

УДК 574.632:504.45

СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ТИХООКЕАНСКИХ И АТЛАНТИЧЕСКИХ ЛОСОСЯХ

© 2015 г. Н. К. Христофорова^{1,3}, В. Ю. Цыганков¹, М. Д. Боярова¹, О. Н. Лукьянова^{1,2}¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток²Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр, Владивосток³Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток

e-mail: tsig_90@mail.ru

Поступила в редакцию 10.12.2013 г., после доработки 01.10.2014 г.

Выполненная работа посвящена определению ряда элементов – ртути, мышьяка, свинца, кадмия, цинка и меди в двух наиболее распространенных видах тихоокеанских лососей горбуше и кете, выловленных в конце июля 2013 г. в прикурильских водах. Показано, что концентрации токсичных элементов (Hg, As, Pb, Cd) в обоих видах, как в самцах, так и самках были ниже ПДК этих микроэлементов для морепродуктов. При сравнении филе садковых лососей (семги) и мышц диких лососей, выявилось, что в первых заметно преобладают Zn и Cu, во вторых – Pb. Очевидно, как в одном, так и другом случае причина сходная – геохимические условия среды. Но для выращиваемых в прибрежных водах атлантических лососей она вызвана антропогенным воздействием, для диких лососей из прикурильских вод она обусловлена природным фактором – вулканизмом и апвеллингами.

DOI: 10.7868/S0030157415050068

ВВЕДЕНИЕ

Для снижения уровня холестерина и высокого давления крови, укрепления стенок сосудов медики многих стран рекомендуют регулярно ежедневно употреблять рыбу с высоким содержанием омега-3 полиненасыщенных жирных кислот. Такими кислотами богаты жирные рыбы – сельди, макрели и лососи. Употребление этих рыб и соответственно омега-3 жирных кислот (эйкозапентаеновая и докозагексаеновая кислоты) помогает не только снизить риск сердечнососудистых заболеваний и эндометриального рака, но и повысить уровень микроэлементов, крайне необходимых человеку, прежде всего калия и фосфора, усилить умственные и познавательные способности, а также оказывает еще ряд позитивных эффектов [24, 28].

Несмотря на очевидную пользу и необходимость регулярного включения этих жирных рыб в диету, их использование вызывает в некоторых случаях беспокойство, что связано с биоаккумуляцией в их тканях контаминантов окружающей среды, таких как бифенилы, диоксины, пестициды и тяжелые металлы. Особую тревогу вызвали недавние сообщения о росте концентраций хлорорганических соединений в выращиваемых на фермах атлантических лососях (что чревато высоким риском раковых заболеваний) по сравнению с дикими лососями [20, 22]. Вызывают беспокойство и уровни содержания в лососях тяжелых металлов, прежде всего ртути, преобладающей формой которой в морских организмах является жирорастворимая метилртуть, особенно в долгоживущих, крупных

жирных рыбах. Кроме ртути, неэссенциальными и токсичными элементами являются свинец, кадмий, мышьяк, на определении которых в рыбах исследователи также фокусируются [21, 24, 29].

Лососевые обитают главным образом в северных частях Тихого и Атлантического океанов, в Северном Ледовитом океане и в бассейнах рек этих районов. Среди рыб семейства лососевых (*Salmonidae*) выделяются две группы: атлантические лососи и тихоокеанские лососи. Самый знаменитый представитель атлантических лососей *Salmo salar* – семга. Среди тихоокеанских лососей ведущим является род *Oncorhynchus*, включающий горбушу *O. gorbuscha*, кету *O. keta*, нерку *O. nerka*, кижуча *O. kisutch*, чавычу *O. tshawytscha* (king salmon), симу *O. masu*.

Атлантический, или благородный лосось, встречается по обе стороны Атлантического океана. В Тихоокеанском бассейне есть также несколько видов рода *Salmo*, но они малочисленны по сравнению с тихоокеанскими лососями рода *Oncorhynchus*. Максимальные уловы атлантического лосося наблюдались в середине 1970-х гг. и составляли примерно 12 тыс. т. Сейчас в мире ловят около 1 тыс. т этого лосося, и его уловы продолжают снижаться. К концу XX–началу XXI в. дикий атлантический лосось стал объектом только научных исследований и спортивного рыболовства. Уже сейчас в морских садках живет более 99% всех атлантических лососей. Лидерами в производстве садкового лосося является Норвегия (520–550 тыс. т атлантического лосося и форели)

и Чили (около 450 тыс. т атлантического лосося и форели) [7].

