагающуюся между 40° и 45° с. ш., которая характеризуется высокой продуктивностью и является пастбищной зоной тихоокеанских лососей в зимний период. Весной горбуша перемещается в зону нагула – в прикурильские воды Тихого океана, а затем, активно кормясь, направляется на нерест в родные места [Бирман, 1986; Гриценко, 2002; Ефанов, 2003; Шунтов, Темных, 2008, 2011]. Нагуливаясь, выходя на зимовку и мигрируя на нерест, рыбы могут неоднократно появляться в высококормном Курило-Камчатском регионе. Этот район имеет импактные геохимические условия, создаваемые подводным и надводным вулканизмом и апвеллингами, выносящими из глубин Курило-Камчатского жёлоба биогенные и другие элементы [Христофорова и др., 2019].

Представления о путях миграции и местах нагула горбуши помогают получить исследования акваторий, где возможно поступление в её организм тяжёлых металлов. Известно, что водные системы являются коллекторами всех видов загрязнения, как в региональном, так и в глобальном масштабах. Добытые из недр Земли и обогащённые в технологических циклах, многие элементы в окружаю-

щей среде формируют техногенные биогеохимические провинции [Ермаков, 2017]. Присутствие тяжёлых металлов в донных отложениях Баренцева моря, по мнению М.А. Новикова и А.Ю. Жилина [2016], обусловлено комплексом причин и вызвано преимущественно глобальным геохимическим фоном с некоторым вкладом региональной компоненты. Этот фон формируется, в основном, за счёт приноса растворённого и взвешенного вещества с запада Нордкапским течением.

В период морского нагула происходит поступление микроэлементов в организм рыб. Основной путь их поступления – с кормовыми объектами, другой путь – через жабры и кожу [Heath, 2002]. Речной период жизни у горбуши короткий. Выклюнувшись и выйдя из нерестового бугра, она, в отличие от кеты, нерки, симы, скатывается в море, не задерживаясь в реке и не питаясь [Шунтов, Темных, 2008; Каев, Животовский, 2017]. Следовательно, источник загрязнения следует искать в пределах морской акватории, где достоверно отмечена интродуцированная горбуша, – Баренцевом, Норвежском и Северном морях [Новиков, Драганов, 2018].

Мониторинг содержания токсичных элементов и соединений в основных промысловых видах водных биоресурсов – атлантической треске, пикше, камбалах, зубатках, беспозвоночных, проводимый Полярным филиалом ФГБНУ «ВНИРО», свидетельствует, что уровни нормируемых [СанПиН, 2002] токсичных элементов в мышцах и печени рыб не превышают допустимых концентраций, за исключением общего мышьяка [Жилин и др., 2018].

В то же время обзор данных показывает, что концентрация цинка и других тяжёлых металлов в печени ластоногих наиболее высока в водах у Южной Норвегии, Великобритании и в Балтике. Основными путями загрязнения арктической и субарктической морской экосистемы являются атмосферный перенос, океанские течения и реки [Savinova et al., 1995]. Результаты анализа печени и мышечной ткани некоторых пелагических и донных видов рыб, выловленных в прибрежных районах Балтийского моря, показали высокие концентрации тяжёлых металлов [Voigt, 1999]. Намного раньше было установлено,

что концентрации цинка, меди, свинца, кадмия и ртути в бурой водоросли *Ascophyllum nodosum* из Хардангер-фьорда, расположенного в южной Норвегии, в 20–50 раз превышали нормальные уровни [Haug et al., 1974].

В целом, тяжёлые металлы по токсикологическим оценкам «стресс-индексов» занимают второе место среди загрязняющих веществ, уступая только хлорированным углеводородам. Изменение содержания химических элементов в тканях морских рыб вследствие антропогенного воздействия происходит на фоне их природного уровня [Жилин и др., 2018; Лаптева, Плотицына, 2019].

В научной литературе сложилось стойкое представление о ведущей роли Северо-Атлантического течения в переносе загрязняющих веществ от берегов Америки и Западной Европы в Баренцево море. Установлена тенденция снижения их концентраций в направлении с запада на восток, где они, как правило, не превышают фоновых уровней [Матишов и др., 1997; Ильин и др., 2011]. Например, в западной части Баренцева моря в 2006–2007 гг. были выявлены высокие концентрации в воде (мкг/л) кадмия – 29.64, свинца – 20.36, цинка – 81.55 и меди 28.59. Превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) в морской воде по указанным металлам составляло от 1.5 до 6 раз. При движении на восток концентрации химических элементов быстро снижались [Корнеев и др., 2008]

По мнению многих исследователей, арктические экосистемы в настоящее время сталкиваются с беспрецедентными экологическими проблемами, в основном, связанными с изменением климата и загрязнением [Vox et al., 2019; Huser et al., 2020; АМАР..., 2021]. В Арктике имеются обширные залежи сульфидных руд никеля [Mudd, 2010], и добыча этого ресурса за последнее столетие привела к увеличению воздействия Ni на биоту. Сопутствующие операции по переработке и выплавке никеля, главным образом, на Кольском п-ове, вносят значительный вклад в местные уровни никеля в окружающей среде. На Кольский п-ов приходится 3% глобальных выбросов Ni в атмосферу [АМАР..., 2005].

Повышенный фон ряда тяжёлых металлов (Pb, Cd, Zn, Ni, Cr, Cu), а также As в Баренце-

вом море – естественное явление, проявляющееся как следствие залегания на Кольском и Скандинавском полуостровах руд, содержащих эти элементы. Дополнительным источником поступления служит выброс тяжёлых металлов в атмосферу металлургическими предприятиями, что играет большую роль в формировании состава окружающей среды северных морей России, чем сток впадающих рек [Виноградова, Котова, 2019]. Центральная часть Баренцева моря подвергается воздействию вод Нордкапа и Мурманских прибрежных течений, транспортирующих загрязняющие вещества из североевропейских источников, причём в этой части влияние атмосферного переноса металлов выражено более чётко [Матишов, Голубева, 1998].

Для лососей, обитающих в морской период жизни в верхнем, эпипелагическом слое, решающее значение имеет распределение микроэлементов (в частности, никеля), в толще вод: по наблюдениям Кондо и соавторов [Kondo et al., 2016], уровни этого металла, как правило, самые высокие на поверхности (менее 1 м), в верхнем смешанном слое (до глубины 50 м) и нижележащем галоклине (до 200 м), по сравнению с большими глубинами, а запасы Ni могут находиться в верхней части Северного Ледовитого океана в течение тысячелетий [Kadko et al., 2019].

Сахалино-Курильский регион Дальнего Востока по совокупности природных экологических условий является зоной оптимума в пределах естественного ареала горбуши и кеты [Литвиненко, Христофорова, 2019]. Отсутствие источников промышленного загрязнения и активная динамика северной Пацифики обеспечивают высокое качество рыбной продукции из этих вод.

Тихоокеанское огненное кольцо, начинающееся вулканами Камчатки и продолжающееся вулканами Курильских и Японских островов, а также более южных островных дуг западной Пацифики, включающее подводные и надводные вулканы, является мощным источником геохимического воздействия на морскую среду. Поставщиком химических элементов в окружающую среду являются подводный и надводный вулканизм [Мархинин, 1985] и Курило-Камчатский жёлоб,

благодаря апвеллингу выносящий на поверхность биогенные и другие элементы, формирующие импактные геохимические зоны в северо-западной части Тихого океана.

Условия биогеохимических провинций отражаются в минеральном составе организмов. Наличие в море биогеохимических провинций, определяемых по повышенным концентрациям элементов в организмах, неоднократно подтверждалось анализом содержания металлов (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr) в бурых водорослях, двустворчатых и брюхоногих моллюсках, населяющих Курильские острова и обрастающих навигационные буи вдоль северо-западного побережья Тихого океана [Кавун и др., 1989; Малиновская, Христофорова, 1997; Kavun et al., 2002]. Благодаря апвеллингу на поверхность выносятся биогенные [Пропп, Пропп, 1988; Сапожников, 1994] и другие элементы [Малиновская, Христофорова, 1997].

