



ТЯЖЁЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МЫШЬЯК В ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБАХ ЯПОНСКОГО, ОХОТСКОГО И БЕРИНГОВА МОРЕЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

© 2022 г. М. К. Гамов¹, А. Е. Иванова², Е. К. Миронова¹, В. Ю. Цыганков¹

¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

²Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток, Российская Федерация

E-mail: gamovmota123456@gmail.com

Поступила в редакцию 20.05.2021; после доработки 25.10.2021;
принята к публикации 26.09.2022; опубликована онлайн 29.11.2022.

В работе обобщены сведения о концентрациях токсичных элементов As, Pb, Cd и Hg в промысловых рыбах дальневосточных морей — Японского, Охотского и Берингова — на основе анализа литературных данных. Изучение показало, что в целом основные промысловые объекты и рыбохозяйственные бассейны соответствуют санитарно-гигиеническим нормативам, однако наличие импактных природных зон в ареалах и на пути миграции рыб способствует увеличению концентраций токсичных элементов в рыбных объектах промысла, а в некоторых случаях уровни превышают предельно допустимые концентрации. Необходимо продолжать мониторинг токсичных микроэлементов в промысловых объектах и рыбохозяйственных бассейнах дальневосточных морей.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, токсичные элементы, дальневосточные моря

В последнее время отмечен рост содержания загрязняющих веществ в морских экосистемах (Донец и Цыганков, 2019), что увеличивает приоритетность пищевой безопасности морепродуктов. Именно поэтому необходимо осуществлять химическую оценку качества рыбного сырья, в частности с позиции загрязнения его тяжёлыми металлами (Стеблевская и др., 2016).

Тяжёлые металлы (далее — ТМ) — это металлы с высокой плотностью и токсическим действием даже в очень низких концентрациях (Duffus, 2002). Они попадают в природные экосистемы в результате естественных процессов и антропогенной деятельности (Li et al., 2019). ТМ считаются опасными из-за своего токсического и кумулятивного воздействия на живые организмы, а также из-за стойкости в окружающей среде.

Известно, что кобальт (Co), медь (Cu), хром (Cr), железо (Fe), марганец (Mn) и цинк (Zn) являются эссенциальными микроэлементами, они необходимы для выполнения различных биохимических и физиологических функций (Dökmeci et al., 2014). Другие металлы, такие как кадмий (Cd), ртуть (Hg) и свинец (Pb), негативно влияют на живые организмы даже в относительно невысоких концентрациях (Башкин и Касимов, 2004 ; Hassan & Aarts, 2011).

Мышьяк (As) — канцерогенный химический элемент, обладающий некоторыми свойствами металлов. В водных экосистемах он может существовать в органической и неорганической (более токсичной) формах (Солодухина, 2014). При длительном употреблении в пищу продуктов, содержащих соединения мышьяка, могут возникать опасные заболевания, например ишемическая

болезнь сердца и неврологические патологии, также возможна задержка физического и умственного развития у детей и подростков. Основными результатами воздействия мышьяка на респираторную систему являются болезни слизистой оболочки верхних дыхательных путей и эмфизема лёгких, приводящие к увеличению риска заболевания раком лёгких. Может также развиваться рак кожи, печени, мочевого пузыря (Макаров, 2012).

В основном кадмий, свинец, ртуть и мышьяк накапливаются в печени, которая интенсивно аккумулирует металлы и является функциональным депо этих элементов и одновременно участвует в процессах детоксикации. Второстепенное положение по накоплению токсичных элементов (свинец, мышьяк и кадмий) занимает мышечная ткань; её также можно отнести к депонирующим органам, если учесть, что мышцы составляют большой процент от массы тела. В основном повышенное содержание мышьяка регистрируют в гонадах (Глазунова, 2007). Кадмий активно замещает кальций в клеточных механизмах регулирования концентрации Са (через кальциевые каналы). Поступление в организм данного токсиканта происходит преимущественно из водной среды через жабры, которые играют большую роль в водно-солевом обмене, регулируя поглощение и выделение воды и солей (Чемагин и др., 2019). У рыб свинец накапливается преимущественно в жабрах, печени, почках и костях. В водоёмах свинец может быть прочно адсорбирован частицами донных отложений, и тогда он будет поступать в организм через жабры либо вместе с пищей. В водной среде ртуть под воздействием микроорганизмов трансформируется в метилртуть, которая, попадая в организм рыб алиментарным путём и через жабры во время дыхания, интенсивно поглощается тканями и накапливается в жировых клетках. Кроме того, метилирование неорганической ртути может происходить в печени и кишечнике рыб. В растворённом виде мышьяк встречается в трёх- и пятивалентной формах. Поглощение рыбами мышьяка из воды осуществляется через жабры и кишечник (Грициняк та ін., 2015). Анализируемые органы и ткани аккумулируют различные металлы в разной степени. Распределение металлов в организме рыб характеризуется неравномерностью и зависит от функциональных особенностей органов, их кумулятивной активности и химических свойств самого металла (Глазунова, 2007).

Вопрос о загрязнении природных экосистем тяжёлыми металлами стал особенно актуальным в середине 1960-х гг. в связи с отравлением людей соединениями ртути и кадмия. Они потребляли в пищу продукты, выращенные или выловленные в среде, которая была загрязнена этими поллютантами (Langston, 1990). Такие случаи подтверждают необходимость проведения мониторинга водных объектов для обнаружения в них токсичных элементов и для предотвращения подобных ситуаций.

Допустимый уровень содержания тяжёлых металлов и мышьяка в России определяют следующие нормативные документы, контролирующие безопасность пищевой продукции: СанПиН 2.3.2.1078-01 (2002) и Технический регламент Таможенного союза 021/2011 (2011).

В настоящее время в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне вылавливают порядка 99 % всех лососёвых от общего улова по России, 100 % крабов, свыше 90 % камбаловых, более 40 % сельди и около 60 % моллюсков; по объёму добываемых российскими рыбаками водных биоресурсов Дальневосточный бассейн занимает первое место (Павлова и др., 2020). Именно поэтому необходимо ежегодно осуществлять исследования морских гидробионтов с целью контроля промысловых зон.

На сегодняшний день большое количество публикаций посвящено определению микроэлементного состава морских организмов дальневосточных морей (Лебедев и Полякова, 2019; Христофорова и Кобзарь, 2017, 2018; Чусовитина и др., 2020; Khristoforova et al., 2015b и др.). В связи с этим цель работы — обобщить литературные данные о содержании токсичных элементов (кадмий, свинец, мышьяк и ртуть) в промысловых рыбах дальневосточных морей России.

Методы определения концентрации тяжёлых металлов и мышьяка

При определении концентрации микроэлементов авторы статей использовали различные по способу работы измерительные приборы.

В основном исследователи применяли метод атомной абсорбции, основанный на абсорбции электромагнитного излучения определённой длины волны свободными атомами анализируемого элемента. Этот метод используют в двух вариациях — с электротермическим или пламенным атомизатором. Электротермическая атомизация является более чувствительной к следовым концентрациям элементов в пробе от тысячных до десятых долей $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$, чем пламенный метод (его чувствительность намного меньше к концентрациям от десятых долей до десятков и сотен $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$). В то же время диапазон обнаружения у него больше (от 10^{-1} до 10^5 нг), чем в электротермическом варианте (от 10^{-5} до 10 нг) (Ковековдова и Симоконь, 2004 ; Ковековдова и др., 2016 ; Burger et al., 2007 ; Khristoforova et al., 2015a, 2016).

При определении ртути авторы применяли метод инверсионной вольтамперометрии и метод холодного пара. Инверсионная вольтамперометрия заключается в выделении электролизом анализируемого элемента из разбавленного раствора на стационарном индикаторном электроде с последующим анодным растворением полученной амальгамы и регистрацией вольтамперной кривой. Метод позволяет обнаруживать содержание веществ на уровне десятых и сотых долей $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ (Khristoforova et al., 2015a, 2016). Определение ртути методом холодного пара основано на её свойстве находиться при нормальных условиях в газовой фазе в виде свободных атомов. Пределы обнаружения при работе методом холодного пара составляют от 0,001 до 0,5 $\text{мкг}\cdot\text{мл}^{-1}$ (Ковековдова и Симоконь, 2004 ; Ковековдова и др., 2016 ; Burger et al., 2007 ; Hwang et al., 2019).

Сущность метода рентгенофлуоресцентного анализа заключается в получении спектра исследуемого материала под воздействием рентгеновского излучения. Диапазон определяемых концентраций — от 0,0001 до 100 % (Стеблевская и др., 2013, 2016 ; Чусовитина и др., 2020).