В то же время 50% тихоокеанских лососей производится на природных нерестилищах, при этом на Камчатке нерестится четверть их поголовья.

Будучи обитателями эпипелагиали (0–200 м), они находятся преимущественно в верхнем ее слое (0–50 м), т.е. занимают наименее заселенную вертикальную зону морей и океанов – верхнюю пелагиаль. Пастбищной зоной тихоокеанских лососей в зимний период является зона Субарктического, или Полярного, фронта, располагающаяся между 40° и 45° с.ш. и характеризующаяся высокой биологической и рыбопромысловой продуктивностью. С наступлением весны, увеличением длины светового дня, повышением температуры верхних слоев и обильным развитием в них планктона зона активной жизни перемещается на север и северо-восток. Вслед за ней движутся лососи, все время находясь в богатой кормовыми ресурсами полосе.

Сима – единственный вид из тихоокеанских лососей, встречающийся лишь по азиатскому берегу. Это самый древний вид из тихоокеанских лососей, самый южный и наиболее тепловодный, распространенный преимущественно в бассейне Японского моря. Кета и горбуша широко распространены по обоим берегам Тихого океана – от зал. Петра Великого и Сан-Франциско до Берингова пролива. Нерка и чавыча, довольно холодолюбивые виды, шире распространены по американскому берегу. Чавыча – самый крупный представитель тихоокеанских лососей. Все тихоокеанские лососи мечут икру лишь раз в жизни, погибая после нереста. Этим они отличаются от благородных атлантических лососей, которые нерестятся до четырех раз [9, 14, 15].

Основные места концентраций тихоокеанских лососей в российских водах подразделяются на несколько групп, различаясь по видовому составу, величинам биомассы лососей и продолжительностью периода их повышенных концентраций. Так, в глубоководных районах Берингова моря по массе преобладают кета и нерка, в глубоководных районах Охотского моря абсолютно доминируют над всеми видами горбуша и кета. Северокурильские проливы являются основным миграционным коридором идущих на нерест западнокамчатских стад нерки, кижуча и чавычи и выходящих в океан сеголеток кеты и горбуши. В прикурильских водах, как и в Охотском море, абсолютно доминируют горбуша и кета. Глубоководные районы северной части Японского моря, как и прикурильские воды, в основном являются транзитными для лососей при их миграциях: в апреле–июле на нерест идут сима и горбуша, в октябре–декабре – осенняя кета, а молодь горбуши и симы идет на осенне-зимний нагул. В шельфо-

вых районах дальневосточных морей значительные концентрации лососей наблюдаются только при подходе производителей на нерест и во время перераспределения скатившейся молоди в открытые воды, этот период длится с июня по сентябрь [10].

Тихоокеанские лососи – наиболее массовая и потому очень важная в промысловом отношении группа. Их уловы на 90% обеспечиваются тремя главными видами: горбушей, кетой и неркой. Горбуша – самый многочисленный, наиболее мелкий и быстрорастущий вид. В российских водах горбуша имеет ведущее промысловое значение. На втором месте по численности после горбуши стоит кета. Она расселилась шире других представителей своего рода.

Нерестятся разные виды лососей в разном возрасте: кета входит в реки на третьем–пятом году жизни; горбуша, растущая и развивающаяся быстрее, чем кета, возвращается после ската в море уже через 18 мес. Нерка проводит в море от 1 до 5 лет (в массе – 2–3 года). Чавыча – от 1 до 6 лет (в массе – 3–4 года).

Наша работа посвящена изучению уровней содержания шести элементов Zn, Cu, Cd, Pb, As, Hg в двух видах тихоокеанских лососей – горбуше и кете, выловленных в прикурильских водах, и сравнению концентраций этих элементов в диких лососях и в выращенных в садках атлантических лососях.

Среди изучаемых микроэлементов два первых – медь и цинк – являются эссенциальными (необходимыми), или истинными биоэлементами, четыре последних – кадмий, свинец, мышьяк, ртуть – неэссенциальными, но почти постоянно присутствующими в органах и тканях организмов элементами. Кроме биологической значимости эти элементы отличаются также геоэкологическими характеристиками. Медь и цинк, если они не поступают в окружающую среду от медно-цинковых производств и применения этих металлов, их сплавов и соединений в технике (добыча руд, их обогащение и выплавка, гальванические цеха, антикоррозионные покрытия и др.) являются трассерами антропогенного воздействия на среду. Свинец, кадмий и ртуть, открывавшие в 1960–1970-е гг. все “черные списки” тяжелых металлов в организмах из-за их токсичного действия, являются трассерами техногенного воздействия на окружающую среду [11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информация о содержании микроэлементов в рыбе представляет интерес не только для населения, но и для ряда отраслей промышленности. В российской практике лососи используются практически полностью, с минимумом отходов.