Цель работы: показать различие условий нагула и его отражение на содержании тяжёлых металлов в органах и тканях горбуши из рек баренцевоморского и охотоморского бассейнов.

Материалы и методы

В работе использованы данные, полученные в результате обработки проб половозрелых особей горбуши, отобранных в июле 2019 г. на рыбоучётном заграждении (РУЗ), установленном в р. Кола в 27 км от устья с целью учёта сёмги и в р. Тулома на рыбоходе Нижне-Туломской ГЭС в 12 км от устья. В каждом месте от каждой из 10 особей (пяти самок и пяти самцов) отобранные пробы гонад, печени и мышц были заморожены и доставлены во Владивосток для химического анализа. В каждом образце из отобранных органов или тканей определяли содержание Zn, Cu, Ni, Pb и Cd. Всего было проведено 600 индивидуальных измерений. Все элементы определялись из кислотных минерализатов согласно ГОСТ 26929–94 на атомно-абсорбционном спектрофотометре Shimadzu AA 6800. Точность определения содержания элементов, а также возможное загрязнение образцов во время анализа контролировали путём сравнения с калибровочными раство-

рами, в том числе с холостым (нулевым) раствором. Точность и прецизионность используемого метода подтверждались регулярным анализом стандартного образца SRM-1566a (ткань устрицы, Национальное бюро стандартов, США). Для сравнения найденных концентраций использовали полученные в более ранних (2016–2018) исследованиях собственные данные о содержании микроэлементов в органах и тканях горбуши Сахалино-Курильского региона из рек Фирсовка (залив Терпения, юго-восточный Сахалин) и Рейдовая (залив Простор, о. Итуруп). Места сбора проб в устьях рек Сахалина, Итурупа и Кольского п-ова приведены на рис. 1.

Поскольку точных сведений о происхождении горбуши из евро-арктического и сахалино-курильского регионов, взятой для исследований (для чего необходимо анализировать отоциты на предмет наличия метки) не имеется, мы предполагаем, что в обоих случаях рыба могла быть как дикой, так и заводской.

Длины АС, АД и средняя масса тела горбуши из рек бассейнов Баренцева и Охотского морей представлены в табл. 1.

Как можно видеть, интродуцированная горбуша, собранная для исследования в реках бассейна Баренцева моря Кольского п-ова, отличается от курильской горбуши из р. Рейдовая меньшими показателями длины и массы.

Горбуша с Южных Курил многими авторами описывается как отличающаяся доволь-

но крупными размерами, даже по сравнению с сахалинской рыбой. Это обусловлено её приуроченностью к территориальным комплексам, характеризующимся специфическими особенностями нерестовых водотоков (гидрологический режим рек, качество нерестилищ), прибрежных участков моря (кормовая база, термический режим) и климатическими условиями, влияющими на уровень воспроизводства.

Североохотоморская горбуша, интродукция которой, как полагает ряд авторов [Хованский, 2000; Гордеева и др., 2003; Зеленников и др., 2006; и др.], в Евро-Арктическом регионе успешно состоялась, имеет относительно небольшие размеры и массу тела по сравнению с горбушей других районов её воспроизводства: размах колебаний по длине составляет 30–64 см при средних годовых показателях 42–53 см, по массе тела – 0.29–3.50 кг. В пределах естественного ареала наиболее мелкая горбуша обитает в реках Гижигинской губы (североохотоморское побережье): среднемноголетние показатели длины и массы тела которой составляют 46.2 см и 1.20 кг [Овчинников и др., 2018].

Результаты определения концентраций микроэлементов в органах и тканях баренцевоморской горбуши представлены в мкг/г сырой массы и показаны в табл. 2. Для сравнения здесь же приведены наши данные о содержании элементов в горбуше, выловленной в водах Охотского моря в октябре 2016 г. (р.

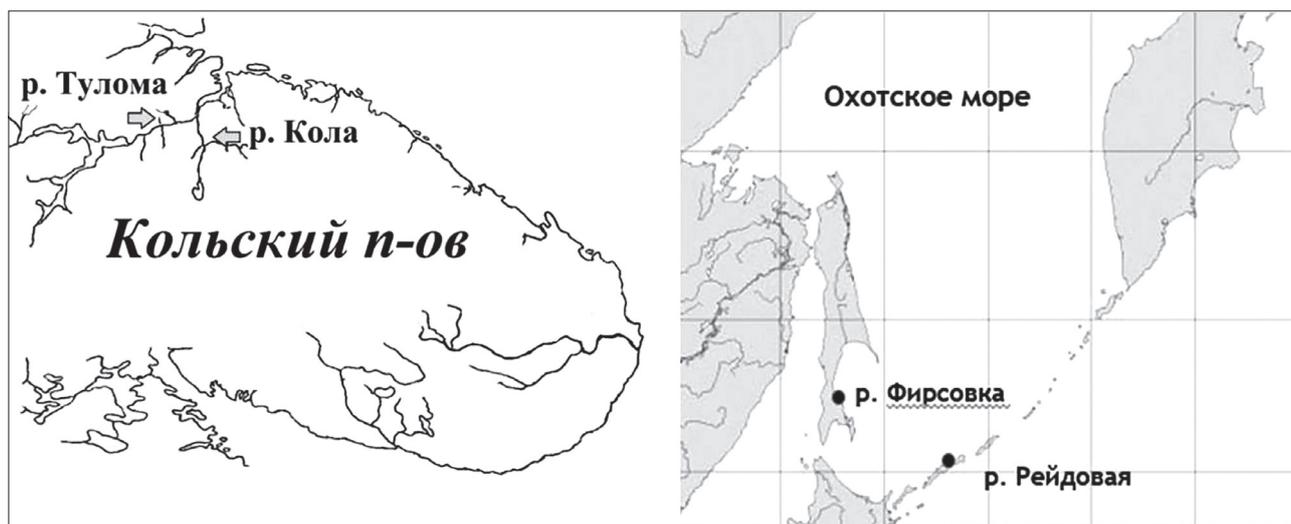


Рис. 1. Места отбора проб горбуши на реках Кола и Тулома (Кольский п-ов) и реках Фирсовка и Рейдовая (Сахалино-Курильский регион).

Таблица 1. Морфометрические показатели производителей горбуши из рек Фирсовка, Рейдовая, Кола и Тулома, 2016–2019 гг.

Дата сбора	Место сбора, пол	Средняя масса тела, г (min–max)	Средняя длина АС, см (min–max)	Средняя длина АД, см (min–max)
Октябрь 2016 г.	р. Рейдовая, ♀	1329 (1278–1380)	47.0 (45–49)	43.0 (41–45)
	р. Рейдовая, ♂	1912 (1686–2362)	53.0 (56–52)	50.0 (52–48)
Сентябрь 2018 г.	р. Фирсовка, ♀	871 (602–1208)	43.6 (39–48)	40.6 (36–45)
	р. Фирсовка, ♂	1376 (1024–1732)	51.6 (47–56)	48.0 (43–52)
Июль 2019 г.	р. Кола, ♀	1093 (737–1615)	44.3 (40–50)	42.0 (38–48)
	р. Кола, ♂	1347 (969–1701)	45.9 (43–49)	43.6 (41–46)
Август 2019 г.	р. Тулома, ♀	1043 (849–1340)	43.8 (42–47)	41.3 (40–44)
	р. Тулома, ♂	1225 (898–1478)	44.8 (42–46)	42.6 (40–44)

Рейдовая, о. Итуруп) и сентябре 2018 г. (р. Фирсовка, юго-восточное побережье о. Сахалин) [Khristoforova et al., 2019]. Среднее значение, стандартное отклонение и достоверность

сравниваемых различий (с использованием U-критерия Манна – Уитни) рассчитывали в программе SPSS Statistics 21 для Mac OS X. Значимость была принята при $P < 0.05$.

