

М.М. ДОНЕЦ, В.Ю. ЦЫГАНКОВ

Современные уровни загрязняющих веществ в промысловых объектах дальневосточных морей России

*Посвящается памяти
Ольги Николаевны Лукьяновой (1957–2019) –
доктора биологических наук,
ведущего научного сотрудника ТИНРО-Центра,
профессора кафедры экологии
Дальневосточного федерального университета,
научного руководителя*

В окружающей нас среде находятся опасные для здоровья человека поллютанты – тяжелые металлы, органические загрязняющие вещества и радионуклиды, которые подлежат обязательному контролю. В связи с этим одной из самых острых является проблема безопасности продуктов питания, в частности морского происхождения. В обзоре представлены современные данные, касающиеся наличия тяжелых металлов и стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ) в промысловых видах растений и животных дальневосточных морей России – Японского, Охотского и Берингова, основных морских промысловых зон страны. Последние исследования показывают, что добываемые здесь гидробионты удовлетворяют санитарно-гигиеническим нормативам Таможенного союза, однако следует учесть, что работ по мониторингу СОЗ в них крайне мало. Перечень объектов исследований практически исчерпывается тихоокеанскими лососями и камбалами, что является неудовлетворительным, учитывая вклад Дальнего Востока в рыбохозяйственный комплекс России. Необходимы расширение мониторинговых исследований СОЗ в промысловых организмах дальневосточных морей и оценка экологических рисков для жителей прибрежных районов.

Ключевые слова: тяжелые металлы, хлорорганические соединения, пищевая безопасность, гидробионты, морское сырье, дальневосточные моря.

Current levels of pollutants in commercial hydrobionts of the Russian Far Eastern seas. M.M. DONETS, V.Yu. TSYGANKOV (Far Eastern Federal University, Vladivostok).

There are pollutants, harmful to the man's health, found in the environment – heavy metals, organic pollutants and radionuclides, which are subject to obligatory control. Safety of food, especially seafood, is one of the most important problems in the modern world. The review presents current data from studies of heavy metals and persistent organic pollutants (POPs) in commercial species of the Russian Far Eastern seas - the Sea of Japan, the Sea of Okhotsk and the Bering Sea are the main marine fishing zones of the Russian Federation. Recent studies show that commercial hydrobionts of the Far Eastern coast of Russia satisfy the sanitary and hygienic standards of the Customs Union. However, the work aimed at monitoring POPs is extremely small. The most studied commercial organisms of the Far East are Pacific salmon and flounder. That is extremely small, considering the contribution of the Far East to the fishery

*ДОНЕЦ Максим Михайлович – лаборант-исследователь, ЦЫГАНКОВ Василий Юрьевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, доцент (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток).

*E-mail: maksim.donecz@mail.ru

complex of Russia. It is necessary to expand monitoring studies of POPs in the commercial organisms of the Far Eastern seas and conduct the assessment of environmental risks for residents of coastal areas of this region.

Key words: heavy metals, organochlorine compounds, food safety, hydrobionts, marine raw materials, the Far Eastern seas.

Введение

Полноценное питание определяет качество и продолжительность жизни человека, его умственное и физическое развитие, работоспособность и др. Многие современные пищевые технологии направлены на разработку продуктов питания на основе морского сырья [43, 44, 49]. Поэтому, учитывая наличие большого количества загрязняющих веществ в различных экосистемах мира, в том числе и в Мировом океане [38, 39, 47], сегодня особенно актуальна проблема пищевой безопасности гидробионтов.

Из-за антропогенных и природных процессов в Мировой океан попадают различные виды загрязнений, часть из которых аккумулируется в промысловых морских организмах. Это влечет за собой ухудшение здоровья населения, снижение качества жизни и рост смертности. Наиболее известным примером является интоксикация людей ртутью при употреблении рыбы из бухты Минамата (Япония) [37, 45]. Этот инцидент показывает важность регулярного мониторинга токсичных элементов в основных промысловых зонах аквакультуры и контроля качества рыбной продукции.

В России с целью контроля загрязненности морских промысловых зон проводится ежегодный экологический мониторинг гидробионтов. При этом основное количество публикаций посвящено определению в морских организмах концентраций микроэлементов [3, 9, 10, 18, 19, 24, 27]. Только с недавнего времени начались крупные исследования содержания хлорорганических соединений в промысловых объектах Дальнего Востока России [15, 28, 29, 40, 42, 48].

Целью обзора являются анализ литературных данных по содержанию нормируемых элементов и органических загрязняющих веществ в гидробионтах дальневосточных морей России (с 2010 по 2018 г.) и оценка безопасности пищевого сырья.

Сравнение требований, предъявляемых к пищевому сырью морского происхождения в России и Европейском союзе

Безопасность пищевых продуктов гарантируется соблюдением норм, зафиксированных в документации по содержанию загрязняющих веществ химической и биологической природы, а также природных соединений, характерных для данного продукта и представляющих опасность для здоровья [18].