Таблица 1. Концентрация микроэлементов в тихоокеанских лососях

Объект исследования	Определяемые элементы, мкг/г сырой массы					
	Zn	Cu	Cd	Pb	As	Hg
Горбуша ♂, № 1. Масса 1458,7 г	2.20	0.11	0.06	0.53	0.93	0.07
Горбуша ♂, № 2. Масса 1208 г	2.23	0.12	0.08	0.55	0.95	0.08
Горбуша ♂, № 3. Масса 1285 г	2.30	0.13	0.07	0.55	0.88	0.06
Горбуша ♀, № 4. Масса 1179 г	2.28	0.12	0.08	0.70	0.80	0.08
Горбуша ♀, № 5. Масса 1168 г	2.55	0.11	0.10	0.65	1.03	0.09
Горбуша ♀, № 6. Масса 1272,4 г	2.63	0.11	0.07	0.70	0.98	0.09
Кета ♂, № 1. Масса 1609 г	3.08	0.15	0.09	0.75	1.30	0.12
Кета ♂, № 2. Масса 1605 г	3.13	0.17	0.12	0.78	1.33	0.14
Кета ♂, № 3. Масса 1564 г	3.23	0.19	0.11	0.78	1.23	0.11
Кета ♀, № 4. Масса 1982 г	3.20	0.17	0.12	0.98	1.13	0.14
Кета ♀, № 5. Масса 1953 г	3.33	0.16	0.14	0.93	1.45	0.15
Кета ♀, № 6. Масса 1670 г	3.43	0.16	0.11	0.98	1.38	0.15

Примечание. ПДК в России: Pb – 1.0; As – 5.0; Cd – 0.2; Hg – 0.2 мкг/г сырой массы (в Канаде: Hg – 0.5; в США: Cd – 3, Pb – 1.5, As – 76 мкг/г сырой массы).

Поэтому определение микроэлементов проводилось в целых тушках рыб, перемолотых для гомогенности. На анализ были взяты шесть особей горбуши и шесть особей кеты, выловленных в конце июля 2013 г. в северо-западной части Тихого океана в относительно близком к Курильских островам районе (46°39' с.ш., 163°38' в.д.) во время учетной экспедиции ТИНРО-центра.

Все элементы, кроме ртути, определялись из высушенных при 85°C гомогенатов тушек или органов после минерализации проб конц. HNO₃ марки ОСЧ согласно ГОСТ 26929-94 на атомно-абсорбционном спектрофотометре Shimadzu AA 6800. Точность определения элементов, а также возможное загрязнение проб в ходе анализа контролировали по четырем градуировочным растворам, включая фоновый (нулевой) раствор. Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартного пакета Excel. Результаты пересчитывались на сырой вес.

Ртуть определяли в замороженных (при –20°C) гомогенатах тушек после минерализации проб азотной кислотой с добавлением перекиси водорода. Массовую концентрацию ртути (мкг/г сырого веса) находили методом инверсионной вольтамперометрии (ИВ) на анализаторе “Томь-Аналит” (ТА-4). Содержание элемента в минерализатах (растворах) проб определяли методом добавок аттестованных смесей с установленным содержанием элемента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа тушек рыб представлены в табл. 1.

Как видно, в самцах и самках горбуши, имеющих близкие значения масс, концентрации элементов практически не различаются. Лишь на уровне тенденций просматриваются несколько большие содержания Zn, Pb и Hg в женских особях. В кете, все экземпляры которой были заметно крупнее горбуши, определяемые элементы присутствовали в более высоких количествах. Из выловленных рыб самки кеты были крупнее самцов, и концентрации всех элементов, за исключением меди, в них были также выше, чем в мужских особях. Однако, несмотря на все вариации, концентрации токсичных элементов в выловленных в океане особях горбуши и кеты были ниже установленных в России уровней ПДК и еще ниже, чем в нормативах, принятых в Канаде и США.