Токсичные элементы в промысловых видах рыб Охотского моря

Охотское море — одно из наиболее крупных и глубоких морей нашей страны. Его площадь составляет 1603 тыс. км^2 , объём — 1318 тыс. км^3 , средняя глубина — 821 м, наибольшая — 3916 м (Добровольский и Залогин, 1982). Оно характеризуется импактными геохимическими условиями, которые сформированы надводным и подводным вулканизмом и поствулканизмом Курильских островов, а также апвеллингами, выносящими из глубин Курило-Камчатской впадины в поверхностный слой множество химических элементов (Khristoforova et al., 2019b). Сток реки Амур, выносящий в акваторию Охотского моря большое количество загрязняющих веществ, активное судоходство и добыча нефти на шельфе — все эти факторы могут негативно отражаться на микроэлементном составе морских экосистем Охотского моря (Исаков и Касперович, 2007).

Тихоокеанские лососи (*Oncorhynchus Suckley, 1861*). Это ценнейшие промысловые рыбы: по объёму вылова в текущем столетии они стоят на втором-третьем месте (после минтая и сельди). Уловы тихоокеанских лососей на 90 % обеспечены тремя видами — горбушей, кетой и неркой (Khristoforova et al., 2015b). Эти виды являются подходящим объектом для мониторинговых исследований загрязнения окружающей среды микроэлементами из-за своей пищевой ценности, высокой численности, специфичности биологических циклов и жизненных стратегий. Во время нагула в океане они совершают длительные сезонные миграции, и вследствие этого в их теле могут накапливаться значительные концентрации микроэлементов (Khristoforova et al., 2015b).

В 2013–2016 гг. проведены исследования целых тушек лососёвых (кета и горбуша) (рис. 1). Содержание токсичных элементов не превышало показателей предельно допустимых уровней (далее — ПДУ) (ТР ТС 021/2011, 2011), однако можно отметить приближение концентраций свинца в тушке кеты, выловленной в 2013 г. ($0,98 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы), к максимально допустимому значению ($1,0 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы).

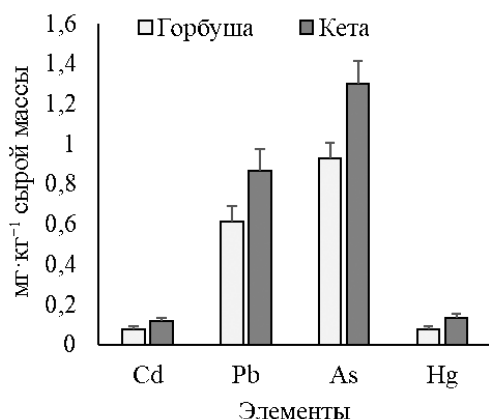


Рис. 1. Средние концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в тушке горбуши и кеты, Охотское море (Khristoforova et al., 2015a)*

Fig. 1. Mean concentrations of heavy metals and arsenic in the pink and chum salmon carcasses, the Sea of Okhotsk (Khristoforova et al., 2015a)*

В тканях кеты концентрации микроэлементов были выше, чем в тканях горбуши, что можно объяснить более длительным жизненным циклом и большей массой кеты (Зеленихина и др., 2015).

В печени кеты отмечены высокие концентрации свинца, превышавшие ПДУ (ТР ТС 021/2011, 2011) (рис. 2). По-видимому, это связано с её депонирующей функцией (Khristoforova et al., 2016). Содержание ртути не превышало ПДУ.

Вероятно, такие уровни накопления обусловлены длительным периодом жизни лососёвых и тем, что места их нагула расположены вблизи районов, характеризующихся аномально высокими концентрациями микроэлементов (Khristoforova et al., 2016).

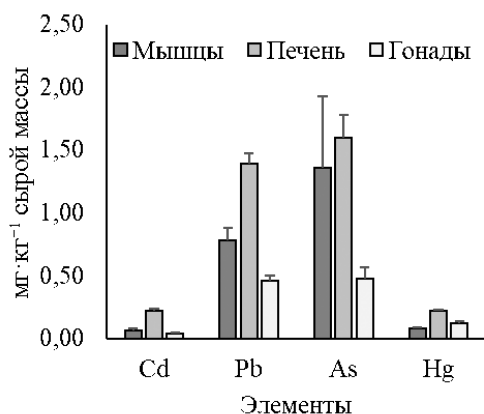


Рис. 2. Максимальные средние концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в органах кеты, Охотское море (Khristoforova et al., 2016)

Fig. 2. Maximum mean concentrations of heavy metals and arsenic in the chum salmon organs, the Sea of Okhotsk (Khristoforova et al., 2016)

Рогатковые (Cottidae Bonaparte, 1831). Рогатковые являются одним из наиболее типичных и разнообразных по видовому составу семейств северной части Тихого океана. Cottidae ведут придонный образ жизни и могут совершать сезонные миграции (Матвеев и Терентьев, 2016).

В 2013 г. выловлены представители семейства рогатковых рода *Myoxocephalus Tilesius, 1811* (керчаки) (Ковековдова и др., 2013). При изучении микроэлементного состава обнаружено существенное превышение ПДУ кадмия в печени: зарегистрировано значение 4,52 мг·кг⁻¹ сырой массы при норме до 0,7 мг·кг⁻¹ сырой массы. Также в ней выявлены мышьяк, свинец и ртуть (табл. 1). Можно сделать вывод, что печень является главным аккумулялирующим органом (Глазунова, 2007).

* **Примечание.** ПДУ (ТР ТС 021/2011, 2011) токсичных элементов в свежей, охлаждённой и мороженой морской рыбе: Pb — 1,0; Cd — 0,20; As — 5,0; Hg — 0,50 мг·кг⁻¹ сырой массы. В икре и молоках рыб: As — 1,0; Cd — 1,0; Hg — 0,2 мг·кг⁻¹. В печени рыб: Cd — 0,7; Hg — 0,2 мг·кг⁻¹ сырой массы.

Note. Maximum permissible levels (TR TS 021/2011, 2011) of toxic elements in fresh, chilled, and frozen sea fish: Pb, 1.0; Cd, 0.20; As, 5.0; Hg, 0.50 mg·kg⁻¹ wet weight. In fish caviar and milt: As, 1.0; Cd, 1.0; Hg, 0.2 mg·kg⁻¹ wet weight. In fish liver: Cd, 0.7; Hg, 0.2 mg·kg⁻¹ wet weight.

Мышьяк накапливается в основном в мышцах и гонадах. Зарегистрированные исследователями значения (см. табл. 1) могут свидетельствовать о влиянии терригенного и антропогенного загрязнения, поскольку нагул керчаков во время миграций происходит рядом с прибрежной зоной (Вилер, 1983).

Таблица 1. Максимальные концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в органах рыб рода *Myoxocephalus*, Охотское море, 2013 г., мг·кг⁻¹ сырой массы (Ковековдова и др., 2013)

Table 1. Maximum concentrations of heavy metals and arsenic in organs of *Myoxocephalus* fish, the Sea of Okhotsk, 2013, mg·kg⁻¹ wet weight (Kovekovdova et al., 2013)

Орган	Cd	Pb	As	Hg
Печень	4,52	0,05	0,84	0,09
Мышцы	0,05	0,02	1,88	0,02
Гонады	0,60	0,02	1,42	0,01

Камбаловые (Pleuronectidae G. Cuvier 1816). Семейство камбаловых характеризуется довольно большим видовым разнообразием в Мировом океане. В основном представители Pleuronectidae встречаются в прибрежном мелководье, на приливно-отливных участках и в зоне шельфа. Могут совершать сезонные миграции. По типу питания среди камбаловых выделяют как хищников, бентофагов, так и особей со смешанным типом питания (Вилер, 1983).

При достижении большой численности некоторые представители Pleuronectidae приобретают хозяйственное значение. В настоящее время, однако, это второстепенный промысловый вид, встречающийся в качестве прилова (Datsky & Maznikova, 2017).

В 2013 г. для микроэлементного анализа выловлена камбала Шренка *Pseudopleuronectes schrenki* (Schmidt, 1904) (Ковековдова и др., 2013). В печени отмечена повышенная концентрация кадмия (1,7 мг·кг⁻¹ сырой массы), в 2,4 раза превосходящая ПДУ (0,7 мг·кг⁻¹ сырой массы). Концентрация мышьяка в гонадах (1,2 мг·кг⁻¹ сырой массы) тоже превышала ПДУ (1,0 мг·кг⁻¹ сырой массы) (рис. 3). Столь высокое содержание кадмия в печени камбалы объяснимо её обменно-депонирующей функцией, а также возможным нагулом рыбы вблизи стоков горнодобывающих предприятий.