Таблица 2. Сравнение содержания микроэлементов в органах и тканях горбуши из Охотского и Баренцева морей (мкг/г сырой массы)

Органы и ткани	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
Река Рейдовая (Охотское море) (2016), диапазон массы рыб 1278–2362 г					
Мышцы	1.96±0.08	0.24±0.08	0.12±0.007	0.14±0.012	0.67±0.050
Печень	3.14±0.07	0.32±0.03	0.18±0.009	0.21±0.018	0.96±0.035
Гонады самцов	3.09±0.05	0.33±0.07	0.18±0.009	0.19±0.034	0.89±0.014
Икра	3.01±0.08	0.29±0.04	0.15±0.036	0.18±0.035	0.84±0.045
Река Фирсовка (Охотское море) (2018), диапазон массы рыб 602–1732 г					
Мышцы	1.93±0.28	0.58±0.20	0.37±0.11	0.06±0.014	0.75±0.26
Печень	3.28±0.85	0.59±0.14	0.34±0.09	0.69±0.13	0.96±0.20
Гонады самцов	1.87±0.33	0.40±0.13	0.29±0.15	0.05±0.05	0.64±0.14
Икра	2.13±0.31	0.48±0.18	0.21±0.06	0.04±0.01	0.51±0.13
Река Кола (Баренцево море) (2019), диапазон массы рыб 737–1701 г					
Мышцы	5.61±1.23	0.59±0.27	0.94±0.38	0.005±0.004	0.208±0.112
Печень	45.91±8.36	70.53±47.78	0.91±0.28	0.122±0.06	0.286±0.072
Гонады самцов	25.26±9.16	6.60±2.71	0.89±0.21	0.006±0.003	0.315±0.085
Икра	19.63±12.23	0.99±0.27	0.84±0.24	0.037±0.062	0.415±0.176
Река Тулома (Баренцево море) (2019), диапазон массы рыб 849–1478 г					
Мышцы	5.90±1.62	1.48±0.58	0.70±0.06	0.005±0.002	0.194±0.075
Печень	41.65±7.07	81.83±49.03	0.82±0.26	0.110±0.066	0.259±0.061
Гонады самцов	26.39±1.01	7.89±0.60	0.78±0.29	0.005±0.001	0.221±0.021
Икра	16.87±5.75	1.22±0.49	0.74±0.14	0.012±0.005	0.328±0.114

Примечание. ПДК (мкг/г сырой массы) в морепродуктах: Pb – 1.0, Cd – 0.2 [СанПиН, 2002]; Pb – 1.5, Cd – 10.0, Zn – 40.0, Cu – 30.0 [FAO, 1983; FAO/WHO..., 1989]; Pb – 0.3, Cd – 0.05 [Commission Regulation..., 2006]; Pb – 1.5, Cd – 0.1 [IFDA..., 2022].

Результаты

Содержание микроэлементов в органах и тканях баренцевоморской и охотоморской горбуши существенно различается (табл. 2). В целом, количество определяемых элементов в мышцах и гонадах охотоморской горбуши уменьшается в ряду $Zn > Pb > Cu > Ni > Cd$, в соответствующих же структурах баренцевоморской горбуши наблюдается смещение в ряду сравниваемых показателей: $Zn > Cu > Ni > Pb > Cd$. Распределение микроэлементов в печени баренцевоморской горбуши иное: здесь содержание меди резко превалирует. Максимальная концентрация меди – 81.83 ± 49.03 мкг/г – обнаружена в печени горбуши из р. Тулома. В печени горбуши из р. Кола количество этого элемента также значительно – 70.53 ± 47.78 мкг/г. Распределение же меди в органах и тканях горбуши из Сахалино-Курильского региона довольно равномерное, хотя её концентрации в рыбах из р. Фирсовка были в 1.5–2 раза выше, чем из р. Рейдовая. Это, возможно, связано с трафиком судов в зал. Терпения и поступлением её в морскую среду с льяльными водами. Cu является одним из важнейших металлов для жизнедеятельности организмов и используется в качестве кофермента в процессе метаболизма [Riani, 2012]. Dural et al. [2007] отмечали, что ткань печени очень активна в поглощении и хранении тяжёлых металлов; именно в этом органе происходит индукция большого количества металлотионеинов, образующих необходимый запас металла для удовлетворения ферментативных и других метаболических потребностей [Dural et al., 2007; Gorur et al., 2012]. Однако повышенная концентрация металлов в печени свидетельствует и о хранении их в этом органе [Tere et al., 2008; Riani et al., 2018]. Н.А. Гашкина с соавторами [Gashkina et al., 2020] высказывали предположение, что накопление меди в печени рыб регулируется интенсивностью кровотока. Верхний порог концентрации Cu для печени рыб, представляющий риск токсичности (38.8 мкг/г), предложенный Couture и Pyle [2008], для горбуши из рек Кола и Тулома был превышен практически в 2 раза.

Концентрации меди и цинка в горбуше из рек бассейна Баренцева моря являются наиболее высокими, при этом содержание

элементов в печени различается. Если медь распределена в организмах рыб более контрастно – разница в количестве этого металла в мышцах и печени составляет десятки раз, то цинка в печени больше, чем в других органах, только в разы. Miller с соавторами [1992] считали, что мышца – самый слабый индикатор при обнаружении загрязнения Cu и Zn на низком уровне их нахождения в среде. По мнению S. Allen-Gil и V.G. Martynov [1995], низкие концентрации Cu и Zn в мышцах могут быть связаны с низким уровнем металлотионеинов.

Уровни содержания цинка в печени и гонадах баренцевоморской горбуши превышали соответствующие значения у охотоморской горбуши в 13–15 раз; при этом допустимые пределы значений Zn для рыбы, рекомендованные FAO/ВОЗ (40 мкг/г), были достигнуты и слегка превышены лишь в печени горбуши из Колы (45.91 ± 8.36 мкг/г). Концентрация этого эссенциального элемента в мышцах горбуши из рек Кола и Тулома, хотя и превышала соответствующие значения в сахалинской и курильской горбуше почти в 3 раза, составляла всего около 6 мкг/г.

Ni, как и Cu, ярко характеризует специфику условий Кольского п-ова. Морские воды Евро-Арктического региона являются потенциальной средой для аккумуляции Ni и других микроэлементов бентическими и пелагическими сообществами. Содержание тяжёлых металлов в окружающей среде показывает, что участки с повышенными концентрациями Ni расположены вблизи районов добычи этого элемента.

Количество никеля в органах и тканях баренцевоморской горбуши в 4–7 раз превышало соответствующие значения в охотоморской горбуше. При этом распределение Ni в органах и тканях рыб из обеих рек Мурманской обл. было достаточно равномерным, концентрации его были почти равны. Распределение никеля по органам и тканям сахалинских и курильских рыб также довольно равномерное. Однако есть существенная разница между уровнями содержания микроэлементов в рыбах Сахалина и Курил: в горбуше из р. Фирсовка в мышцах концентрация Ni выше в 3 раза, в печени – в 2 раза, в гонадах самцов

и самок – в 1.5 раза, чем в рыбах из р. Рейдовая на о. Итуруп. Река Фирсовка находится на юго-востоке Сахалина, впадает в юго-западную часть обширного зал. Терпения. Вместе с Анивским, эти заливы, расположенные на самом юге острова, испытывают значительную транспортную нагрузку: рыболовецкие суда всех рангов и размеров, пассажирские суда, нефтеналивные танкеры, перевозчики сжиженного природного газа, угля и др. Можно думать, что именно с этим трафиком связано загрязнение среды никелем. Поскольку никель сопровождает все нефтепродукты, его содержание в среде обусловлено поступлением с судов, работающих на флотском мазуте, а также при сжигании жидкого топлива на береговых ТЭЦ и в котельных. Это поступление составляет основную часть выбросов Ni в атмосферу во всем мире [АМАР..., 2005].