В работе Истона с коллегами [20] сообщалось о содержании ртути в образцах диких и выращенных на ферме лососей, а также в коммерческой продукции из лососей Канады (Британская Колумбия) и Аляски (США), диапазон которой в диких и садковых лососях находился в пределах 0.025–0.072 мг/кг и 0.017–0.042 мг/кг сырой массы соответственно. Как видно, в наших лососях концентрации ртути выше (0.06–0.15), но ПДК, принятых в России, и тем более в США, они не достигают. Здесь важно подчеркнуть, что зару-

Таблица 2. Среднее содержание микроэлементов в мышцах тихоокеанских лососей (июль, 2013)

Объект исследования ($M \pm m, n = 3$)	Определяемые элементы, мкг/г сырой массы					
	Zn	Cu	Cd	Pb	As	Hg
Горбуша, ♂	1.24 ± 0.31	0.10 ± 0.04	0.03 ± 0.02	0.45 ± 0.10	0.89 ± 0.32	0.02 ± 0.01
Горбуша, ♀	1.33 ± 0.25	0.11 ± 0.05	0.04 ± 0.01	0.55 ± 0.10	0.97 ± 0.42	0.04 ± 0.01
Кета, ♂	1.74 ± 0.40	0.15 ± 0.06	0.05 ± 0.03	0.63 ± 0.15	1.25 ± 0.44	0.06 ± 0.01
Кета, ♀	1.88 ± 0.36	0.16 ± 0.07	0.06 ± 0.02	0.78 ± 0.10	1.36 ± 0.57	0.08 ± 0.01

Таблица 3. Концентрация микроэлементов в мышцах (филе) садковой семги, выращенной в разных странах

Страна	Год	Концентрация токсичных элементов, мкг/г сырой массы						Источник
		Zn	Cu	Cd	Pb	As	Hg	
Исландия	2004	–	–	0.08	0.15	0.80	0.073	[16]
Норвегия	2002	–	–	0.03	0.02	2.33	0.072	[20]
Норвегия	2003	18.50	1.11	0.00	0.10	0.53	0.09	[27]
Норвегия	2007	5.48	0.49	0.11	0.09	0.45	0.129	[29]
Норвегия	2010	17.25	1.13	0.01	0.08	1.13	0.09	[28]
Канада	2007	7.50	0.38	0.01	0.02	0.90	0.2	[24]

бежные авторы, исходя в основном из коммерческих интересов, сообщают данные о содержании микроэлементов в филе рыб. Мы же, обсуждая результаты, приведенные в табл. 1, рассматриваем тушки рыб целиком. Для корректного сравнения наших результатов с данными, сообщаемыми в работах иностранных авторов, мы также определили концентрации элементов в мышцах тихоокеанских лососей. Диапазон концентраций ртути в мышцах горбуши и кеты (табл. 2) – от 0.02 до 0.08 мкг/г – практически идеально совпадает с данными для диких лососей, приводимыми М.Д. Истоном с соавторами.

Согласно данным табл. 2, концентрации всех элементов выше в мышцах более крупной и дольше нагуливающейся в море кеты, чем горбуши. Факт большего содержания элементов в более крупных и дольше находящихся в море особях лососей давно известен, и здесь он еще раз подтверждается. Как отмечали канадские авторы [24], сделавшие определение элементов в рыбах из прибрежных вод Британской Колумбии, уровни концентраций в диких лососях могут отражать географические вариации в среде, видоспецифические различия в биологии и экологии организмов. Так, в дикой чавыче, долгоживущей крупной рыбе с широким спектром питания (от различных ракообразных до относительно крупных рыб [4]), концентрация ртути значительно выше (на порядки величин), чем в меньших, короткоживущих, питающихся планктоном горбуше и кете.

Литературные данные для атлантического лосося – семги, выращенной в садках (табл. 3), позволяют также сравнить их с полученными нами результатами. Анализ микроэлементного состава двух групп лососей показывает, что ртути в тихоокеанских лососях примерно столько же, как в атлантическом лососе, хотя концентрация этого строго регламентируемого элемента наиболее низка в мышцах тихоокеанской горбуши. Мышьяк в образцах диких тихоокеанских лососей распределен более однородно, изменяясь от 0.89 мкг/г в горбуше до 1.36 мкг/г в кете. В садковой семге наибольшая изменчивость наблюдается в филе норвежских рыб – от 0.45 до 2.33 мкг/г, хотя в среднем в обеих группах лососей концентрации мышьяка довольно близки. Концентрации кадмия в норвежских образцах, измеренные в разные годы, отличаются на порядок величин, изменяясь от неопределяемых следов до 0.11 мкг/г. В канадских и исландских образцах количество этого элемента также весьма контрастно, хотя и остается в пределах одного порядка величин. По содержанию кадмия тихоокеанские лососи находятся между исландскими и канадскими рыбами.