В целом наиболее активно во всех исследуемых органах аккумулируется мышьяк. Вероятно, это связано с физиологическими особенностями камбалы.

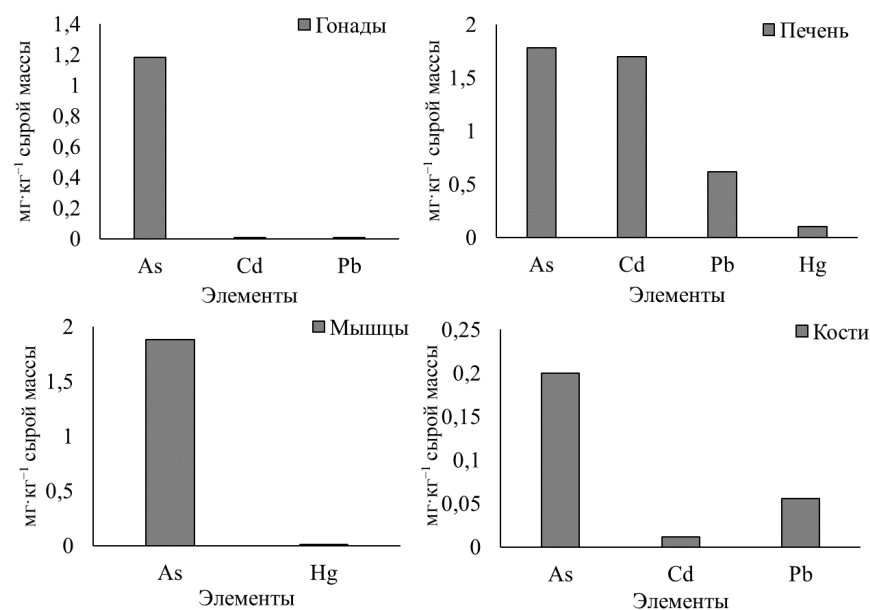


Рис. 3. Максимальные концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в органах камбалы Шренка *Pseudopleuronectes schrenki*, Охотское море (Ковековдова и др., 2013)

Fig. 3. Maximum concentrations of heavy metals and arsenic in organs of the Schrenk flounder *Pseudopleuronectes schrenki*, the Sea of Okhotsk (Kovekovdova et al., 2013)

Токсичные элементы в промысловых видах рыб Берингова моря

Берингово море — самое большое из дальневосточных морей, омывающих берега России. Его площадь составляет 2315 тыс. км², объём — 3796 тыс. км³, средняя глубина — 1640 м, наибольшая — 5500 м. Расположено на севере Тихого океана, отделено от него Алеутскими и Командорскими островами; Берингов пролив соединяет его с Чукотским морем и Северным Ледовитым океаном (Шлямин, 1958).

Антропогенное влияние на воды Берингова моря оказывает довольно активное судоходство, в связи с которым в акватории регистрируют локальные нефтяные загрязнения. Наиболее интенсивной нагрузке подвержены прибрежные участки — Анадырский лиман, бухта Угольная, а также шельф полуострова Камчатка (Камчатский залив). Особенно загрязнены воды у берегов Аляски (Балькин, 2006). Также влияние на микроэлементный состав вод могут оказывать подводные вулканы, в частности один из крупнейших — вулкан Пийпа (Astakhov et al., 2011). Нельзя не отметить шахты в пгт Угольные Копи вблизи Анадыря, где основными источниками загрязнения являются промышленные и бытовые стоки. В отдельные годы в Анадырский лиман с ними поступали нефть и нефтепродукты, сернистые и сероводородсодержащие газы, минерализованные пластовые и сточные воды нефтепромыслов и бурения скважин, шламы бурения и др. (Поддубный, 2002).

Тресковые (Gadidae Rafinesque, 1810). Тресковые относятся к пелагическим рыбам и характеризуются большим видовым разнообразием; они широко распространены в океанах и морях Северного полушария. Являются важными промысловыми объектами. Gadidae увеличиваются в размерах всю жизнь, в среднем живут до 25 лет. По типу питания среди тресковых выделяют хищников и планктонофагов (Орлов и Афанасьев, 2013).

Тихоокеанская треска не осуществляет длительных миграций; она обитает в акватории Японского, Охотского и Берингова морей, придерживаясь береговой линии. В среднем продолжительность её жизни составляет 10–12 лет (Орлов и Афанасьев, 2013). По этим причинам тресковых можно использовать в качестве биоиндикаторов.

С целью изучения микроэлементного состава в 2004 г. тихоокеанская треска *Gadus macrocephalus* Tilesius, 1810 была выловлена вблизи Алеутских островов (Burger et al., 2007). Максимальные уровни накопления отмечены в печени (рис. 4). Относительно высокую концентрацию кадмия в печени можно объяснить большим содержанием в этом органе специфических низкомолекулярных белков — металлотioneинов, являющихся концентраторами Cd (Алексеева и Тюнев, 2017).

В печени концентрация мышьяка приближается к пороговому значению в 5,0 мг·кг⁻¹ сырой массы. В мышцах же преобладают свинец и ртуть.

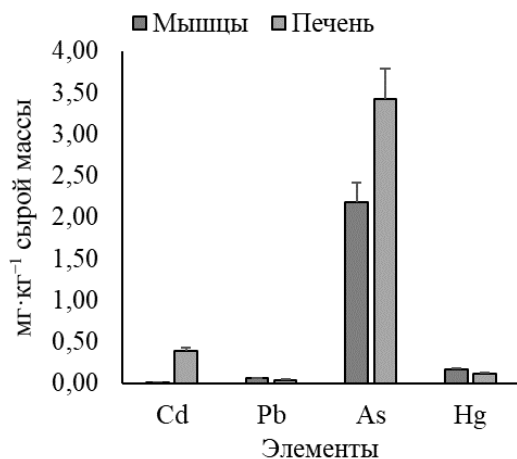


Рис. 4. Средние концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в органах тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus*, Берингово море (Burger et al., 2007)

Fig. 4. Mean concentrations of heavy metals and arsenic in organs of the Pacific cod *Gadus macrocephalus*, the Bering Sea (Burger et al., 2007)

Камбаловые (Pleuronectidae). Камбаловые были выловлены рядом с Алеутскими островами в 2004 г. (Burger et al., 2007). В почках обнаружены наибольшие концентрации таких элементов, как свинец и мышьяк. Уровень Pb ($1,2 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы) превышал ПДУ ($1,00 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы) (рис. 5). В печени преобладали кадмий, мышьяк и ртуть. Содержание Cd ($4,96 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы) почти в 7 раз превосходило ПДУ для печени ($0,7 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы). В мышечной ткани концентрация Hg была максимальной, так как в мышцах больше всего белков, связывающих ртуть (Петухов и Морозов, 1983).

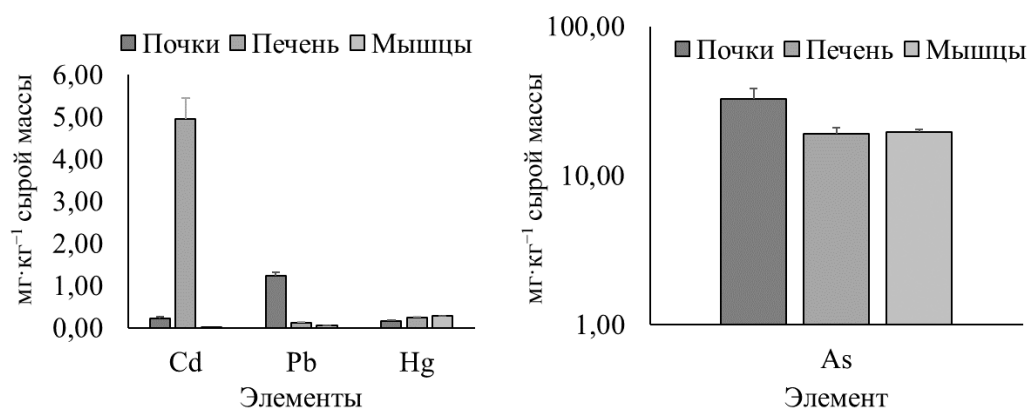


Рис. 5. Средние концентрации микроэлементов в камбале, Берингово море (Burger et al., 2007)

Fig. 5. Mean concentrations of trace elements in flounder, the Bering Sea (Burger et al., 2007)

Во всех исследуемых органах уровни содержания мышьяка превышали пороговые концентрации (ПДУ для морской рыбы — $5,00 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы, см. примечание к рис. 1), составляя $32,38 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы в почках камбалы, $18,95$ в печени и $19,45$ в мышцах. Нормы были превышены почти в 6,5, 4 и 6,5 раза соответственно.