В каждой стране существуют нормативные документы, контролирующие безопасность пищевых продуктов. В странах Европы пищевые продукты должны соответствовать Директивам Европейского союза¹, в России безопасность пищевых продуктов регламентируют СанПиН 2.3.2.1078-01², Технический регламент Таможенного союза 021/2011³ и Технический регламент Евразийского экономического союза 040/2016⁴. Указанные документы устанавливают предельные концентрации кадмия, мышьяка, свинца, ртути, а

¹ Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs // Official Journal of the European Union. 20.12.2006. L364/5–24.

² СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов» (с изменениями на 6 июля 2011 года). М.: Минздрав России, 2002. 36 с.

³ ТР ТС 021/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» / Комиссия Таможенного союза. 2011. 242 с.

⁴ ТР ЕАЭС 040/2016. Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» / Совет Евразийской экономической комиссии. 2016. 135 с.

также дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ) и его метаболитов (ДДД и ДДЕ), конгенов полихлорированных бифенилов (ПХБ), диоксинов (ПХДФ, ПХДД) и изомеров гексахлорциклогексана (α -, β -, γ -ГХЦГ) в пищевых продуктах. Предельно допустимые концентрации (ПДК) для нормируемых элементов и соединений в трех российских документах одинаковы, в связи с этим при сравнении нормативов России и Европы был использован только СанПиН 2.3.2.1078-01. Перечисленные выше поллютанты обладают высокой токсичностью для человека, причем стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ) считаются суперэкоотоксикантами, так как способны к биомагнификации (накопление по пищевой цепи с увеличением концентрации по трофическим уровням). Они вызывают серьезные нарушения здоровья: хлоракне, угнетение иммунной системы («химический» СПИД), проблемы с эндокринной и репродуктивной функциями [1].

При сравнении российских и европейских ПДК для токсичных элементов и СОЗ обнаруживается ряд различий (табл. 1). Так, в Европейском союзе приняты разные ПДК поллютантов для головоногих и двустворчатых моллюсков, а в России этого разделения нет. Нормативы ЕС по содержанию Pb и Cd в гидробионтах более жесткие, но не регламентируют ПДК токсичных элементов в водорослях.

Еще одна отличительная особенность европейских нормативов – отсутствие ПДК для мышьяка. В России мышьяк считается одним из самых токсичных элементов. В пищевых продуктах он может находиться в двух формах: неорганической (iAs) и органической (oAs) [36]. Первая наиболее токсична, вторая наносит значительно меньше вреда здоровью или не наносит вовсе. Средние летальные дозы (LD_{50}) для неорганической и органической форм варьируют от 15 до 175 и от 102 до $>10\ 000$ мг/кг массы тела соответственно. При этом токсичность органической формы зависит от типа соединения. oAs представлен широким рядом веществ, наиболее известные – арсенобетаин, арсеносахара, арсенолипиды и др. Водоросли, ракообразные и другие гидробионты зачастую содержат в своем составе именно органическую форму мышьяка. В ЕС считается, что при потреблении гидробионтов человек поглощает в основном oAs, что практически не влияет на здоровье, поэтому в Европе мышьяк и не нормируют.

Для СОЗ в европейских нормах регламентируются диоксины и диоксиноподобные ПХБ. Стоит отметить, что в ЕС максимально допустимые уровни СОЗ значительно меньше российских. В России нормируется содержание диоксинов и ПХБ для всего морского сырья, нормы изомеров ГХЦГ, ДДТ и его метаболитов установлены только для рыбы (табл. 1).

Таблица 1

Предельно допустимые уровни содержания токсичных веществ в морских гидробионтах, принятые в России и Европейском союзе, мг/кг сырой массы

Токсиканты	Гигиенические нормативы ЕС, мг/кг сырой массы (Директива комиссии ЕС № 1881/2006 от 19.12.2006 г.)					Гигиенические нормативы России, мг/кг сырой массы			
	Рыбы	Двустворчатые моллюски	Головоногие моллюски	Рако- образные	Водо- росли	Рыбы	Мол- люски	Рако- образные	Водо- росли
Свинец	0,3	1,5	1,0	0,5	–	1,0	10,0	10,0	0,5
Кадмий	0,05	1,5	1,0	0,5	–	0,2	2,0	2,0	1,0
Ртуть	0,5	0,2	–	0,5	–	0,5	0,2	0,2	0,1
Мышьяк	–	–	–	–	–	5,0	5,0	5,0	5,0
ДДТ ¹	–	–	–	–	–	0,2	–	–	–
ГХЦГ ²	–	–	–	–	–	0,2	–	–	–
ПХБ ³	$8 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-12}$	2,0	2,0	2,0	2,0
Диоксины	$4 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$

¹ Сумма ДДТ, ДДД и ДДЕ.

² Сумма α -, β -, γ -изомеров ГХЦГ.

³ Для нормативов Европы – сумма диоксинов и диоксиноподобных конгенов ПХБ.

Прочерк означает отсутствие ПДК.

Следует также отметить, что российские нормативы охватывают более широкий список веществ и элементов, чем европейские, однако для них необходимы актуализация показателей безопасности и введение новых, более современных методик определения отдельных веществ, в частности содержащих мышьяк.