Если картина по распределению трех рассмотренных элементов – Hg, As, Cd – в филе тихоокеанских и атлантических лососей выглядит более или менее сходной, то содержание трех остальных элементов в рыбах разных групп существенно различается и требует более глубокого анализа причин.

Сравнение данных таблиц 2 и 3 показывает, что в филе выращенной в садках семги содержание цинка и меди в 5–10 раз выше, чем в мышцах диких тихоокеанских лососей. Как мы отметили выше, Zn и Cu – это трассеры антропогенного влияния на среду и биоту. Несомненно, что на выращиваемых в прибрежной зоне лососях скажется более высокое загрязнение мелководья по сравнению с открытыми океаническими водами. Скажется и влияние корма, приготавливаемого человеком, причем, иногда из пресноводных рыб. Наконец, на норвежских рыбах, как бы ни старались фирмы-производители, скажется влияние Гольфстрима, мощного потока, начинающегося у берегов Америки, собирающего ее береговые стоки и разгружающегося у скандинавских берегов.

Как можно видеть, в отличие от выращиваемых на фермах атлантических лососей дикие тихоокеанские лососи кета и горбуша, выловленные в прикурильских водах, имеют большие концентрации свинца. Если в филе садковой семги, как из Атлантики, так и восточной Пацифики (Канада) содержание свинца находится в диапазоне 0.02–0.15 мкг/г, то в мышцах лососей из прикурильских вод океана оно нарастает от 0.45 мкг/г в самцах горбуши до 0.78 мкг/г в самцах кеты.

Как уже отмечалось [24], уровни концентраций в диких лососях могут отражать географические вариации в среде. И не только в лососях и других рыбах, но и во всех обитателях водной среды (как, естественно, и наземной). При кажущейся однородности водных масс, в море, как и на суше, существуют биогеохимические провинции, проявляющиеся в своеобразии минерального состава организмов [12, 25]. Тихоокеанское огненное кольцо, начинающееся вулканами Камчатки, продолжающееся вулканами Курильских островов, Японских островов и более южных островных дуг Западной Пацифики, является мощным источником геохимического воздействия на морскую среду. Поставщиком химических элементов в окружающую среду является подводный и надводный вулканизм. Как оказалось, например, на маленьком ненаселенном коралловом острове Био (Соломоновы острова) причиной специфической геохимической обстановки в прибрежных водах, вызывающей возрастание содержания металлов в каулерповых и халимедовых водорослях, являются пеллопады, приносимые от вулкана Мбано, расположенного в 100 км от островка [26]. В результате поствулканических процессов ежедневно из глубинных слоев выбрасываются килограммы Fe, Mn, Ag, Cu и других металлов, которые после растворения в термальных водах разносятся водотоками [6].

Курило-Камчатский желоб, поставляющий благодаря апвеллингу биогенные [8] и другие элементы [5] в верхние слои воды, также является ис-

точником формирования импактных геохимических зон в северо-западной части Тихого океана. Изучая содержание тяжелых металлов (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr) в бурых водорослях, в двустворчатых и брюхоногих моллюсках, обитающих на Курильских островах, а также обрастающих навигационные буи вдоль всего побережья северо-западной Пацифики, мы неоднократно убеждались в существовании биогеохимических провинций в море, выявляемых по повышенным концентрациям элементов в организмах [2, 3, 5, 13, 23].

“Судьба” микроэлементов в океане зависит от того, в какой форме находится элемент в морской воде. Металлы в растворенной форме играют важную роль в жизнедеятельности планктона и именно в этой форме доступны фитопланктону. Во взвеси микроэлементы входят в решетку глинистых и обломочных минералов терригенного материала (речной сток, атмосферная пыль, абразия берегов, вулканизм) – силикатная форма. Они входят также в состав органических частиц взвеси – биогенная форма. Планктонные организмы переводят растворенные формы многих элементов во взвешенные – связывают их в скелетные образования, концентрируют для образования мягких тканей, преобразуют в металлорганические соединения. При отмирании организмов и их распаде элементы вновь возвращаются в воду в растворенной форме. Количество взвеси почти всегда максимально в верхнем слое, особенно в зоне скачка плотности, где скапливаются в основном биогенные частицы взвеси. Наконец, микроэлементы могут сорбироваться на органических и терригенных частицах взвеси и мицеллах гидроокиси железа и марганца – гидрогенная форма.

На широтном разрезе через зону Перуанского апвеллинга показано, как меняется соотношение форм металлов во взвеси в поверхностных водах по мере удаления от берега: силикатная форма преобладает в прибрежье, биогенная форма максимальна в зоне наивысшего развития планктона (она быстро падает с глубиной), гидрогенная достигает максимума в открытых водах [1].