Образцы были собраны с Алеутских островов, а именно с островов Адак, Кыска и Амчитка. Во время Второй мировой войны там проходили испытания военной техники и вооружения, что послужило причиной поступления в воду свинца, ртути, кадмия и мышьяка, а также нефтехимических веществ, полиароматических углеводородов, пестицидов и радиоактивных материалов (Public Health Assessment, 2002).

Рогатковые (Cottidae). Представители рода *Myoxocephalus* выловлены в 2004 г. рядом с Алеутскими островами (Burger et al., 2007). В печени рыб наибольшими были концентрации таких элементов, как мышьяк и кадмий. Отметим, что значение кадмия ($1,26 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы) превышало ПДУ ($0,7 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы) (рис. 6). Вероятно, это связано с тем, что печень является органом, участвующим в детоксикации организма.

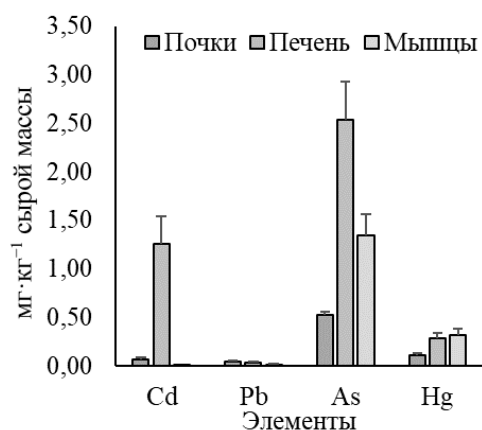


Рис. 6. Максимальные средние концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в органах рыб рода *Myoxocephalus*, Берингово море, 2004 г. (Burger et al., 2007)

Fig. 6. Maximum mean concentrations of heavy metals and arsenic in organs of *Myoxocephalus* fish, the Bering Sea, 2004 (Burger et al., 2007)

В мышцах в большей степени накапливается ртуть. В почках аккумулируется свинец. В целом у представителей *Muchocephalus*, как и у камбаловых, повышенные концентрации элементов могут быть следствием действий военных на острове Адак (Burger et al., 2007).

Токсичные элементы в промысловых видах рыб Японского моря

Японское море — полузамкнутое море Тихого океана. Его площадь составляет 1062 тыс. км², объём воды — 1715 тыс. км³, средняя глубина — 1750 м, наибольшая — 3720 м. От Охотского моря отделено островом Сахалин, от Жёлтого — Корейским полуостровом. Омывает берега России, Японии, Республики Корея и КНДР (Шунтов, 2001).

Из-за слабой связи с Тихим океаном малочисленными мелководными проливами Японское море находится под существенным воздействием антропогенных, техногенных и терригенных факторов — хозяйственно-бытовых и промышленных стоков, поверхностных смывов с прибрежных территорий, а также последствий сжигания флотского мазута из-за активного судоходства (Христофорова, 1989).

Тихоокеанские лососи (*Oncorhynchus*). В 2013–2015 гг. для исследований была выловлена горбуша *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) (Ковековдова и др., 2013, 2016). Её микроэлементный состав соответствовал нормам, заметных превышений ПДУ не обнаружено (рис. 7). Это может быть связано со слишком коротким жизненным циклом горбуши — около полутора лет (Христофорова и др., 2019а).

В большей мере микроэлементы, особенно кадмий и мышьяк, накапливаются в печени, что связано с обменно-депонирующей функцией этого органа.

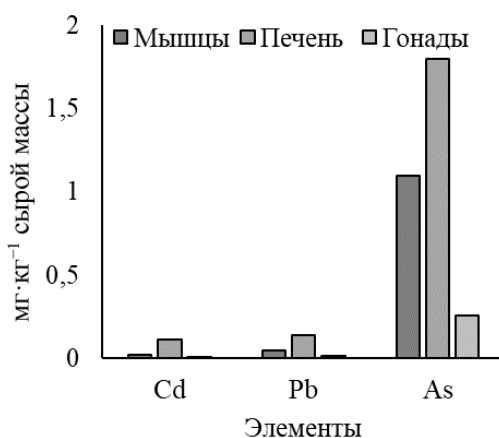


Рис. 7. Максимальные концентрации микроэлементов в органах и тканях горбуши *Oncorhynchus gorbuscha*, Японское море, 2013–2015 гг. (Ковековдова и др., 2013, 2016)

Fig. 7. Maximum concentrations of trace elements in organs and tissues of the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha*, the Sea of Japan, 2013–2015 (Kovekovdova et al., 2013, 2016)

Терпуговые (Hexagrammidae Gill, 1889). Представители этого семейства ведут преимущественно придонный и прибрежный образ жизни. Являются объектами любительской ловли и промысла. Питаются в основном бентосом и планктоном (Антоненко и Пущина, 2002).

Для микроэлементного анализа в 2004–2013 гг. вылавливали особей терпуга (Ковековдова и Симоконов, 2004 ; Ковековдова и др., 2013). Превышение ПДУ кадмия (0,7 мг·кг⁻¹ сырой массы) отмечено лишь в печени: значение составило 0,79 мг·кг⁻¹ сырой массы. Активное накопление мышьяка зафиксировано в мышцах (рис. 8). Кадмий, свинец и ртуть в большей мере аккумулируются в печени.

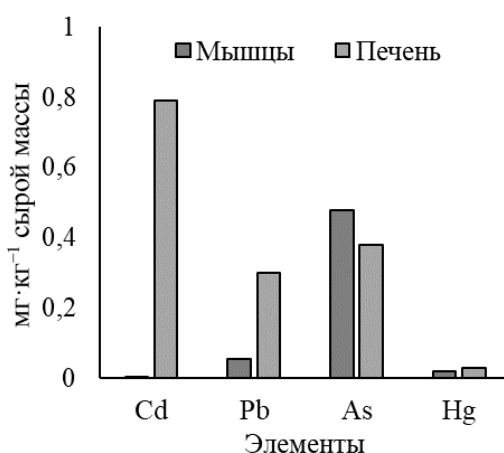


Рис. 8. Максимальные концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в органах и тканях рыб семейства Hexagrammidae, Японское море, 2004–2013 гг. (Ковековдова и Симоконов, 2004 ; Ковековдова и др., 2013)

Fig. 8. Maximum concentrations of heavy metals and arsenic in organs and tissues of Hexagrammidae fish, the Sea of Japan, 2004–2013 (Kovekovdova & Simokon, 2004 ; Kovekovdova et al., 2013)

Сельдевые (Clupeidae G. Cuvier, 1817). Широко распространены от Субантарктики до Арктики. Ярким представителем семейства является тихоокеанская сельдь *Clupea pallasii* Valenciennes, 1847, имеющая три экологические формы — морскую, прибрежную и лагунно-озёрную. Вдоль Азиатского материка сельдь распространена непрерывно от Жёлтого моря до Берингова пролива (в том числе в Японском, Охотском и Беринговом морях). Питается в основном зоопланктоном. Жизненный цикл — до 19 лет (Науменко, 2007).

Значения содержания микроэлементов в сельди, выловленной с 2004 по 2013 г., в целом соответствовали ПДУ (Ковековдова и Симоконов, 2004 ; Ковековдова и др., 2013). Стоит выделить достаточно высокие концентрации кадмия в печени рыб ($0,96 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$), превосходившие ПДУ ($0,7 \text{ мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы) (рис. 9).

Отметим, что все исследованные микроэлементы локализовались именно в мышцах (см. рис. 9). Такое распределение можно объяснить нагулом рыбы вблизи терригенного и антропогенного стока.