Микроэлементы в водорослях российской части Японского моря

Тяжелые металлы (ТМ) относятся к приоритетным загрязняющим веществам, наблюдение за которыми обязательно, поскольку они передаются по пищевым цепям, накапливаясь в организме человека и животных [21]. ТМ имеют локальное, региональное и глобальное распространение; наиболее часто обнаруживаются Pb, Cd, Hg, Cu, Zn, Sn, V, Cr, Mo, Mn и Ni [2]. Поступление ТМ в водную среду может быть связано как с природными процессами (апвеллинги, извержения вулканов), так и с антропогенной активностью (автомобильные выхлопы, сжигание мусора, активная судоходная деятельность и т.д.) [8].

Одним из главных компонентов экосистемы моря являются макрофиты, широко используемые человеком в качестве биоресурса. В связи с наличием в их составе полисахаридов-комплексообразователей, имеющих сродство к поливалентным металлам (идет аккумуляция ТМ в талломах [8]), они рассматриваются как наиболее эффективные индикаторы экологического состояния морской среды [7, 9, 24, 27, 30]. Традиционно работы, направленные на определение концентраций микроэлементов в макрофитах Дальнего Востока, акцентируют внимание на влиянии человеческой деятельности в прибрежных акваториях, на экологическую обстановку того или иного района, отслеживают динамику изменения микроэлементного состава во времени и определяют влияние геохимических условий среды. Концентрации приводятся в мкг/г сухой массы, в то время как в нормативных документах ПДК используется размерность мг/кг сырой массы. Пересчет значений на сырую массу значительно уменьшает полученные концентрации, тем не менее в водорослях из районов с высокой антропогенной нагрузкой возможно превышение ПДК токсичных элементов.

В работе Л.Т. Ковкевдовой и Н.К. Христофоровой [9] была исследована зависимость между различиями микроэлементного состава красных, зеленых и бурых водорослей и временем их появления на Земле. Было подтверждено, что различия в способности концентрировать отдельные микроэлементы у различных отделов водорослей сохраняются до сих пор. Так, зеленые водоросли в большей степени, чем другие, концентрируют железо, в меньшей – рублидий. Красные водоросли занимают промежуточное положение между бурными и зелеными: концентрации цинка, мышьяка, марганца, кадмия, свинца и ртути в них соответствуют таковым в зеленых водорослях, а рублидия – в бурных; уровни железа в багрянках находятся между таковыми в зеленых и бурых водорослях. Бурые водоросли в меньшей степени накапливают марганец, в большей – мышьяк. Последний факт крайне важен, так как наибольшее промышленное значение имеют бурые водоросли, являющиеся сырьем для пищевых производств, получения пищевых и биологически активных добавок, лекарственных препаратов и т.д. В этой же работе авторы указывают на то, что микроэлементный состав водорослей не повторяет состав воды, что говорит о возможности водных растений регулировать накопление тех или иных химических элементов.

В работе В.М. Шулькина с соавторами [30] исследован микроэлементный состав бурых водорослей, произрастающих в бухте Рудная. Указанная бухта подвержена серьезному воздействию промышленных стоков из одноименной реки, на берегах которой располагается действующий свинцово-плавильный завод. Полученные данные указывают на неблагоприятную экологическую обстановку этого района в связи с образовавшейся гидрохимической аномалией из-за активной переработки руды в 1990-х годах. Стоит отметить, что индикаторами загрязнения среды, помимо прочих, выступили водоросли *Fucus evanescens*, *Cystoseira crassipes* и *Costaria costata*, активно используемые человеком

в пищевой промышленности [20]. В результате исследования определены концентрации Cu, Pb, Zn и Cd. Наиболее интересными являются данные по содержанию свинца, уровни которого превышают ПДК у мыса Бринера (около 0,7 мг/кг сырой массы), в 4,5 и 1,5 км южнее бухты Рудная (около 0,5 мг/кг сырой массы)⁵. Таким образом, водоросли из этого района не являются безопасными для использования человеком в пищу или для хозяйственных нужд и промышленности.

Для характеристики экологического состояния Амурского залива использовалась водоросль *Sargassum miyabei* [7], применяющаяся для производства альгиновых кислот, фукоиданов и других веществ [20]. Проведено сравнение с результатами 1995 г. Несмотря на общую динамику снижения концентраций Pb, на двух станциях (бухта Первой Речки и мыс Марковского) наблюдается значительное превышение ПДК (0,65 и 1,7 мг/кг сырой массы соответственно). Во втором случае исследователи видят причину в большом количестве ила и низкой гидродинамике в зал. Угловой, что способствует сорбции металла частицами грунта и приводит к его аккумуляции в водорослях. Тем не менее водоросли из Амурского залива вполне могут быть использованы для хозяйственной деятельности человека с точки зрения безопасности микроэлементного состава.

Залив Посыета исследовался в конце 1990-х годов и характеризовался серьезным превышением ПДК свинца в водорослях [4, 13, 17, 31]. В 2017 г. были представлены концентрации микроэлементов в водорослях *Sargassum miyabei*, *Sargassum pallidum* и *Cystoseira crassipes* из этого залива [24]. При сравнении результатов 1998 и 2016 гг. видно значительное снижение концентраций всех исследованных элементов (рис. 1), что свидетельствует об очистке залива.