Формой нахождения элемента в океанской воде определяется его подвижность, и она тем выше, чем большая часть его общего содержания находится в растворе. При переходе от речных вод через окраинные моря к океанским условиям подвижность всех элементов существенно возрастает, что обусловлено осаждением преобладающей части речной взвеси и обогащением за счет этого океанских вод растворенными формами элементов. Практически все элементы в пелагических частях океанов на 80–90% и более находятся в растворенной форме [1].

Таблица 4. Многолетняя динамика среднегодовой биомассы макропланктона в пелагиали (0–1000 м) различных районов российских вод, млн т [15]

Район	1980–1990	1991–1995	1996–2005
Берингово море	106	104	123
Охотское море	434	396	362
Японское море	55	72	55
Прикурильские воды океана	226	221	231
Прикамчатские воды океана	83	37	71
Всего (0–1000 м)	904	830	822
Всего (0–200 м)	597	548	550

Собрав пробы морской взвеси в верхней толще воды на востоке Северной Атлантики между 62° с.ш. и 5° ю.ш. в течение июня–августа 2003 г. и проанализировав образцы на очень широкий круг элементов, Барретт с коллегами [17] показали, что между 10° и 20° с.ш. на поверхности воды наблюдается интенсивное отложение пыли из пустыни Сахара, приносимой преобладающими в низких широтах ветрами. Несколько раньше почти той же группой авторов [19] при изучении поверхностной взвеси в восточной части Северной Атлантики было выявлено значительное антропогенное воздействие на ее состав. Наибольшие концентрации всех металлов (Cu, Zn, Cr, Ni, Pb), найденные между 45° и 60° с.ш., указывали на индустриальную эмиссию аэрозольных источников Северной Америки и Европы.

Однако аналогичных работ по Тихому океану пока не сделано, и данных по океанической взвеси поверхностных вод практически нет.

В открытом океане свинец, как и другие микроэлементы, присутствует в очень низких концентрациях, буквально в следовых количествах — от 5 до 150 пмоль/кг⁻¹ [18]. Однако он обладает высокой сорбционной способностью, т.е. сродством к поверхностям, как живых, так и мертвых организмов. Адсорбция на поверхности любых мелких частиц, в том числе минеральных, приводит к “пассивному” выведению свинца из верхнего слоя и постепенному его осаждению. В зоне же, богатой питательными веществами, поставляемыми апвеллингами и вулканизмом, которая насыщена планктонными организмами, от нано- и микропланктона, средних и крупных клеток фитопланктона до мирного зоопланктона, а также пеллетами и отмершими организмами, появляется большое количество биогенной взвеси и Pb_{взв.}

Прикурильские воды Тихого океана хорошо известны как один из наиболее продуктивных районов Мирового океана. Как следует из данных табл. 4, продуктивность этих вод, находящихся в

зоне специфической биогеохимической провинции, уступает лишь главнейшему рыбопромысловому району дальневосточных морей — Охотскому морю. При этом в течение многих лет она остается неизменно высокой. Можно думать, что при таком обилии макропланктона количество мелких и тонких частиц, способных сорбировать свинец, будет еще более обильным и отличаться на порядки величин. Очевидно, поэтому свинец, адсорбированный на биогенной взвеси, легче фиксируется организмами более высокого трофического уровня — сначала зоопланктоном, а затем его потребителем нектоном, в том числе массовыми рыбами верхней пелагиали, каковыми являются исследованные нами тихоокеанские лососи горбуша и кета.

В отличие от бентосных организмов, не покидающих местообитаний, лососи совершают длительные миграции по обширным акваториям океана, и может показаться, что специфика биогеохимических условий в Курило-Камчатском регионе не особенно отразится на их минеральном составе. Но, как видим, это не так. Охотоморские стада горбуши и кеты после ската молды в море и ее почти месячного пребывания в эстуарной зоне для адаптации к морским условиям постепенно двигаются к Курильской гряде, пересекают ее и после нагула в высококормной акватории к зиме мигрируют в зону Полярного фронта. Весной с прогревом вод и развитием планктона горбуша постепенно смещается к северу, опять нагуливается вдоль Курил и Курило-Камчатского желоба и через южные Курильские проливы уже в летнее время входит в Охотское море, направляясь к нерестилищам. Кета совершает более пространственные миграции. После зимовки она поднимается к Командоро-Алеутскому желобу, входит в глубоководную западную часть Берингова моря и после нагула в этой зоне спускается вдоль Камчатки, постепенно двигаясь к Полярному фронту на зимовку. Совершив не менее трех циклов переходов в Берингово море, она, наконец, спускается по кормному маршруту вдоль Камчатки, Курил, Курило-Камчатского желоба и через южные Курильские проливы устремляется к рекам азиатского побережья [15]. Специфика геохимических условий за время нагула рыб в высококормном Курило-Камчатском регионе, богатом биогенной взвесью с высоким содержанием Pb_{взв.} отражается на каждом из видов лососей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, дикие тихоокеанские лососи горбуша и кета, выловленные в прикурильских водах, по содержанию в них нормируемых токсичных элементов Cd, Pb, As и Hg отвечают требованиям, предъявляемым к морепродуктам. Содержание каждого из элементов не превыша-