Обязательного санитарного контроля требует токсичный элемент Pb. Он, как можно видеть, резко превалирует в горбуше Сахалино-Курильского региона, что, по-видимому, связано с неоднократным прохождением рыб в морской период жизни в процессе кормовой и анадромной миграций через Курильскую гряду и Курило-Камчатскую впадину, являющуюся природным геохимически импактным и одновременно высококормным районом [Христофорова и др., 2019]. Концентрация свинца в горбуше из островных рек достаточно высока, но ни в мышцах, ни в семенниках самцов, ни в яичниках самок она не достигает допустимых уровней (ДУ); и только в печени рыб содержание того элемента приближается к допустимой величине (1.0 мкг/г). В рыбах из Баренцева моря его концентрация в органах и тканях существенно ниже; особенно она невысока в лососях из р. Тулома – в 4–6 раз меньше, чем в мышцах и гонадах рыб Сахалина и Итурупа.

Среди определяемых микроэлементов в органах и тканях горбуши Евро-Арктического региона наименьшие концентрации отмечены для кадмия. В мышцах и гонадах самцов из обеих рек его содержание составляло 0.005 и 0.006 мкг/г, в яичниках самок оно было выше в 2–6 раз (0.037 и 0.012, соответственно). Печень рыб из Колы и Туломы, как следует из данных таблицы 2, содержала

значительно большее количество этого токсичного элемента (0.110–0.122 мкг/г). Эти значения были такими же контрастными, как в печени и других органах и тканях горбуши из сахалинской р. Фирсовка. Однако, в отличие от неё, содержание Cd, Ni, Cu и Zn в рыбах из курильской р. Рейдовая было почти равномерно распределено между органами и тканями. Возможно, причиной этого является близость нерестового водотока к месту нагула. Расстояние от него до «родной» реки такое короткое, что рыбы не успевают переварить съеденный корм, что неоднократно отмечалось и нами, и другими исследователями при препарировании рыб. По-видимому, перераспределение такого токсичного элемента, как Cd, требует времени, и рыба, добирающаяся к месту нереста, за длительное время анадромной миграции успевает это сделать. Почти равномерное распределение Cd в органах и тканях рыб из р. Рейдовая имеет одно важное негативное следствие – близкое или почти равное величине ДУ количество этого металла в семенниках (молоках) и икре рыб, потребляемых людьми. А в печени горбуши из р. Кола содержание Cd достигало предельно допустимого уровня (0.1 мкг/г) по требованиям IFDA [2022], не превышая, однако, предельного уровня (0.5 мкг/г), установленного FAO/ВОЗ [1983]. Пример с Cd и его «переводом» в орган детоксикации позволяет предположить, что значительные концентрации Zn и особенно Cu в печени рыб Кольского п-ова обусловлены не только высокими уровнями содержания этих металлов в среде и пище в местах нагула (что видно по их количеству в мышцах и гонадах), но и длительностью перехода к местам нереста.

Обсуждение

Количество микроэлементов в органах и тканях горбуши из рек Кольского п-ова – Колы и Туломы характеризуется в 2–4 раза более высоким содержанием никеля (во всех органах и тканях), в 2.5–3 раза большим количеством цинка (в мышцах), в 2–3 раза большими концентрациями меди (в мышцах), чем в горбуше Сахалино-Курильского региона, пришедшей на нерест в реки Фирсовку и Рейдовую (рис. 2).

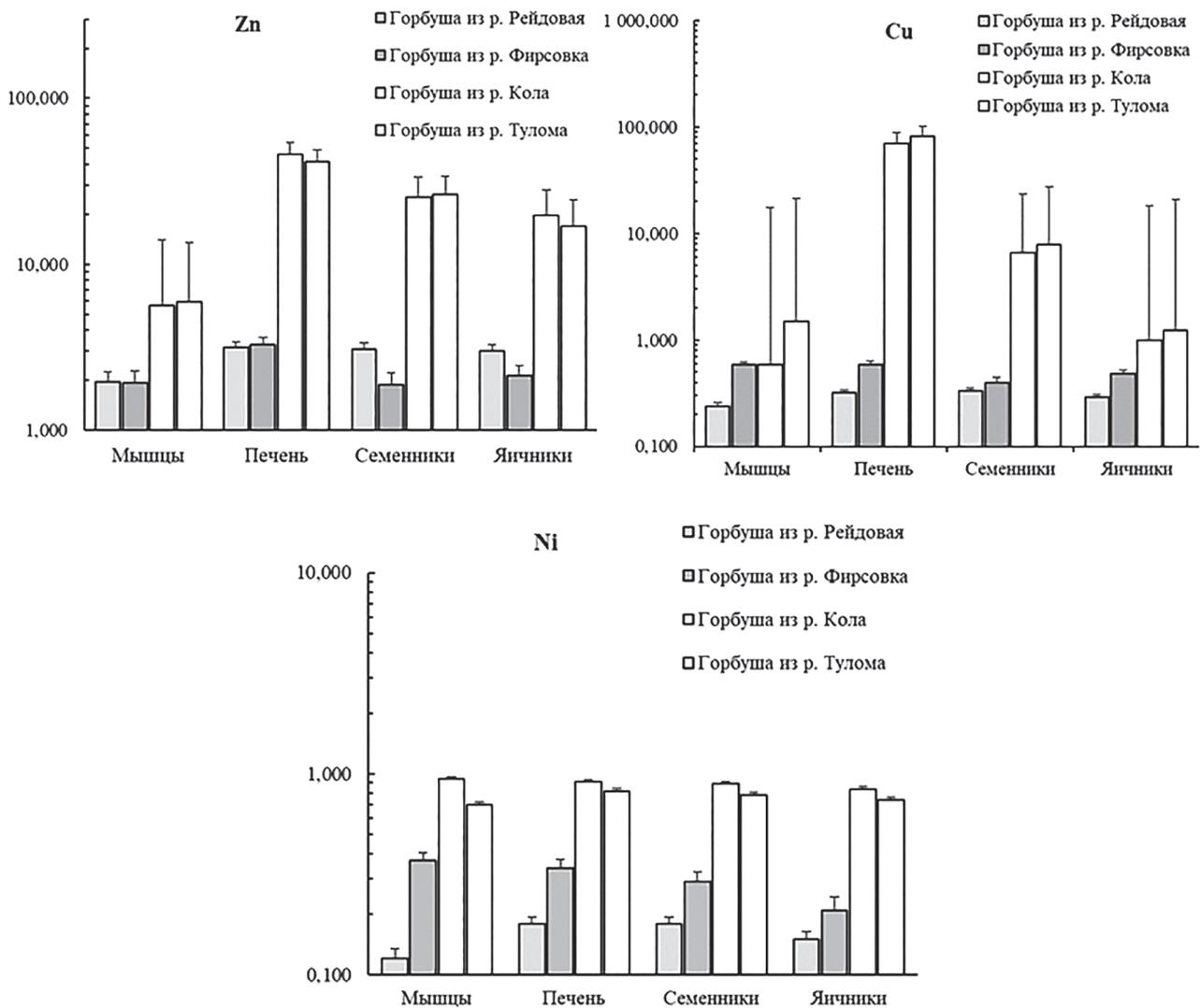


Рис. 2. Концентрации Zn, Cu и Ni в горбуше из рек Рейдовая, Фирсовка, Кола и Тулома, мкг/г сырой массы.