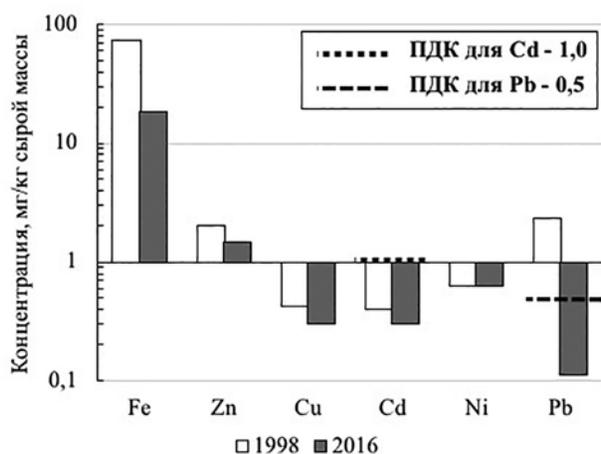


Рис. 1. Максимальные концентрации микроэлементов в водорослях зал. Посыета в 1998 и 2016 гг. [24]

отслеживания временных трендов изменения концентраций микроэлементов. В водорослях из обеих бухт отмечены повышение концентрации кадмия и неоднозначные изменения (как увеличение, так и уменьшение на некоторых станциях) концентрации свинца. В работе отмечается, что несмотря на меньшее время эксплуатации бухты Козьмина содержание Pb и Cd (до 0,42 и 0,29 мг/кг сырой массы соответственно) в ней выше, чем в бухте Врангеля (до 0,36 и 0,18 мг/кг сырой массы соответственно). Исследователи связывают это со стоянкой маломерного флота, постоянным подходом катеров и длительным накоплением судов, готовых к утилизации. На накопление токсикантов также влияет низкая гидродинамика бухты, что приводит к накоплению в донных отложениях железа и свинца.

⁵ В ряде работ концентрации загрязняющих веществ представлены в мкг/г или мг/кг сухой массы. Для сравнения с нормативами, где они представлены в мг/кг сырой массы, результаты пересчитывались. В работах, где не указывалась влажность образцов, для пересчета использовались средние значения влажности из литературы.

Отмечается увеличение техногенного пресса в этих районах. В целом исследованные водоросли удовлетворяют гигиеническим нормативам России. Тем не менее использование макрофитов из этих бухт в производственных процессах не рекомендуется ввиду активной портовой деятельности, которая чревата разливами нефтепродуктов и других органических загрязняющих веществ, исследование которых не производилось.

Сравнение максимальных концентраций свинца в водорослях для районов Японского моря с ПДК приведены на рис. 2. В целом видно, что повышенные концентрации Pb приурочены к местам, загрязненным в прошлом, или к районам с сильнейшей антропогенной активностью. Максимальные концентрации обнаружены в водорослях, собранных близ Владивостока, что свидетельствует о необходимости проведения природоохранных мероприятий. Безопасными с точки зрения содержания микроэлементов являются водоросли, находящиеся в более открытых бухтах с хорошей гидродинамикой, например из зал. Посыета.

Таким образом, основные исследования микроэлементного состава водорослей направлены не на оценку их безопасности для использования в хозяйственной деятельности человека, а на характеристику экологического состояния отдельных районов российской части Японского моря. Тем не менее оценка безопасности водорослей с точки зрения микроэлементного состава важна в первую очередь экономически, так как многие макрофиты дальневосточных морей являются сырьем для производства пищевых и биологически активных добавок, медицинских препаратов. В связи с этим требуется расширение исследований морских водорослей, при этом они должны рассматриваться не только как индикаторы экологического состояния района, но и как сырье для различных хозяйственных нужд.

Микроэлементный состав ракообразных российской части Японского моря

Морские промысловые ракообразные (например, крабы и креветки) используются человеком в пищу и служат сырьем для изготовления медицинских препаратов. К основным факторам, формирующим микроэлементный состав тканей гидробионтов, относят биологическую значимость элементов, т.е. выполняемые в организмах функции, и качество среды их обитания. Сведения о содержании ТМ в органах ракообразных весьма малочисленны, что доказывает необходимость расширения исследований, поскольку есть данные и о высоких концентрациях, например As, в креветках и крабах [34].