ет предельно допустимых концентраций, утвержденным российским стандартом. Большой научный и практический интерес представляют выявленные различия в содержании элементов в диких тихоокеанских лососях и садковом атлантическом лососе – семге. Более высокие концентрации Zn и Cu в выращиваемых на фермах лососях и Pb в кете и горбуше из прикурильских вод имеют одну и ту же причину – геохимические условия среды. Но импактная ситуация в прибрежных водах, фиксируемая по таким трассерам, как цинк и медь, вызвана антропогенной деятельностью, импактные же зоны в водах Западной Пацифики формируются под влиянием природных факторов – современного вулканизма и апвеллингов.

Авторы благодарят главного специалиста Испытательного центра “Океан” Дальневосточного федерального университета (ДВФУ) А.А. Лукашкину за помощь в определении микроэлементов в лососях; доктора технических наук, профессора Ю.В. Приходько за предоставление приборной базы; доктора биологических наук, профессора В.П. Шунтова и доктора географических наук В.М. Шулькина за консультации по работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (соглашение № 14-50-00034) и стипендии “Гензо Шимадзу”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеев В.В., Лисицын А.П. Микроэлементы // Химия океана. Т. 1. Химия вод океана / Отв. Ред. О.К. Бордовский, В.Н. Иваненков. М.: Наука, 1979. С. 337–375.
2. Кавун В.Я., Христофорова Н.К. Роль современного вулканизма и апвеллингов в формировании импактных зон тяжелых металлов в прибрежных водах Курильских островов // Мелководные газогидротермы и экосистема бухты Кратерной (вулкан Ушишир, Курильские острова). Кн. 1. Ч.2. Владивосток: ДВО РАН, 1991. С. 114–120.
3. Кавун В.Я., Христофорова Н.К., Шулькин В.М. Микроэлементный состав тканей мидии съедобной из прибрежных вод Камчатки и северных Курил // Экология. 1989. № 3. С. 53–59.
4. Карпенко В.И. Оценка состояния запасов и управление промыслом тихоокеанских лососей на Камчатке. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2013. 65 с.
5. Малиновская Т.М., Христофорова Н.К. Характеристика прибрежных вод Южных Курил по содержанию микроэлементов в организмах-индикаторах // Биол. моря. 1997. Т. 23. № 4. С. 239–246.
6. Мархинин Е.К. Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
7. Мировой обзор рыболовства и аквакультуры: Состояние мирового рыболовства и аквакультуры 2012 года. Рим: ФАО, 2012. 118 с.
8. Пронн М.В., Пронн Л.Н. Гидрохимические показатели и содержание хлорофилла *a* в прибрежных водах Курильских островов // Биол. моря. 1988. № 4. С. 68–70.
9. Рухлов Ф.Н. Жизнь тихоокеанских лососей. Южно-Сахалинск: Дальневосточное книжное изд-во, Сахалинское отделение, 1982. 112 с.
10. Темных О.С. Азиатская горбуша в морской период жизни: биология, пространственная дифференциация, место и роль в пелагических сообществах: Автореф. дис... докт. биол. наук. Владивосток: ТИПРО-центр, 2004. 47 с.
11. Христофорова Н.К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами. Л.: Наука, 1989. 192 с.
12. Христофорова Н.К., Богданова Н.Н., Обухов А.И. Содержание некоторых металлов в мягких тканях двусторчатого моллюска *Tridacna squamosa* у островов тропической зоны Тихого океана в связи с условиями существования // Биол. моря. 1979. № 3. С. 67–73.
13. Христофорова Н.К., Кавун В.Я. Мониторинг состояния вод дальневосточных морей по мидиям-обработателям навигационных буев // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300. № 5. С. 1274–1276.
14. Шунтов В.П., Темных О.С. Новые представления об экологии тихоокеанских лососей в морской период жизни // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Вып. 3. Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 13–25.
15. Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Владивосток: ТИПРО-центр, 2008. Т. 1. 481 с.; Т. 2. 2011. 473 с.
16. Ásmundsdóttir Á.M., Auðunsson G.A., Gunnlaugsdóttir H. Undesirable substances in seafood products – Results from monitoring activities in year 2004 // Icelandic fisheries laboratories report 33-05. 2005. 14 p.
17. Barrett P.M., Resing J.A., Buck N.J. et al. The trace element composition of suspended particulate matter in the upper 1000 m of the eastern North Atlantic Ocean: A16N // Mar. Chem. 2012. № 142–144. P. 41–53.
18. Bruland K.W., Lohan M.C. The control of trace metals in seawater. Chpt. 2 in The Oceans and Marine Geochemistry. V. 6. / Ed. Harry Elderfield in Treatise on Geochemistry. Eds. Holland H.D. and Turekian K.K. 2004. P. 23–47.
19. Buck C.S., Landing W.M., Resing J.A., Measures C.I. The solubility and deposition of aerosol Fe and other trace elements in North Atlantic Ocean: observation from the A16N CLIVAR/CO2 repeat hydrography section. Mar. Chem. 2010. № 120. P. 57–70.
20. Easton M.D., Lusniak D., Von der Geest E. Preliminary examination of contaminant loadings in farmed salmon, wild salmon and commercial salmon feed // Chemosphere. 2002. № 46. P. 1053–1074.
21. Foran J.A., Hites R.A., Carpenter D.O. et al. A survey of metals in tissues of farmed Atlantic and wild Pacific salmon // Environ. Toxicol Chem. 2004. № 23. P. 2108–2110.
22. Hites R.A., Foran J.A., Carpenter D.O., Hamilton M.C., Knuth B.A., Schwager S.J. Global assessment of organic contaminants in farmed salmon // Science. 2004. № 303. P. 226–229.