В островных реках горбуша отличается повышенными концентрациями свинца, не превышающими, однако, санитарные нормативы (рис. 3). Баренцевоморская горбуша отличается значительными концентрациями цинка и особенно меди в печени, что свидетельствует об избыточном поступлении этих металлов в организм рыб в специфических геохимических условиях Баренцева моря. Одной из причин, обуславливающих загрязнение вод Евро-Арктического региона тяжёлыми металлами, является течение Гольфстрим, пересекающее Атлантический океан и принимающее загрязнители от США и североевропейских стран, переходящее в Северо-Атлантическое течение, разгружающееся в Баренцевом море.

Экосистема Баренцева моря отличается сравнительно высокой биопродуктивностью

вследствие более благоприятных климатических условий, резко отличающих его по природным характеристикам от других морей Арктики. Наличие обширной Полярной фронтальной зоны обуславливает проникновение тёплых атлантических вод и промежуточное положение моря между арктической и бореальной океаническими системами. Южная часть Баренцева моря не замерзает в течение всего года, а его расположение в зоне полярных широт обуславливает значительную внутригодовую изменчивость инсоляции водной толщи, гидрологического и гидрохимического режимов [Титов, 2003]. Согласно сводке Л.А. Зенкевича «Биология морей СССР» [1963], анализирующей наблюдения гидробиологов 1930–1950 гг., здесь на обильных калянусовых пастбищах (*C. finmarchicus*) в юго-западной части моря в верхних слоях

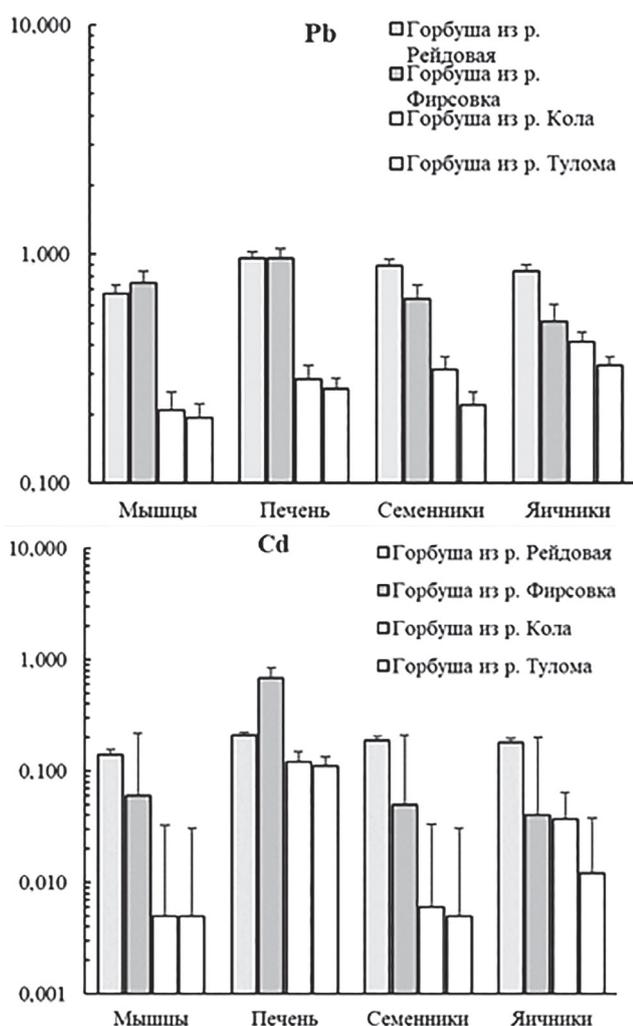


Рис. 3. Концентрации Pb и Cd в горбуше из рек Рейдовая, Фирсовка, Кола и Тулома, мкг/г сырой массы.

(0–25 м) откармливаются громадные массы сельди, мойвы и молоди разных рыб. Постепенно с наступлением лета, от апреля к августу, волна красного калянуса (из-за окраски жировых капель), наиболее ценного в кормовом отношении, смещается с запада на восток и север моря. Несомненно, что в тёплом Норвежском море веслоногие ракообразные, являющиеся одним из основных звеньев пищевой цепи пелагиали, ещё более обильны и имеют несколько генераций. Точно так же, как снижается количество тепла, приносимого атлантическими водами, уменьшается и количество поллютантов, поступающих с ними. По крайней мере, твёрдо установлена тенденция снижения их концентраций в направлении с запада на восток, где они, как правило, уже не превышают фоновых уровней [Матишов, Голубева, 1998].

Ведущая роль Северо-Атлантического течения в переносе загрязняющих веществ из Западной Европы в Баренцево море описана в научной литературе уже несколько десятилетий назад. В 2010 г. это мнение подтвердила группа авторов при изучении поверхностной взвеси в восточной части Северной Атлантики. Тогда было выявлено значительное антропогенное воздействие на её состав, при этом наибольшие концентрации металлов (Cu, Zn, Cr, Ni, Pb) во взвеси, найденные между 45° и 60° с. ш., указывали на индустриальный перенос аэрозольных источников Северной Америки и Европы [Buck et al., 2010]. Современная Норвегия имеет значительные запасы руд железа, титана, ванадия, цинка, сурьмы, меди. С первой половины 1970-х гг. она производит алюминий, ферросплавы, никель, цинк, титан. В стране выплавляются медь и никель, производится металлический цинк и сопровождающий его кадмий, ведётся добыча свинцовых (с примесью серебра) руд [Норвегия..., 1987]. Уже в 1970-х гг. некоторые авторы [Lande, 1977; Melhuus et al., 1978] сообщали о загрязнении тяжёлыми металлами фукусовых водорослей из фьордов западного побережья Норвегии.

Развитие горнорудных производств в Мурманской обл., использующих медно-никелевые, железные, апатит-нефелиновые, редкоземельные и другие руды, является второй причиной загрязнения Евро-Арктического региона тяжёлыми металлами. Несколько крупных предприятий, в том числе «Олкон» с созданным на его базе горно-обогательным комбинатом по добыче и обогащению магнетит-гематитовых кварцитов, «Североникель» (плавильный завод по переработке сульфидных медно-никелевых руд), и ОАО «Апатит» (горнодобывающий комплекс по добыче и переработке апатит-нефелиновых руд), сосредоточены в районе центральной части Кольского п-ова [Gashkina et al., 2020]. При этом загрязнение от промышленных предприятий, перерабатывающих руду, распространяется не только водным, но и воздушным путём. Кроме того, в Кольском заливе находится крупный торговый порт – Мурманск, а также база Северного флота – Североморск, добавляющие тяжёлые металлы в акваторию бассейна Баренцева моря.

Заключение

Районы морского нагула тихоокеанской горбуши, интродуцированной в Евро-Арктическом регионе, вероятно, приурочены к юго-западной части Баренцева моря, а также к Норвежскому и Северному морям. В данных акваториях отмечаются повышенные концентрации тяжёлых металлов в морской среде и организмах, что обусловлено влиянием Гольфстрима на мелководные акватории Атлантического океана – Северное и Норвежское моря. Кроме того, существует естественный геохимический фон в зоне Кольского п-ова и техногенный вклад, в том числе, аэротехногенный, возникший в результате добычи и переработки руд, при загрязнении акватории морского нагула поллютантами в растворённом и взвешенном состоянии, и последующем их накоплении во всех звеньях трофической цепи.