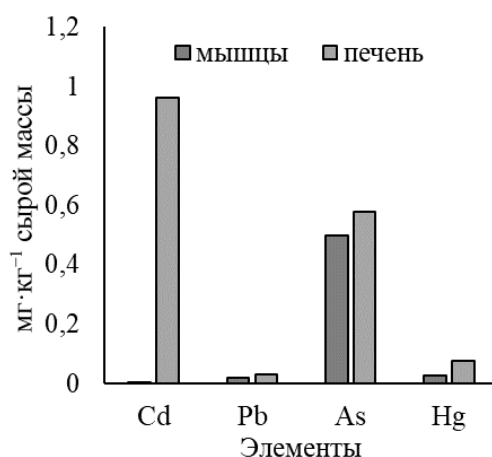


Рис. 9. Максимальные концентрации микроэлементов в органах и тканях тихоокеанской сельди *Clupea pallasii*, Японское море, 2004–2013 (Ковековдова и Симоконов, 2004 ; Ковековдова и др., 2013)

Fig. 9. Maximum concentrations of trace elements in organs and tissues of the Pacific herring *Clupea pallasii*, the Sea of Japan, 2004–2013 (Kovekovdova & Simokon, 2004 ; Kovekovdova et al., 2013)

Тресковые (Gadidae). В 2013–2014 гг. исследованы представители семейства тресковых — минтай *Gadus chalcogrammus* Pallas, 1814 и навага тихоокеанская *Eleginus gracilis* (Tilesius, 1810) (Ковековдова и др., 2013 ; Hwang et al., 2019).

Тресковые характеризуются широким видовым разнообразием. Обитают преимущественно в пелагиали, некоторые представители придерживаются придонного образа жизни. По типу питания Gadidae в основном являются хищниками (Напазаков и др., 2001).

Как видно на рис. 10, концентрации элементов в печени заметно выше таковых в других органах. ПДУ мышьяка были превышены почти в 4 раза. В гонадах наиболее активно накапливалась ртуть. В мышцах аккумулировались кадмий (значение превышало ПДУ почти в 45 раз) и свинец (см. рис. 10). Столь активное поступление микроэлементов и их последующая аккумуляция в органах рыб могут происходить за счёт поверхностного смыва, речного стока, взмучивания и биотурбации донных отложений (Христофорова, 1989).

Такие значения могут быть связаны и с бурно развивающейся промышленностью Республики Корея, в территориальных водах которой были отобраны представители семейства тресковых (Hwang et al., 2019). Эта страна достаточно богата месторождениями, которые расположены на её береговой линии. В основном в Республике Корея ведут добычу угля, железа, молибдена, свинцово-цинковых руд (Hwang et al., 2019). Вероятнее всего, соответствующие производства являются причиной попадания загрязнённых вод в акваторию Японского моря.

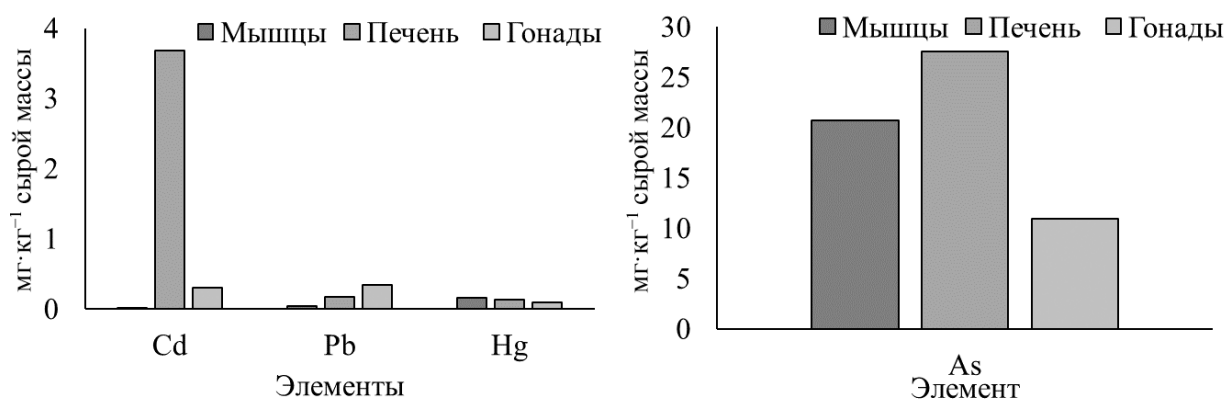


Рис. 10. Максимальные концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в органах и тканях рыб семейства Gadidae, Японское море, 2013–2014 гг. (Hwang et al., 2019)

Fig. 10. Maximum concentrations of heavy metals and arsenic in organs and tissues of Gadidae fish, the Sea of Japan, 2013–2014 (Hwang et al., 2019)

Камбаловые (Pleuronectidae). Представители этого семейства в Японском море были исследованы в 2004–2020 гг. (Ковековдова и Симоконь, 2004 ; Стеблевская и др., 2013, 2016 ; Чусовитина и др., 2020).

Проведённый анализ данных не выявил превышения ПДУ в органах камбаловых. Кадмий и ртуть наиболее активно накапливались в печени. Мышьяк аккумулировался в мышцах, а свинец — в жабрах (рис. 11).

Отмеченные концентрации микроэлементов могут быть свидетельством накопления их в грунтах. Так, исследования Л. Т. Ковековдовой с соавторами (2002, 2010) выявили увеличение содержания мышьяка в органах и тканях моллюсков и рыб Амурского залива в связи с его высокой концентрацией в грунте.

Обобщённые данные по превышению ПДУ токсичных микроэлементов в рыбах дальневосточных морей представлены на рис. 12.

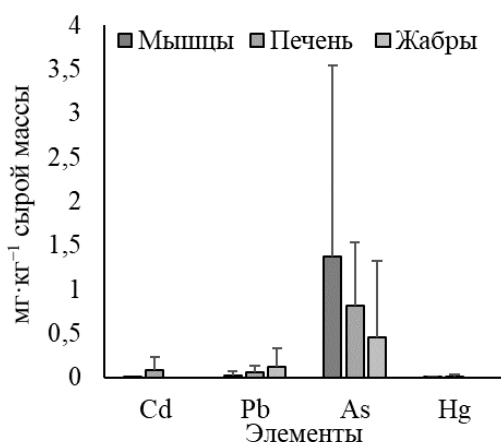


Рис. 11. Максимальные средние концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в органах рыб семейства Pleuronectidae, Японское море, 2004–2020 гг. (Ковековдова и Симоконь, 2004 ; Стеблевская и др., 2013, 2016 ; Чусовитина и др., 2020)

Fig. 11. Maximum mean concentrations of heavy metals and arsenic in organs of Pleuronectidae fish, the Sea of Japan, 2004–2020 (Kovekovdova & Simokon, 2004 ; Steblevskaya et al., 2013, 2016 ; Chusovitina et al., 2020)

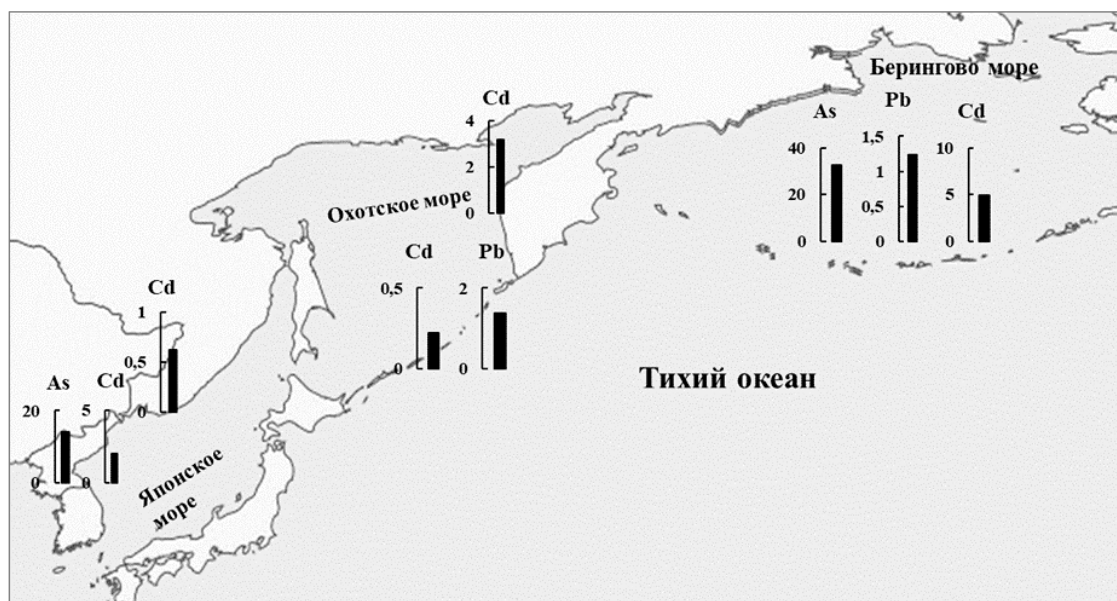


Рис. 12. Превышение ПДУ (см. примечание к рис. 1) токсичных элементов в рыбах дальневосточных морей: 1 — максимальные концентрации; 2 — максимальные средние концентрации; 3 — средние концентрации; 4 — мышцы; 5 — гонады; 6 — печень; 7 — почки (Ковековдова и Симоконь, 2004 ; Ковековдова и др., 2013 ; Burger et al., 2007 ; Hwang et al., 2019 ; Khristoforova et al., 2016)

Fig. 12. Excess of the maximum permissible level (see note to Fig. 1) of toxic elements in fish of the Far Eastern seas: 1, maximum concentration; 2, maximum mean concentration; 3, mean concentration; 4, muscles; 5, gonads; 6, liver; 7, kidneys (Kovekovdova & Simokon, 2004 ; Kovekovdova et al., 2013 ; Burger et al., 2007 ; Hwang et al., 2019 ; Khristoforova et al., 2016)

Заключение. Практически во всех исследованных рыбах были обнаружены превышения концентраций таких крайне токсичных элементов, как кадмий, свинец и мышьяк.