23. *Kavun V.Ya., Shulkin V.M., Khristoforova N.K.* Metal accumulation in mussels of the Kuril Islands, north-west Pacific Ocean // *Marine Environmental Res.* 2002. № 53. P. 219–226.
24. *Kelly B.C., Ikononov M.G., Higgs D.A. et al.* Mercury and other trace elements in farmed and wild salmon from British Columbia, Canada // *Environ. Toxicol. Chem.* 2008. № 27. P. 1361–1370.
25. *Khristoforova N.K., Bogdanova N.N.* Environmental conditions and heavy metal content of marine organisms from atolls of the Pacific Ocean // *The reef and man: Proc. 4th Int. Coral Reef Symp., Manila.* 1981. V. 1. P. 161–162.
26. *Khristoforova N.K., Bogdanova N.N.* Mineral composition of seaweeds from coral islands of the Pacific Ocean as a function of environmental conditions // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1980. № 3. P. 25–29.
27. *Liaset B., Julshamn K., Espe M.* Chemical composition and theoretical nutritional evaluation of the produced fractions from enzymic hydrolysis of salmon frames with ProtamexTM // *Process Biochemistry.* 2003. № 38. P. 1747–1759.
28. *Malde M.K., Bügel S., Kristensen M. et al.* Calcium from salmon and cod bone is well absorbed in young healthy men: a double-blinded randomized crossover design // *Nutrition & Metabolism.* 2010. № 7. 9 p.
29. *Sivakumar V., Driscoll B., Obenauf R.* Trace Elements in Fish and Fish Oil Supplements // *Atomic Spectroscopy.* 2007. № 28. P. 13–16.

Concentrations of Microelements in the Pacific and Atlantic Salmon

N. K. Khristoforova, V. Yu. Tsugankov, M. D. Boyarova, O. N. Lukyanova

This study reports the measured levels of Hg, As, Cd, Pb, Zn, and Cu in wild salmon (chum and pink) from the region of the Kuril Islands. Concentrations of these elements in Pacific salmon were below human health consumption norms. Some differences in the metal concentrations were observed between the farmed Atlantic salmon and wild salmon. Zn and Cu concentrations in the flesh were higher in farmed salmon compared to wild salmon. Pb showed bigger accumulation in wild salmon than in farmed salmon. Our findings indicate in both cases that the causes are the same: geochemical conditions in the environment. For the farmed salmon these conditions are related to the anthropogenic load, while for the wild salmon it is related to the volcanic activity and upwelling in the West Pacific.