Как интродуцированная горбуша из Баренцева моря, так и горбуша из Охотского моря, по содержанию в них нормируемых токсичных элементов Cd и Pb отвечают требованиям, предъявляемым российским стандартом к морепродуктам. Наименьшие концентрации среди микроэлементов, найденных в органах и тканях горбуши Евро-Арктического региона, отмечены для кадмия, концентрация этого токсичного элемента составляла тысячные доли мкг/г; в сахалино-курильской горбуше содержание Cd уже превышало десятые доли мкг/г. Однако в печени баренцевоморских лососей количество Cd достигало предельно допустимого уровня по требованиям IFDA (0.1 мкг/г), не превышая предельного уровня, установленного FAO/ВОЗ (0.5 мкг/г).

В горбуше из рек Баренцева моря наиболее высокими являются концентрации Cu, Zn и Ni, при этом разница в количестве меди в мышцах и печени рыб составляет десятки раз. Уровень содержания цинка в печени и гонадах баренцевоморской горбуши превышал соответствующие значения у охотоморской горбуши в 13–15 раз. Ni, как и Cu, наглядно характеризует влияние специфики условий Кольского п-ова. Количество никеля в органах и тканях баренцевоморской горбуши в 4–7 раз превышало соответствующие значения в охотоморской горбуше.

Концентрация свинца в рыбах Кольского п-ова в 4–6 раз ниже, чем в мышцах и гонадах рыб Сахалина и Итурупа, его значения не превышают предельно допустимых значений российского стандарта и FAO, и лишь содержание Pb в гонадах баренцевоморской горбуши ($0.42 \pm 0.18 - 0.22 \pm 0.02$) приближается и даже слегка превышает требования европейского стандарта (ЕС).

Более высокие концентрации Zn, Cu и Ni в интродуцированной горбуше и Pb и Cd в лососях из прикурильских вод имеют одни и те же причины – геохимические условия среды. При этом импактность прибрежных вод Атлантики обусловлена антропогенной и техногенной активностью, импактные же зоны в водах Западной Пацифики формируются под влиянием вулканизма и апвеллингов.

Благодарности

Авторы искренне благодарят Н.С. Мюге, заведующего лабораторией молекулярной генетики ФГБНУ «ВНИРО» за помощь, оказанную в доставке проб.

Финансирование

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22–24–00465.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

Все экспериментальные протоколы были выполнены в соответствии с руководящими принципами ЕС (86/609 / CEE) и при соблюдении правил, утверждённых распоряжением Президиума АН СССР от 02.04.1980 № 12000-496 и приказом Минвуза СССР от 13.09.1984 № 22. Все усилия были предприняты, чтобы использовать только минимальное количество животных, необходимое для получения надёжных научных данных.

Литература

Азбелев В.В. О научно-исследовательских работах по повышению эффективности акклиматизации дальневосточных лососей в бассейнах Белого и Баренцева

- морей // Научн.-техн. бюлл. ПИНРО. 1960. № 4 (14). С. 15–19.
- Азбелев В.В., Лагунов И.И. Некоторые данные о морских миграциях сёмги // Вопросы ихтиологии. 1956. Вып. 6. С. 111–120.
- Азбелев В.В., Яковенко М.Я. Материалы по акклиматизации горбуши в бассейне Баренцева и Белого морей // Труды ПИНРО. 1963. Вып. 15. С. 7–26.
- Алексеев М.Ю., Ткаченко А.В., Зубченко А.В., Шкатулов А.П., Николаев А.М. Распространение, эффективность нереста и возможность промысла интродуцированной горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum) в реках Мурманской области // Российский журнал биологических инвазий. 2019. № 1. С. 2–13.
- Алтухов Ю.П., Салменкова Е.А., Омельченко В.Т. Популяционная генетика лососёвых рыб. М.: Наука, 1997. 228 с.
- Бакштанский Э.Л., Загураева Л.Ф., Нестеров В.Д. Результаты мечения молоди лосося в 1969–1974 гг. // Тр. ВНИРО. 1976. Т. 113. С. 18–21.
- Бакштанский Э.Л., Нестеров В.Д. Некоторые данные к оценке влияния иностранного промысла на запасы сёмги // Рыбное хозяйство. 1973. № 7. С. 18–21.
- Бирман И.Б. Морской период жизни и вопросы динамики стад тихоокеанских лососей. М.: Агропромиздат, 1986. 208 с.
- Веселов А.Е., Павлов Д.С., Барышев И.А., Ефремов Д.А., Потуткин А.Г., Ручьёв М.А. Полиморфизм покатной молоди горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* в реке Индера (Кольский полуостров) // Вопросы ихтиологии. 2016. Т. 56. № 5. С. 571–576.
- Виноградова А.А., Котова Е.И. Загрязнение северных морей России тяжёлыми металлами: поток из атмосферы и речной сток // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 1. С. 22–32.
- Гордеева Н.В., Салменкова Е.А., Алтухов Ю.П., Махров А.А., Пустовойт С.П. Генетические изменения у горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) в ходе акклиматизации в бассейне Белого моря // Генетика. 2003. Т. 39. №3. С. 402–412.
- Гордеева Н.В., Салменкова Е.А., Прусов С.В. Динамика биологических и популяционно-генетических показателей у горбуши *Oncorhynchus gorbuscha*, вселённой в бассейн Белого моря // Вопросы ихтиологии. 2015. Т. 55. № 1. С. 45–53.
- Гриценко О.Ф. Проходные рыбы острова Сахалин (систематика, экология, промысел). М.: Изд-во ВНИРО, 2002. 248 с.
- Ермаков В.В. Концепция биогеохимических провинций А.П. Виноградова и её развитие // Геохимия. 2017. № 10. С. 875–890.
- Ефанов В.Н. Организация и моделирование запасов популяций рыб (на примере горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum.): Монография. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2003. 134 с.
- Жилин А.Ю., Плотицына Н. Ф., Лаптева А.М. Мониторинг стойких органических загрязнителей и тяжёлых металлов в промысловых рыбах Медвежинско-Шпицбергенского района // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 3 (10). С. 78–86.
- Зеленников О.В., Иванова Т.С., Мовчан Е.А., Мищенко О.В. О результатах мониторинга нерестовой миграции производителей горбуши в районе острова Средний // Вестник СПбГУ. Сер. 3. СПб., 2006. С. 74–78.
- Зенкевич Л.А. Биология морей СССР / Акад. наук СССР. Ин-т океанологии. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1963. 739 с.
- Зубченко А.В. Особенности биологии, состояние и управление запасами атлантического лосося (*Salmo salar* L.) Кольского полуострова: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Петрозаводск, 2006. 48 с.
- Зубченко А.В., Веселов А.Е., Калюжин С.М. Горбуша (*Oncorhynchus gorbuscha*): проблемы акклиматизации на Европейском Севере России // Петрозаводск; Мурманск: Фолиум, 2004. 82 с.
- Ильин Г.В., Матишов Д.Г., Касаткина Н.Е. Формирование антропогенного загрязнения и экосистемное здоровье морей российской Арктики // Комплексные исследования больших морских экосистем России. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2011. С. 277–325.
- Кавун В.Я., Христофорова Н.К., Шулькин В.М. Микроэлементный состав мидии съедобной из прибрежных вод Камчатки и северных Курил // Экология. 1989. № 3. С. 53–58.
- Каев А.М., Животовский Л.А. О вероятном перераспределении горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* между районами воспроизводства разных стад в Сахалино-Курильском регионе // Вопросы ихтиологии. 2017. Т. 57. № 3. С. 264–274. <https://doi.org/10.7868/S0042875217030080>
- Корнеев О.Ю., Рыбалко А.Е., Фёдорова Н.К. Федеральный мониторинг геологической среды западно-арктического шельфа – состояние, объекты и перспектива // Материалы международной конференции «Нефть и газ арктического шельфа – 2008». Секция 5. Экология, мониторинг и охрана окружающей среды. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2008. С. 179–182.
- Лаптева А.М., Плотицына Н.Ф. Микроэлементы в крабе-стригуне *Chionoecetes opilio* Баренцева моря // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование. Материалы X Национальной (Всероссийской) научно-практич. конф. 2019. С. 35–39.
- Литвиненко А.В., Христофорова Н.К., Гринберг Е.В. Традиции и новое в искусственном воспроизводстве тихоокеанских лососей Курильского района (часть 2) // Рыбное хозяйство. 2019. № 3. С. 90–96.
- Малиновская Т.М., Христофорова Н.К. Характеристика прибрежных вод южных Курил по содержанию тяжёлых металлов в организмах-индикаторах // Биол. моря. 1997. Т. 23. С. 239–246.
- Мархинин Е.К. Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
- Матишов Г.Г., Голубева Н.И. Химические смеси в снежном покрове Печорского и Карского морей // Биология и океанография Карского и Баренцева морей (по ходу Северного морского пути). Апатиты, 1998. С. 430–440.
- Матишов Г.Г., Павлова Л.Г., Ильин Г.Г. Гидрохимические и геохимические процессы в экосистеме Баренцева моря // Химические процессы в экосистемах