Максимальные концентрации кадмия зафиксированы в органах рыб из акватории Японского моря: содержание кадмия в мышцах тресковых превышало ПДУ в 45 раз. Вероятнее всего, это связано с тем, что мышцы занимают наибольший процент от массы тела. Кроме того, мышцы

являются депонирующим органом, а следовательно, способны накапливать значительные концентрации микроэлементов. Содержание свинца в печени камбаловых из акватории Охотского моря превышало ПДУ в 1,2 раза. Камбалы являются бентофагами и в процессе питания могут накапливать адсорбированный свинец из донных отложений. Высокие концентрации мышьяка обнаружены в почках камбаловых, выловленных в водах Берингова моря (превышение ПДУ в 6,5 раза), и в печени тресковых из Японского моря (превышение ПДУ в 5,5 раза). В дальневосточных морях есть районы с аномальными гидрохимическими и геохимическими условиями, которые могут оказывать влияние на микроэлементный состав гидробионтов. Пищевая безопасность во многом зависит от частоты употребления того или иного продукта. Это особенно верно для микроэлементов: они способны к биомагнификации, а значит, могут накапливаться в течение всей жизни.

Таким образом, употребление продуктов из рыбы, выловленной в водах дальневосточных морей, может быть небезопасным для здоровья человека. Необходимо на регулярной основе осуществлять мониторинг качества морепродуктов. В связи с этим исследования микроэлементного состава рыбы остаются крайне актуальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеева М. В., Тюнев А. В. Содержание и особенности распределения токсичных элементов в тканях и органах рыб Балтийского моря // *Ветеринария сегодня*. 2017. № 3. С. 62–64. [Alexeyeva M. V., Tyunev A. V. Content and characteristics of toxic element dissemination in tissues and organs of the Baltic Sea fish. *Veterinary Science Today*, 2017, no. 3, pp. 62–64. (in Russ.)]
2. Антоненко Д. В., Пущина О. И. Основные черты биологии терпуговых рыб рода *Hexagrammos* в зал. Петра Великого (Японское море) // *Известия ТИНРО*. 2002. Т. 131. С. 164–178. [Antonenko D. V., Pushchina O. I. The main biological features of greenlings (genus *Hexagrammos*) in Peter the Great Bay (Japan Sea). *Izvestiya TINRO*, 2002, vol. 131, pp. 164–178. (in Russ.)]
3. Балыкин П. А. *Состояние и ресурсы рыболовства в западной части Берингова моря*. Москва : Изд-во ВНИРО, 2006. 142 с. [Balykin P. A. *The State and the Resources of Fishing in the Western Bering Sea*. Moscow : VNIRO Publishing, 2006, 142 p. (in Russ.)]
4. Башкин В. Н., Касимов Н. С. *Биогеохимия*. Москва : Научный мир, 2004. 648 с. [Bashkin V. N., Kasimov N. S. *Biogeokhimiya*. Moscow : Nauchnyi mir, 2004, 648 p. (in Russ.)]
5. Вилер А. *Определитель рыб морских и пресных вод Северо-Европейского бассейна* : пер. с англ. Москва : Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. 432 с. [Wheeler A. *Key to the Fishes of Northern Europe : A Guide to the Identification of More Than 350 Species*. Moscow : Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1983, 432 p. (in Russ.)]
6. Глазунова И. А. Содержание и особенности распределения тяжёлых металлов в органах и тканях рыб Верхней Оби // *Известия Алтайского государственного университета*. 2007. № 3. С. 20–22. [Glazunova I. A. Soderzhanie i osobennosti raspredeleniya tyazhelykh metallov v organakh i tkanyakh ryb Verkhnei Obi. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2007, no. 3, pp. 20–22. (in Russ.)]
7. Грициняк І. І., Янович Д. О., Бех В. В. Вплив неесенціальних елементів (ртуть, миш'як) на організм лососевих (Salmonidae) риб (огляд) // *Рибогосподарська наука України*. 2015. № 3. С. 18–33. [Hrytsyniak I. I., Yanovych D. O., Bekh V. V. Effect of non-essential elements (mercury, arsenic) on salmonids (Salmonidae) (review). *Rybohospodarska nauka Ukrainy*, 2015, no. 3, pp. 18–33. (in Ukr.). <https://doi.org/10.15407/fsu2015.03.018>
8. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. *Моря СССР*. Москва : Изд-во МГУ, 1982. 19 с. [Dobrovolsky A. D., Zalogin B. S. *Morya SSSR*. Moscow : Izd-vo MGU, 1982, 192 p. (in Russ.)]
9. Донец М. М., Цыганков В. Ю. Современные уровни загрязняющих веществ в промысловых объектах дальневосточных морей России // *Вестник Дальневосточного отделения*

- Российской академии наук*. 2019. № 4. С. 90–103. [Donets M. M., Tsygankov V. Yu. Current levels of pollutants in commercial hydrobionts of the Russian Far Eastern seas. *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, 2019, no. 4, pp. 90–103. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.206.4.010>
10. Зеленихина Г. С., Ельников А. Н., Точилина Т. Г. Покатная миграция сеголетков горбуши и кеты в р. Рейдовой о. Итуруп (южные Курильские острова) в весенне-летний период 2014 г. // *Труды ВНИРО*. 2015. Т. 158. С. 6–15. [Zelenikhina G. S., Elnikov A. N., Tochilina T. G. The downstream migration of juvenile pink and chum salmon in Reydovaya River Iturup Island (South Kuril Islands) in spring–summer season of 2014. *Trudy VNIRO*, 2015, vol. 158, pp. 6–15. (in Russ.)]
 11. Исаков А. Я., Касперович Е. В. О загрязнении нефтепродуктами Охотского моря // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2007. № 26. С. 1–6. [Isakov A. Ya., Kasperovich E. V. O zagryaznenii nefteproduktami Okhotskogo morya. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 2007, no. 26, pp. 1–6. (in Russ.)]
 12. Ковековдова Л. Т., Кикү Д. П., Касьяненко И. С. Мониторинг водной среды и безопасности промысловых объектов в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне (токсичные элементы) // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы* : в 3 томах : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, приуроч. к 145-летию Севастопольской биологической станции, Севастополь, 19–24 сентября 2016 г. Севастополь, 2016. Т. 3. С. 111–114. [Kovekovdova L. T., Kiku D. P., Kasyanenko I. S. Monitoring of water environment and food safety of commercial objects in the Far East fishery basin (toxic elements). In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy* : v 3 tomakh : sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, priuroch. k 145-letiyu Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii, Sevastopol, 19–24 Sept., 2016. Sevastopol, 2016, vol. 3, pp. 111–114. (in Russ.)]
 13. Ковековдова Л. Т., Симоконов М. В., Кикү Д. П. Микроэлементный состав промысловых рыб дальневосточных морей // *Проблемы региональной экологии*. 2013. № 2. С. 72–75. [Kovekovdova L. T., Simokon M. V., Kiku D. P. Microelemental composition of Far Eastern commercial fishes. *Regional Environmental Issues*, 2013, no. 2, pp. 72–75. (in Russ.)]
 14. Ковековдова Л. Т., Иваненко Н. В., Симоконов М. В. Особенности распределения As в компонентах морских прибрежных экосистем Приморья // *Исследовано в России*. 2002. Т. 5. С. 1437–1445. [Kovekovdova L. T., Ivanenko N. V., Simokon M. V. Osobennosti raspredeleniya As v komponentakh morskikh pribrezhnykh ekosistem Primor'ya. *Issledovano v Rossii*, 2002, vol. 5, pp. 1437–1445. (in Russ.)]
 15. Ковековдова Л. Т., Симоконов М. В. Оценка содержания металлов и мышьяка в донных отложениях и рыбах из рек бассейна залива Петра Великого (Японское море) // *Известия ТИНРО*. 2010. Т. 160. С. 223–235. [Kovekovdova L. T., Simokon M. V. Assessment of metals and arsenic content in bottom sediments and fish tissues from the rivers and estuaries of Peter the Great Bay (Japan Sea). *Izvestiya TINRO*, 2010, vol. 160, pp. 223–235. (in Russ.)]
 16. Ковековдова Л. Т., Симоконов М. В. Тенденции изменения химико-экологической ситуации в прибрежных акваториях Приморья. Токсичные элементы в донных отложениях и гидробионтах // *Известия ТИНРО*. 2004. Т. 137. С. 310–320. [Kovekovdova L. T., Simokon M. V. Tendencies in change of chemoeological situation in the coastal area of Primorye. Toxic elements in bottom sediments and aquatic organisms. *Izvestiya TINRO*, 2004, vol. 137, pp. 310–320. (in Russ.)]
 17. Лебедев Л. Е., Полякова Н. В. Содержание тяжёлых металлов в тканях и органах тёмной камбалы *Pseudopleuronectes obscurus* (Herzenstein, 1890) (Pleuronectidae) залива Петра Великого Японского моря // *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2019. Т. 49, № 3. С. 70–77. [Lebedev L. E., Polyakova N. V. Heavy metals content of tissues and members of black plaice *Pseudopleuronectes obscurus* (Herzenstein, 1890) (Pleuronectidae) of Peter the Great Bay, Sea of Japan. *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*, 2019, vol. 49, no. 3, pp. 70–77. (in Russ.)]