Количественная оценка содержания микроэлементов в морских ракообразных в сравнительном аспекте важна как для практических целей, так и для выяснения причин, определяющих формирование микроэлементного состава организмов. Известно, что грунты сорбируют различные элементы из водной толщи. Ракообразные, будучи бентосными

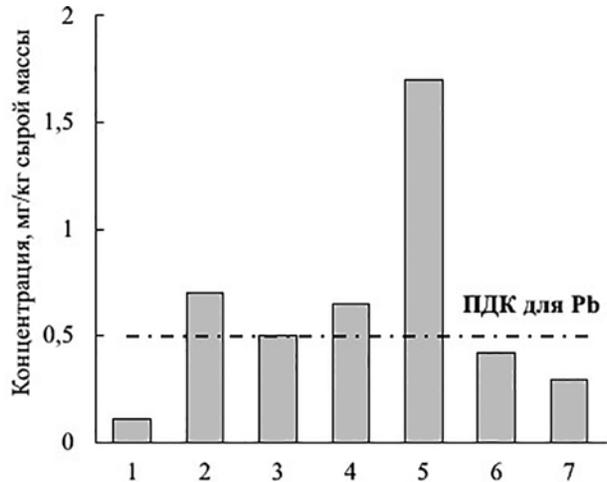


Рис. 2. Максимальные концентрации свинца, обнаруженные в водорослях Японского моря [27]. 1 – зал. Посыета, 2 – мыс Бринера, 3 – бухта Рудная, 4 – бухта Первой Речки (Владивосток), 5 – мыс Марковского, 6 – бухта Козьмина, 7 – бухта Врангеля

организмами, непосредственно контактируют с морским дном, ищут там пищу, что может способствовать накоплению ТМ в этих организмах.

Ракообразные в Японском море изучались Л.Т. Ковековдой с соавторами [12, 18]. Исследовались мягкие ткани промысловых ракообразных *Chionoecetes opilio*, *Paralithodes camtschaticus*, *Pandalus borealis*, *P. hypsinotus*, *Sclerocrangon salebrosa*, отобранных в 2012–2016 гг. у российского побережья. Были определены концентрации As, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Se и Hg. Наиболее примечательными являются данные по кадмию, свинцу, ртути и мышьяку.

Так, содержания Cd и Pb в промысловых ракообразных не превышают нормативных значений (диапазоны концентраций – 0,01–0,015 и 0,01–0,09 мг/кг сырой массы, ПДК – 2 и 10 мг/кг сырой массы соответственно). Максимальные концентрации ртути были выше, чем ПДК (0,2 мг/кг сырой массы), в отобранных в 2014 г. образцах мягких тканей клешней *Chionoecetes opilio* и составляли до 0,30 мг/кг сырой массы. Превышение ПДК ртути обнаружено только у этого вида, поэтому нет оснований полагать, что среда обитания ракообразных содержит большое количество Hg.

Наиболее важными являются данные о концентрациях мышьяка в исследованных образцах. Среди проб каждого года сбора и вида ракообразных отмечено превышение его ПДК (5 мг/кг сырой массы): *Chionoecetes opilio* – от 5,5 до 15,3; *Paralithodes camtschaticus* – от 5,8 до 8,8; *Pandalus borealis* – от 5,5 до 10,0; *P. hypsinotus* – от 6,6 до 16,2; *Sclerocrangon salebrosa* – от 5,4 до 17,3 мг/кг сырой массы. Превышение общего As выявлено в 17,5 % проанализированных особей *Pandalus borealis*, 33,3 % – *P. hypsinotus*, 17,0 % – *Chionoecetes opilio*, 68,0 % – *Paralithodes camtschaticus*, 35,5 % – *Sclerocrangon salebrosa*. Ввиду того, что нормативные документы России стандартизируют только общий мышьяк, ежегодно огромное количество ракообразных отбраковывается и не допускается к реализации на внутреннем и внешнем рынках. Авторы указывают на необходимость разработки методов отдельного определения органической и неорганической форм мышьяка и их отдельной стандартизации нормативными документами. (При этом считается, что мышьяк ракообразных находится в малотоксичной органической форме [34].)

Таким образом, исходя из представленных результатов, в соответствии с существующими гигиеническими нормативами микроэлементный состав исследованных ракообразных не может быть охарактеризован как полностью безопасный.

Микроэлементный состав двустворчатых моллюсков русской части Японского моря

Прибрежные воды Японского моря находятся под серьезным антропогенным и техногенным воздействием. Это приводит к нарушению природного фона многих элементов в среде и организмах. Двустворчатые моллюски являются организмами с фильтрующим характером питания, что подразумевает прокачку огромных объемов воды, несущих в себе, наряду с пищей, различные микроэлементы, в том числе и токсичные. Вследствие этого они способны аккумулировать отдельные микроэлементы до концентраций в 10^3 – 10^5 раз больших, чем в окружающей среде (гиперконцентрирование) [11]. Этот процесс может быть видоспецифичным: например, модиолус длиннощетинковый (*Modiolus modiolus*) в большей степени концентрирует Mn, гигантская устрица (*Crassostrea gigas*) – Zn и Cu, гребешок приморский (*Mizuhopecten yessoensis*) – Cd; и т.д. Таким образом, необходимость в мониторинге микроэлементного состава промысловых видов двустворчатых моллюсков вполне очевидна.