- северных морей (гидрохимия, геохимия, нефтяное загрязнение). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. С. 5–185.
- Новиков Г.Г., Кузищин К.В. О морских миграциях атлантического лосося // Симпозиум по атлантическому лосося. Тез. докл. Сыктывкар, 1990. С. 43.
- Новиков М.А., Драганов Д.М. Загрязнение воды и донных отложений тяжёлыми металлами в области полярного фронта Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21. № 1. С. 150–159.
- Новиков М.А., Жилин А.Ю. Характер распределения тяжёлых металлов в донных отложениях Баренцева моря (по результатам статистического анализа) // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 78–88.
- Норвегия // Горная энциклопедия: В 5 т. / Гл. ред. Е.А. Козловский. М.: Советская энциклопедия, 1987. Т. 3. 592 с.
- Овчинников В.В., Волобуев В.В., Голованов И.С., Коршукова А.М., Панфилов А.М., Прикоки О.В., Смирнов А.А. Динамика запасов и вылова основных промысловых рыб Магаданской области // Вопросы рыболовства, 2018. Т. 19. № 1. С. 5–19. DOI: 10.21443/1560–9278-2018-21-1-150-159.
- Пропп М.В., Пропп Л.Н. Гидрохимические показатели и содержание хлорофилла *a* в прибрежных водах Курильских островов // Биол. моря. 1988. № 4. С. 68–70.
- Салменкова Е.А. Механизмы хоминга лососёвых рыб // Успехи современной биологии. 2016. Т. 136. № 6. С. 593–607.
- СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Госкомсанэпиднадзор РФ, 2002. 156 с.
- Сапожников В.В. Комплексные экологические исследования экосистем Берингова и Охотского морей // Океанология. 1994. Т. 34. № 2. С. 309–312.
- Смирнов А.И. Биология, размножение и развитие тихоокеанских лососей. М.: Изд-во Московского ун-та, 1975. 336 с.
- Состояние запасов и рыболовства анадромных рыб Мурманской области / С.В. Прусов, А.В. Зубченко, М.Ю. Алексеев и др. Мурманск: Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО», 2021. 72 с.
- Степанюк И.А. Проблема навигации при хоминге атлантического лосося (семги) (Электронный ресурс) // Sci-Article. Ru. 2019. № 74. <https://sci-article.ru/stat.php?i=1570465914>
- Титов О.В. Многолетние изменения гидрохимического режима и экосистемы Баренцева моря: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2003. 52 с.
- Хованский И.Е. Акклиматизация североохотоморской горбуши на Европейском Севере // Рыбное хозяйство. 2000. № 2. С. 38–39.
- Христофорова Н.К., Литвиненко А.В., Цыганков В.Ю., Ковальчук М.В., Ерофеева Н.И. Микроэлементный состав горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) из Сахалино-Курильского региона // Биология моря. 2019. 45 (4). С. 260–266.
- Шестопад И.П. О районах нагула атлантического лосося *Salmo salar* L. // В сб.: Лососёвые рыбы (морфология, систематика и экология). Л., 1976. С. 125–126.
- Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Владивосток: ТИНРО-центр, 2008. Т. 1. 482 с.
- Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах: Монография. Владивосток: ТИНРО-центр. 2011. Т. 2. 473 с.
- Allen-Gil S., Martynov V.G. Heavy metals burdens in nine species of freshwater and anadromous fish from the Pechora River, Northern Russia. Sci. Total Environ. 1995. P. 653–659. doi: 10.1016/0048-9697(95)93634-T
- AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 2005.
- AMAP. POPs and Chemicals of Emerging Arctic Concern: Influence of Climate Change. Summary for Policymakers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2021.
- Assessment of the risk to Norwegian biodiversity and aquaculture from pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Report from the Norwegian Scientific Committee for Food and Environment (VKM) 2020: 01. Oslo, 2020. 157 p. ISSN: 2535-4019.
- Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., Schmidt N.M., Lund M., Parmentier F.-J.W., Brown R., Bhatt U.S., Euskirchen E.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Overland J.E., Wang M., Corell R.W., Meier W.N., Wouters B., Mernild S., Mård J., Pawlak J., Olsen M.S. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017. Environ. Res. Lett. 2019. 14, 045010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc1b>
- Buck C.S., Landing W.M., Resing J.A., Measures C.I. The solubility and deposition of aerosol Fe and other trace elements in the North Atlantic Ocean: Observations from the A16N CLIVAR/CO2 repeat hydrography section // Marine Chemistry. 2010. 120 (1–4), 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2008.08.003>
- Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs // Official Journal of the European Union. 2006. L 364/5-L 364-24.
- Couture P., Pyle G. Live fast and die young: metal effects on condition and physiology of wild yellow perch from along two metal contamination gradients // Hum. Ecol. Risk Assess. 2008. 14. 73–96. <https://doi.org/10.1080/10807030701790322>.
- Dural M., Göksu M.Z.L. & Özak A.A. Investigation of heavy metal levels in economically important fish species captured from the Tuzla lagoon // Food Chemistry. 2007. 102 (1):415–421. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.03.001.
- FAO. Food and Agriculture Organization. Compilation of legal limits for hazardous substances in fish and fishery products (pp. 5–100). FAO Fishery Circular No. 464. 1983.
- FAO/WHO: Evaluation of certain additives and the contaminants mercury, lead and cadmium. WHO Technical Report, Series No. 505. 1989.
- Gashkina N.A., Moiseenko T.I. & Kudryavtseva L.P. Fish response of metal bioaccumulation to reduced toxic load