18. Макаров В. Н. Мышьак в биосфере Якутии // *Наука и техника в Якутии*. 2012. № 1 (22). С. 41–46. [Makarov V. N. Mysh'yak v biosfere Yakutii. *Nauka i tekhnika v Yakutii*, 2012, no. 1 (22), pp. 41–46. (in Russ.)]
19. Матвеев А. А., Терентьев Д. А. Промысел, многолетняя динамика биомассы, распределение и размерный состав массовых видов рогатковых Cottidae у западного побережья Камчатки // *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*. 2016. Вып. 41. С. 17–42. [Matveev A. A., Terentiev D. A. Fishery, long-term dynamics of biomass, distribution and length composition of mass species of Cottidae on the west coast of Kamchatka. *Researches of Aquatic Biological Resources of Kamchatka and of the Northwest Part of Pacific Ocean*, 2016, iss. 41, pp. 17–42. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2016.41.17-42>
20. Напазаков В. В., Чучукало В. И., Кузнецова Н. А., Радченко В. И., Слабинский А. М., Надточий В. А. Питание и некоторые черты экологии тресковых рыб западной части Берингова моря в летне-осенний период // *Известия ТИНРО*. 2001. Т. 128-3. С. 907–928. [Napazakov V. V., Chuchukalo V. I., Kuznetsova N. A., Radchenko V. I., Slabinsky A. M., Nadtochy V. A. Feeding and some features of ecology of Gadidae fish in the western part of Bering Sea in the summer–autumn season. *Izvestiya TINRO*, 2001, vol. 128-3, pp. 907–928. (in Russ.)]
21. Науменко Н. И. Дальневосточная сельдь: взгляд в XXI век (обзор литературы, краткая история исследований и промысла) // *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*. 2007. Вып. 9. С. 185–190. [Naumenko N. I. Far Eastern herring by eyes turned to XXI century (literature review, short excursion to the history of fishing and researches). *Researches of Aquatic Biological Resources of Kamchatka and of the Northwest Part of Pacific Ocean*, 2007, iss. 9, pp. 185–190. (in Russ.)]
22. Орлов А. М., Афанасьев П. К. Отолиометрия как инструмент анализа популяционной структуры тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus* (Gadidae, Teleostei) // *Амурский зоологический журнал*. 2013. Т. 5, № 3. С. 327–331. [Orlov A. M., Afanasiev P. K. Otolithometry as possible tool of the analysis of Pacific cod *Gadus macrocephalus* (Gadidae, Teleostei) population structure. *Amurian Zoological Journal*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 327–331. (in Russ.)]
23. Павлова С. А., Павлов И. Е., Шукшина Т. Г. Дальневосточный бассейн – политически важный регион промысла // *Инновационная наука*. 2020. № 6. С. 179–182. [Pavlova S. A., Pavlov I. E., Shukshina T. G. East Basin – politically important fishing area. *Innovation Science*, 2020, no. 6, pp. 179–182. (in Russ.)]
24. Петухов С. А., Морозов Н. П. К вопросу о «видовых» различиях микроэлементного состава рыб // *Вопросы ихтиологии*. 1983. Т. 23, № 5. С. 870–872. [Petukhov S. A., Morozov N. P. A contribution to the study of “species” differences in the trace element composition of fishes. *Voprosy ikhtiologii*, 1983, vol. 23, no. 5, pp. 870–872. (in Russ.)]
25. Поддубный А. В. *Экологические проблемы и устойчивое развитие регионов* : учебное пособие. Владивосток : ТИДОТ ДВГУ, 2002. 143 с. [Poddubny A. V. *Ekologicheskie problemy i ustoychivoe razvitie regionov* : uchebnoe posobie. Vladivostok : TIDOT DVGU, 2002, 143 p. (in Russ.)]
26. СанПиН 2.3.2.1078-01. *Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов*. Москва : Госкомсанэпиднадзор РФ, 2002. 156 с. [SanPiN 2.3.2.1078-01. *Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoi tsennosti pishchevykh produktov*. Moscow : Goskomsanepidnadzor RF, 2002, 156 p. (in Russ.)]
27. Солодухина М. А. Мышьак в растениях природных и антропогенных ландшафтов Шерловогорского рудного района Забайкальского края // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014. № 11-3. С. 377–382. [Soloduhina M. A. Arsenic in plants of natural and anthropogenic landscapes of Sherlovogorsky ore district of the Zabaikalsky Krai. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2014, no. 11-3, pp. 377–382. (in Russ.)]
28. Стеблевская Н. И., Полякова Н. В., Жадко Е. А., Чусовитина С. В. Микроэлементный состав тканей некоторых видов гидробионтов залива Петра Великого (бухта Северная) // *Вестник Дальневосточного отделения*