В работе Н.И. Стеблевской с соавторами [19] определен микроэлементный состав тканей отдельных видов гидробионтов, среди которых были мидия тихоокеанская (*Mytilus trossulus*) и гребешок приморский (*Mizuhopecten yessoensis*) из бухты Северная зал. Петра Великого. Известно, что в России в пищу используется мускул моллюсков. Оценить

безопасность исследованных моллюсков, используя представленные в исследовании результаты, достаточно сложно ввиду того, что анализу подвергались все мягкие ткани без разделения на органы, к тому же не исследовались свинец и ртуть. Тем не менее стоит отметить, что в мягких тканях тихоокеанской мидии концентрации кадмия и мышьяка были меньше пределов обнаружения (от 10^{-7} до 10^{-10} % для различных элементов). В приморском гребешке из исследованных нормируемых элементов был обнаружен только кадмий (1,2 мг/г сырой массы).

Выращивание морского гребешка на побережье Приморья началось более 30 лет назад, с 1988 г. Производство пришло в упадок с наступлением кризиса рыбной отрасли. Однако в последнее время постепенно восстанавливаются плантации и наращиваются объемы реализации продукции. Исследование содержания металлов и мышьяка в органах культивируемого приморского гребешка (*Mizuhopecten yessoensis*), собранного в 2014–2015 гг. [5], показало, что концентрации всех элементов (за исключением мышьяка) многократно возрастают ко второму году жизни и столь же значительно снижаются к третьему, когда гребешок достигает своих товарных размеров. Из нормируемых компонентов в мускуле гребешка определены кадмий, свинец и мышьяк. Особенно важным с точки зрения пищевой безопасности является кадмий, так как известно, что тихоокеанский гребешок способен содержать этот элемент в более высоких концентрациях, чем другие виды двустворчатых моллюсков [41]. Концентрации кадмия, свинца и мышьяка в мускуле гребешка составили (в среднем) 0,36, 0,008 и 0,1 мг/кг сырой массы соответственно, что не превышает нормативов концентраций России. Примечательным является содержание микроэлементов в пищеварительной железе исследованного моллюска. Этот орган является не только депонирующим, но и детоксицирующим. В связи с этим в нем накапливаются максимальные уровни меди, кадмия и свинца. Особенно велико содержание Cd – 2,56 мг/кг сырой массы (при ПДК для Cd 2,0 мг/кг сырой массы). Это создает опасность загрязнения товарного гребешка при нарушении технологической обработки, так как на производстве не всегда существует возможность мгновенной остановки технологического процесса и ликвидации потенциальных опасностей или дефектных продуктов.

Помимо приморского гребешка, в прибрежных акваториях Японского моря ведется промысел таких моллюсков, как мидия тихоокеанская (*Mytilus trossulus*), мидия Грея (*Crenomutilus grayanus*), модиолус длиннощетиный (*Modiolus modiolus*) и устрица гигантская (*Crassostrea gigas*). В настоящее время в России расширен список промысловых видов моллюсков, куда были добавлены спизула сахалинская (*Spisula sachalinensis*) и мерценария Стимпсона (*Mercenaria stimpsoni*). В 2014 г. исследован микроэлементный состав этих моллюсков. Образцы отбирались в бухте Бойсмана, зал. Китовое Ребро и в бухте Рудная [11]. Концентрации As, Cd, Pb и Hg не превышали установленных в России ПДК.

Таким образом, согласно гигиеническим нормативам России, двустворчатые моллюски из Японского моря являются безопасными для употребления в пищу. Однако их способность концентрировать в своих тканях различные элементы (в том числе токсичные) создает острую необходимость в регулярном мониторинге их микроэлементного состава.

Микроэлементный состав рыб дальневосточных морей России

Рыбы и рыбная продукция – один из основных источников полноценного и легкоусвояемого белка для человека, поэтому производится оценка их качества на содержание эссенциальных (необходимых – Fe, Zn, Cu, K, Na, Mg и др.) и неэссенциальных (токсичных) элементов [10].

В 2011 г. проведено исследование микроэлементного состава дальневосточной красноперки (*Tribolodon brandtii*) и кефали-лобана (*Mugil cephalus*), выловленных в зал. Петра Великого [3]. Эти организмы являются массовыми видами ихтиофауны прибрежных вод Дальнего Востока и имеют промысловое значение. Кадмий и ртуть не определялись ни

в одной из проб. Концентрации свинца и мышьяка составляли для дальневосточной красноперки 0,034 и 0,026 мг/кг сырой массы, а для кефали-лобана 0,048 и 0,031 мг/кг сырой массы соответственно. Также был оценен уровень СОЗ, однако во всех исследованных пробах концентрации ДДТ, ГХЦГ и ПХБ были ниже пределов обнаружения оборудования, хотя наиболее актуальные исследования [40, 42, 48] показывают, что СОЗ обнаруживаются во всех исследуемых пробах, пусть и в небольших количествах. Невозможность точного определения концентраций СОЗ может быть связана с высоким минимальным пределом обнаружения используемого оборудования и методиками пробоподготовки. Полученные значения загрязняющих веществ отсутствуют или значительно меньше ПДК, что указывает на безопасность этих рыб для употребления в пищу.