- on long-term contaminated lake Imandra // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020. 191: 110205. <https://doi.org/10/1016/j.ecoenv.2020.110205>.
- Gorur F.K., Keser R., Akcay N. & Dizman S. Radioactivity and heavy metal concentrations of some commercial fish species consumed in the Black Sea Region of Turkey // *Chemosphere*. 2012. 87:356. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.12.022.
- Haug A., Melsom S., Omang S. Estimation of heavy metal pollution in two Norwegian fjord areas by analysis of the brown alga *Ascophyllum nodosum* // *Environmental Pollution*. 1974. Vol. 7. Is. 3. P. 179–192.
- Heath A.G. Water pollution and fish physiology. London: Lewis Publishers, 2002. 506 p.
- Huser B.J., Futter M.N., Bogan D., Brittain J.E., Culp J.M., Goedkoop W., Gribovskaya I., Karlsson J., Lau D.C.P., Rühländ K.M., Schartau A.K., Shafel R., Smol J.P., Vrede T., Lento J. Spatial and temporal variation in Arctic freshwater chemistry-reflecting climate-induced landscape alterations and a changing template for biodiversity // *Fresh. Biol.* 2020. 00. 1–16. <https://doi.org/10.1111/fwb.13645>.
- IFDA (International Foodservice Distributors Association). General Standard for Food Additives Codex Stan 192-1995. 480 p. // (<https://www.ifdaonline.org/>). Access date 11.09.2022.
- Kadko D., Aguilar-Islas A., Bolt C., Buck C.S., Fitzsimmons J.N., Jensen L.T., Landing W.M., Marsay C.M., Rember R., Shiller A.M., Whitmore L.M., Anderson R.F. The residence times of trace elements determined in the surface Arctic Ocean during the 2015 US Arctic GEOTRACES expedition // *Mar. Chem.* 2019. 208. 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2018.10.011>.
- Kavun V.Ya., Shulkin V.M., Khristoforova N.K. Metal accumulation in mussels of the Kuril Islands, north-west Pacific Ocean // *Marine Environmental Research*. 2002. Vol. 53, Is. 3. P. 219–226. [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(00\)00264-6](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(00)00264-6)
- Khristoforova N.K., Litvinenko A.V., Tsygankov V.Yu., Kovalchuk M.V., Erofeeva N.I. Trace Elements Content in the Pink Salmon (*Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792) From Sakhalin-Kuril Region // *Doc. dep. on the Second NPAFC-IYS Workshop on Salmon Ocean Ecology in a Changing Climate*, Tech. Rep. 15 (May 18–20, 2019; Portland, Oregon, USA). 2019. P. 59–62. <https://doi.org/10.23849/npafctr15/59.62>
- Kondo Y., Obata Hajime Hioki N., Ooki A., Nishino S., Kikuchi T., Kuma K. Transport of trace metals (Mn, Fe, Ni, Zn and Cd) in the western Arctic Ocean (Chukchi Sea and Canada Basin) in late summer 2012 // *Deep Sea Res. Part Oceanogr. Res. Pap.* 2016. 116. 236–252. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2016.08.010>.
- Lande E. Heavy-metal pollution in Trondhems fiorden, Norway, and recorded effects on fauna and flora // *Environ. Pollut.* 1977. 12 (3). 187–198.
- Melhuus A., Seip K.L., Seip H.M., Mykkestad S. A preliminary study of the use of benthic algae as biological indicators of heavy metal pollution in Sorfjorden, Norway // *Environ. Pollut.* 1978. 15. 101–107.
- Miller P.A., Munkittrick K.R. & Dixon D.G. Relationship between concentrations of copper and zinc in water, sediment, benthic invertebrates and tissues of white sucker (*Catostomus commersoni*) at metal contaminated sites // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1992. 49: 978–985. doi: 10.1139/f92-109
- Mudd G.M. Global trends and environmental issues in nickel mining: sulfides versus laterites // *Ore Geol. Rev.* 2010. 38: 9–26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.003>.
- Nielsen J., Rosing-Asvid A., Meire L., Nygaard R. Widespread occurrence of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) throughout Greenland coastal waters // *Journal of Fish Biology*. 2020. Vol. 96. Is. 6. P. 1505–1507.
- Paulsen T., Sandlund O.T., Østborg G., Thorstad E.B., Fiske P., Muladal R., Tronstad S. Growth of invasive pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) at sea assessed by scale analysis // *Journal of Fish Biology*. 2021. 100 (1). 218–228. <https://doi.org/10.1111/jfb.14937>
- Pettit H. Britain's native salmon are under threat from a pink rival that escaped into the sea from Russian farms. (Электронный ресурс) // (<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4829918/Britain-s-native-salmon-threat-pink-rival.html>) / Published: 15:00 BST, 28 August 2017. Updated: 17:54 BST, 28 AUGUST 2017. Проверено 12.03.2018.
- Riani E. Perubahan Iklim dan Kehidupan Biota Akuatik (Bioakumulasi Bahan Berbahaya dan Beracun dan Reproduksi). Bogor (ID): IPB Press, 2012.
- Riani E., Cordova M.R., Arifin Z. Heavy metal pollution and its relation to the malformation of green mussels cultured in Muara Kamal waters, Jakarta Bay, Indonesia // *Mar. Pollut. Bull.* 2018. 133: 664–670. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.029>.
- Sandlund O.T., Berntsen H.H., Fiske P., Kuusela J., Muladal R., Niemelä E., Uglem I., Forseth T., Mo T.A., Thorstad E.B., Veselov A.E., Vollset K.W., Zubchenko A.V. Pink salmon in Norway: the reluctant invader // *Biol. Invasions*. 2019. Vol. 21. P. 1033–1054.
- Savinova T.N., Gabrielsen G.W., Falk-Petersen S. Chemical Pollution in the Arctic and Sub-Arctic Marine Ecosystems: An Overview of Current Knowledge / The Joint Norwegian – Russian Commission on Environmental Cooperation the Seabird Expert Group Report No. 3: 1994/95. NINA fagrappport, 1995. 1: 1–68.
- Tepe Y., Türkmen M. & Türkmen A. Assessment of heavy metals in two commercial fish species of four Turkish seas // *Environ. Monit Assess.* 2008. 146: 277–284. doi: 10.1007/s10661-007-0079-3.
- Voigt H.-R. Concentrations of heavy metals in fish from coastal waters around the Baltic Sea (Extended abstract) // *ICES Journal of Marine Science*. 1999. 56. Supplement: 140–141. doi:10.1006/jmsc.1999.0623.
- Whelan K. Pink invaders // *Off the Scale*. 2017. No. 18. P. 14–21.

TRACE ELEMENT CONTENT IN THE PINK SALMON FROM THE RIVERS OF THE BARENTS AND OKHOTSK SEAS BASINS

©2023 Khristoforova N.K.^{a, b}, Litvinenko A.V.^{c, *}, Alekseev M.Yu.^d, Tsygankov V.Yu.^a

^a Institute of the World Ocean, Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690091, Russia

^b Pacific Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russia

^c Institute of Natural Sciences and Technosphere Safety, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia

^d Polar Branch of VNIRO, Murmansk, 183038, Russia

e-mail: *litvinenko.av@bk.ru

The concentrations of Pb, Cd, Ni, Cu and Zn were determined in the invasive pink salmon that came to spawn into the Kola and Tuloma rivers of the Kola Peninsula, flowing into the Barents Sea, in July 2019. The content of trace elements in the organs and tissues of pink salmon introduced in the Euro-Arctic waters of Russia was compared to those of the pink salmon from its natural range, which returned to spawn in the rivers of the Sakhalin and Iturup Islands in 2016–2018. It has been established that concentrations of Zn, Cu and Ni noticeably predominate in all organs and tissues of introduced pink salmon, whereas Pb and Cd – in the Sea of Okhotsk pink salmon. Obviously, the differences in the microelement composition in fish are caused by environmental conditions. In the Barents Sea, they are formed under the influence of the Gulf Stream, as well as the anthropogenic impact of the Kola Peninsula, which is characterized by the extraction, processing and smelting of a number of metals, primarily Ni and Cu, as well as Zn. In the Sakhalin-Kuril basin, the specificity of the environment and the microelement composition of salmon are due to the influence of natural factors – volcanism and upwellings. Herds of pink salmon during feeding and migration in the Pacific Ocean cross a high-nutrient and at the same time geochemically impact natural zone formed by the Kuril Ridge and the Kuril-Kamchatka depression, which supplies chemical elements to surface waters. Here, the concentration of Pb is most markedly increased in fish. The development of the introduced pink salmon in the new area is facilitated by the recent increase in temperature in the waters of the North Atlantic, so the amount of fish production in it will increase. The mastering of pink salmon in new feeding places sets before scientists the task of monitoring the dynamics of its abundance, taking adequate measures for fishery regulation and fish quality control.

Key words: Pacific salmon, introduced pink salmon, trace elements, Kola Peninsula, Barents Sea, Sea of Okhotsk.