- Российской академии наук*. 2013. № 5 (171). С. 127–132. [Steblevskaya N. I., Polyakova N. V., Zhad'ko E. A., Chusovitina S. V. Microelement composition of tissues of some species of aquatic organisms of Peter the Great Bay (Northern Bay). *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2013, no. 5 (171), pp. 127–132. (in Russ.)]
29. Стеблевская Н. И., Чусовитина С. В., Полякова Н. В., Жадько Е. А. Изучение элементного состава тканей и органов некоторых видов промысловых рыб бухты Северная залива Петра Великого (Японское море) // *Вопросы рыболовства*. 2016. Т. 17, № 1. С. 96–102. [Steblevskaya N. I., Tchusovitina S. V., Polyakova N. V., Zhad'ko E. A. The study of microelement composition of tissues and organs of some commercial fish from the gulf of Peter the Great (Sea of Japan). *Problems of Fisheries*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 96–102. (in Russ.)]
30. ТР ТС 021/2011. *Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции*. Москва : Госстандарт России, 2011. 242 с. [TR TS 021/2011. *Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza o bezopasnosti pishchevoi produktsii*. Moscow : Gosstandart Rossii, 2011, 242 p. (in Russ.)]
31. Христофорова Н. К. *Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжёлыми металлами*. Ленинград : Наука, 1989. 192 с. [Khristoforova N. K. *Bioindikatsiya i monitoring zagryazneniya morskikh vod tyazhelymi metallami*. Leningrad : Nauka, 1989, 192 p. (in Russ.)]
32. Христофорова Н. К., Кобзарь А. Д. Бурые водоросли-макрофиты как аккумулирующие организмы-индикаторы загрязнения морских вод тяжёлыми металлами // *Загрязнение морской среды: экологический мониторинг, биоиндикация, нормирование* : сборник статей Всероссийской научной конференции с международным участием, посвящённой 125-летию профессора В. А. Водяницкого, Севастополь, 28 мая – 1 июня, 2018 г. Севастополь : Колорит, 2018. С. 279–285. [Khristoforova N. K., Kobzar A. D. Brown algae as accumulating indicators of sea water pollution by heavy metals. In: *Pollution of Marine Environment: Ecological Monitoring, Bioassay, Standardization* : collection of the papers of the Russian scientific conference with international participation devoted to 125th anniversary of prof. V. A. Vodyanitsky, Sevastopol, May 28 – June 1, 2018. Sevastopol : Kolorit, 2018, pp. 279–285. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/978-5-60-400-20-8-7>
33. Христофорова Н. К., Кобзарь А. Д. Оценка экологического состояния залива Посыета (Японское море) по содержанию тяжёлых металлов в бурых водорослях-макрофитах // *Самарский научный вестник*. 2017. Т. 6, № 2 (19). С. 91–95. [Khristoforova N. K., Kobzar A. D. Assessment of ecological state of the Posyet Bay (the Sea of Japan) by heavy metals content in brown algae. *Samara Journal of Science*, 2017, vol. 6, no. 2 (19), pp. 91–95. (in Russ.)]
34. Христофорова Н. К., Литвиненко А. В., Цыганков В. Ю., Ковальчук М. В. Некоторые особенности микроэлементного состава горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792) и сима (*Oncorhynchus masou* Brevoort, 1856) из Сахалино-Курильского региона // *Балтийский морской форум* : материалы VII Междунар. Балтийского мор. форума. В 6 томах. Т. 3. Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоёмов : материалы VII Междунар. науч. конф. Калининград : Изд-во БГАРФ, 2019а. С. 173–178. [Khristoforova N. K., Litvinenko A. V., Tsygankov V. Yu., Kovalchuk M. V. Some of the features of the microelement composition of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 and masu *Oncorhynchus masou* Brevoort, 1856 from the Sakhalin–Kuril region. In: *Baltiiskii morskoi forum* : materialy VII Mezhdunar. Baltiiskogo mor. foruma. In 6 vols. Vol. 3. Vodnye bioresursy, akvakul'tura i ekologiya vodoemov : materialy VII Mezhdunar. nauch. konf. Kaliningrad : Izd-vo BGARF, 2019a, pp. 173–178. (in Russ.)]
35. Чемагин А. А., Волосников Г. И., Кыров Д. Н., Либерман Е. Л. Тяжёлые металлы Hg, Cd, Pb в организме стерляди (*Acipenser ruthenus* L.), Нижний Иртыш // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2019. Т. 22, № 2. С. 225–233. [Chemagin A. A., Volosnikov G. I., Kyrov D. N., Liberman E. L. Heavy metals Hg, Cd, and Pb in the body of sterlet (*Acipenser ruthenus* L.), the Lower Irtysh River. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 225–233. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-2-225-233>

36. Чусовитина С. В., Стеблевская Н. И., Полякова Н. В., Жадько Е. А. Распределение микроэлементов в органах и тканях трёх видов камбал залива Петра Великого (Японское море) // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2020. № 6 (214). С. 70–77. [Chusovitina S. V., Steblevskaya N. I., Polyakova N. V., Zhad'ko E. A. Distribution of trace elements in organs and tissues of three species of flounder from the Peter the Great Gulf (the Sea of Japan). *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2020, no. 6 (214), pp. 70–77. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.37102/08697698.2020.214.6.008>
37. Шлямин Б. А. *Берингово море*. Москва : Географгиз, 1958. 96 с. [Shlyamin B. A. *Beringovo more*. Moscow : Geografiz, 1958, 96 p. (in Russ.)]
38. Шунтов В. П. *Биология дальневосточных морей России*. Владивосток : ТИНРО-центр, 2001. Т. 1. 580 с. [Shuntov V. P. *Biologiya dal'nevostochnykh morei Rossii*. Vladivostok : TINRO-tsentr, 2001, vol. 1, 580 p. (in Russ.)]
39. Astakhov A. S., Ivanov M. V., Li B. Ya. Hydrochemical and atmochemical mercury dispersion zones over hydrothermal vents of the submarine Piip Volcano in the Bering Sea. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 5, pp. 826–835. <https://doi.org/10.1134/S0001437011050031>
40. Burger J., Gochfeld M., Shukla T., Jeitner Ch., Burke S., Donio M., Shukla Sh., Snigaroff R., Snigaroff D., Stamm T., Volz C. Heavy metals in Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) from the Aleutians: Location, age, size, and risk. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2007, vol. 70, iss. 22, pp. 1897–1911. <https://doi.org/10.1080/15287390701551159>
41. Datsky A. V., Maznikova O. A. Biological features of common fish species in Olyutorsky–Navarin region and the adjacent areas of the Bering Sea: 3. Righteye flounders (Pleuronectidae). *Journal of Ichthyology*, 2017, vol. 57, no. 2, pp. 228–256. <https://doi.org/10.1134/S0032945217020060>
42. Dökmeci A. H., Yildiz T., Ongen A., Sivri N. Heavy metal concentration in deepwater rose shrimp species (*Parapenaeus longirostris* Lucas, 1846) collected from the Marmara Sea Coast in Tekirdağ. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, iss. 4, pp. 2449–2454. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-013-3551-2>
43. Duffus J. H. “Heavy metals” a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 2002, vol. 74, no. 5, pp. 793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
44. Hassan Z., Aarts M. G. Opportunities and feasibility for biotechnological improvement of Zn, Cd or Ni tolerance and accumulation in plants. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, vol. 72, iss. 1, pp. 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.04.003>
45. Hwang D. W., Shim K., Lee C. I. Concentrations and risk assessment of heavy metals in tissues of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) captured from the northeastern coast of Korea. *Journal of Food Protection*, 2019, vol. 82, iss. 5, pp. 903–909. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-18-379>
46. Khristoforova N. K., Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D., Lukyanova O. N. Concentrations of trace elements in Pacific and Atlantic salmon. *Oceanology*, 2015a, vol. 55, iss. 5, pp. 679–685. <https://doi.org/10.1134/S0001437015050057>
47. Khristoforova N. K., Litvinenko A. V., Tsygankov V. Yu., Kovalchuk M. V., Erofeeva N. I. The trace-element content in the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) from the Sakhalin–Kuril region. *Russian Journal of Marine Biology*, 2019b, vol. 45, iss. 3, pp. 221–227. <https://doi.org/10.1134/S1063074019030064>
48. Khristoforova N. K., Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D., Lukyanova O. N. Heavy metal contents in the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 from Kuril oceanic waters during anadromous migration. *Russian Journal of Marine Biology*, 2015b, vol. 41, iss. 6, pp. 479–484. <https://doi.org/10.1134/S1063074015060085>
49. Khristoforova N. K., Tsygankov V. Yu., Lukyanova O. N., Boyarova M. D. The Kuril Islands as a potential region for aquaculture: Trace elements in chum salmon. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 213, pp. 727–731. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.027>
50. Langston W. J. Toxic effects of metals and the incidence of metal pollution in marine ecosystems. In: *Heavy Metals in the Marine Environment* / R. W. Furness, Ph. S. Rainbow (Eds). Boca Raton : CRC Press, 1990, chap. 7, pp. 101–122. <https://doi.org/10.1201/9781351073158>

51. Li Ch., Zhou K., Qin W., Tian Ch., Qi M., Yan X., Han W. A review on heavy metals contamination in soil: Effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2019, vol. 28, iss. 4, pp. 380–394. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1592108>
52. *Public Health Assessment / Federal Facilities Assessment Branch ; Division of Health Assessment and Consultation ; Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Adak, Alaska : Naval Air Facility, 2002. URL: https://www.atsdr.cdc.gov/hac/pha/adak/ada_toc.html [accessed: 01.04.2021].*

HEAVY METALS AND ARSENIC IN COMMERCIAL FISH OF THE SEA OF JAPAN, SEA OF OKHOTSK, AND BERING SEA: CURRENT STATUS (LITERATURE REVIEW)

M. K. Gamov¹, A. E. Ivanova², E. K. Mironova¹, and V. Yu. Tsygankov¹

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

²Pacific branch of “VNIRO” (“TINRO”), Vladivostok, Russian Federation

E-mail: gamovmota123456@gmail.com

The paper summarizes literature data on the concentrations of toxic elements – As, Pb, Cd, and Hg – in commercial fish of the Far Eastern seas – the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and Bering Sea. According to the analysis carried out, main commercial facilities and fishery basins meet the sanitary and hygienic standards. However, the existence of impact natural areas in fish ranges and on the routes of their migration contributes to an increase in concentrations of toxic elements in fishery objects. In some cases, the values exceed the maximum permissible levels. In this regard, it is necessary to continue monitoring of toxic microelements in commercial facilities and fishery basins of the Far Eastern seas.

Keywords: heavy metals, toxic elements, Far Eastern seas