Известно, что зоны смешения соленых и пресных вод рассматриваются как геохимические барьеры на пути поступления микроэлементов в морские экосистемы. Здесь происходит осаждение многих растворенных и взвешенных в пресной воде веществ, что приводит к их накоплению в водных массах и грунтах. В связи с этим такие районы считаются зонами накопления токсикантов. Проводились исследования тканей придонных рыб: красноперки (*Tribolodon brandtii*), минтая (*Theragra chalcogramma*), камбалы остроголовой (*Hippoglossoides (Cleisthenes) herzensteini*) и наваги тихоокеанской (*Eleginus gracilis*) [6, 19]. Образцы были собраны в различных районах зал. Петра Великого: бухте Северной, зал. Лебединый и прибрежных акваториях северо-восточной части о-ва Русский. Анализировали используемые в пищу ткани – кожу, мышцы и печень. Из нормируемых элементов у красноперки, камбалы и наваги определяли только мышьяк, у минтая – мышьяк и свинец. Обнаруженные концентрации значительно меньше ПДК. Тем не менее говорить о безопасности употребления в пищу исследованных рыб из представленных в работе данных невозможно, ввиду того что не изучалось содержание кадмия и ртути.

Среди пелагических объектов, являющихся основой рыболовства в дальневосточных морях, наибольшее промысловое значение имеют тихоокеанские лососи (род *Oncorhynchus*), по объему вылова стоящие на втором-третьем месте после минтая и сельди. Поэтому крайне важен контроль пищевой безопасности лососевых рыб. В 2012 и 2013 гг. при исследовании микроэлементного состава горбуши (*O. gorbuscha*) и кеты (*O. keta*) из прикурильского района Охотского моря [23, 26] определены концентрации 6 элементов (Zn, Cu, Cd, Pb, As, Hg). Превышения ПДК не зафиксировано, однако отмечено приближение концентраций свинца в тканях самок кеты (0,95 мг/кг сырой массы) к максимально допустимой концентрации (1,0 мг/кг сырой массы). В открытом океане свинец, как и другие микроэлементы, присутствует в очень малых, буквально следовых, количествах – от 5 до 150 пмоль/кг [35]. 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 воды и постепенному его осаждению. В зоне же, богатой питательными веществами, поставляемыми апвеллингами и вулканическими процессами, которая насыщена планктонными организмами, появляется большое количество биогенной взвеси и взвешенного свинца ($Pb_{взв}$). Горбуша и кета нагуливаются вдоль Курильских островов и Курило-Камчатского желоба [32, 33], и специфика геохимических условий за время нагула рыб в высококормном Курило-Камчатском регионе, богатом биогенной взвесью с высоким содержанием $Pb_{взв}$, отражается на микроэлементном составе рыб [25].

Л.Т. Ковековдой с соавторами [10] был исследован микроэлементный состав рыб, выловленных в промысловых районах Дальнего Востока: терпуга восьмилнейного (*Hexagrammos octogrammus*), минтая (*Theragra chalcogramma*), горбуши, кеты, камбал. Обнаружены превышения концентраций кадмия и свинца в печени камбал остроголовой (*Cleisthenes herzensteini*), сахалинской (*Limanda sakhalinensis*) и желтоперой (*Limanda aspera*), а также тихоокеанских лососей – горбуши и кеты (табл. 2). У камбал, судя по всему, это связано с придонным образом жизни. Известно, что донные отложения могут

сорбировать тяжелые металлы в больших количествах, а камбалы являются типичными бентофагами, а также зарываются в грунт для защиты [22], что приводит к поступлению токсичных элементов в их организмы.

Таблица 2

Виды рыб, в печени которых концентрации кадмия и свинца (мг/кг сырой массы) превышают ПДК [10]

Район вылова	Вид	Токсикант	
		Cd	Pb
Охотское море	Камбала остроголовая	0,60 ± 0,06	–
	Камбала сахалинская	0,40 ± 0,04	–
Японское море	Камбала желтоперая	–	15,8 ± 1,6
Берингово море	Кета	0,288 ± 0,03	–
СЗТО	Горбуша	0,320 ± 0,03	–
ПДК		0,2	1,0

Примечание. Прочерк – концентрация не превышает нормативных значений. СЗТО – северо-западная часть Тихого океана.

Таким образом, микроэлементный состав рыб дальневосточных морей России позволяет считать безопасным их употребление в пищу. Однако отмечаются единичные превышения ПДК по свинцу и кадмию в рыбах, в основном камбалах и некоторых видах тихоокеанских лососей.

Стойкие органические загрязняющие вещества в некоторых гидробионтах дальневосточных морей России

Работы, исследующие концентрации СОЗ в тканях гидробионтов дальневосточных морей, начались сравнительно недавно, в связи с чем они достаточно малочисленны. Мониторинг данных соединений крайне важен ввиду их стойкости в окружающей среде, способности к биоаккумуляции и биомагнификации. Благодаря своим физико-химическим свойствам СОЗ способны перемещаться на большие расстояния за пределы зоны их использования, а также передаваться по пищевым цепям, обнаруживаясь в том числе в органах и тканях человека [46, 47].

В существующих работах исследуются концентрации α -, β - и γ -изомеров ГХЦГ, ДДТ и его метаболитов (ДДД, ДДЕ) и конгенов ПХБ в органах рыб, которые используются в пищу (печень, гонады, мышцы).

В 2015 г. исследовано содержание хлорорганических пестицидов (ХОП) у горбуши и кеты [15] (табл. 3). Исследованию подверглись мышцы, печень и гонады. ХОП были обнаружены во всех исследованных образцах. Наибольшие концентрации токсикантов были определены в гонадах как кеты, так и горбуши, причем в гонадах самцов концентрация ксенобиотиков была выше, чем в гонадах самок. Из метаболитов ГХЦГ были обнаружены α -, β - и γ -изомеры. Из метаболитов ДДТ – только ДДЕ, что свидетельствует о распаде исходного соединения и давности его применения. Сумма изомеров ГХЦГ была значительно выше ДДЕ. Содержание ХОП в кете было выше, чем в горбуше, что исследователи связывают с разной жирностью рыб и временем их пребывания в море. Сравнивая полученные результаты с российскими нормативами (для суммы метаболитов ДДТ – 200 нг/г, изомеров ГХЦГ – 200 нг/г сырой массы), можно заключить, что в пищевом отношении данные объекты не опасны, за исключением молок и икры кеты.

Также исследовались химический состав, биологическая ценность и безопасность минтая *Theragra chalcogramma* из зал. Петра Великого [14]. Проанализированы внутренние органы (все вместе) и мышечная ткань. Концентрации ХОП в мышечной ткани составляли соответственно 0,053 и 0,017 мг/кг сырой массы. Концентрация ПХБ

Таблица 3
**Концентрация ($M \pm SD$, нг/г сырой массы) суммы ХОП
 в образцах горбуши *Oncorhynchus gorbusha*
 и кеты *O. keta* [15]**

Вид	Орган, ткань	Сумма ХОП (ГХЦГ+ДДТ)
Горбуша	Мышцы	$29,9 \pm 5,1$ $40,8 \pm 9,9$
	Печень	$104,2 \pm 13,9$ $35,4 \pm 13,5$
	Гонады	$161,1 \pm 11,8$ $71,4 \pm 25,6$
Кета	Мышцы	$40,3 \pm 11,8$ $43,3 \pm 6,2$
	Печень	$56,5 \pm 25,2$ $65,8 \pm 21,4$
	Гонады	$987,0 \pm 328,0$ $490,5 \pm 150,6$
ПДК		400

Примечание. $M \pm SD$ – среднее значение показателя и его ошибка. Над чертой – данные по самцам, под чертой – по самкам.

2.3.2.1078-01, не превышает санитарно-эпидемиологические нормы Российской Федерации. Для тканей горбуши и кеты установлена следующая зависимость распределения токсикантов: молоко > икра > печень > мышцы, поскольку из-за липофильности ХОП органами-мишенями этих соединений в первую очередь выступают половые продукты. Также авторы подчеркивают, что в мышцах и печени горбуши накапливается больше пестицидов, чем у кеты. Однако концентрации ХОП в гонадах и икре кеты на порядок превышают таковые у горбуши, что может быть связано как с большей продолжительностью жизни кеты и длительностью накопления ксенобиотиков, так и с возможным проходом исследованных рыб через сильно загрязненные районы во время нагула. Более высокие, по сравнению с кетой и горбушей, концентрации ксенобиотиков выявлены у чавычи, а также нерки (наибольшие показатели), что связано с более высокой жирностью [48], а также большей продолжительностью жизни последних двух видов.

Тем же составом авторов были исследованы ХОП и ПХБ в камбале Охотского моря [42]. СОЗ были обнаружены во всех экземплярах рыб. Содержание ХОП и конгенеров ПХБ в камбалах из южной части Охотского моря составило 0,72 и 0,8, из восточной – 0,11 и 0,18 нг/г сырой массы соответственно. ПДК для ПХБ – 2000 нг/г сырой массы.

Подобное исследование проведено Е.А. Мамонтовой с соавторами (2018) [16]. Сравнивались концентрации ДДТ и его метаболитов, изомеров ГХЦГ и ПХБ в органах жилой и анадромной форм нерки, во втором случае – дополнительно в молоках и икре. Во всех пробах содержание СОЗ не превышало российских нормативов. Стоит отметить, что в полученных данных не соблюдается зависимость распределения токсикантов по органам, как в работе О.Н. Лукьяновой с соавторами [40], концентрации ксенобиотиков в икре были выше, чем в молоках.

Таким образом, практически не отмечено случаев превышения нормативов по СОЗ для рыбы из дальневосточных морей России, и она может быть использована в пищевой промышленности. Однако органическим загрязняющим веществам следует уделять особое внимание, так как эти соединения, по решению Стокгольмской конвенции, могут использовать развивающиеся страны для борьбы с вредителями до тех пор, пока не будут найдены альтернативные средства защиты. За счет своей летучести эти СОЗ способны переноситься на большие расстояния, в том числе в холодные регионы планеты, осажаться и накапливаться в морских организмах.

(вероятно, в мышцах) варьировала от 0,002 до 0,003 мг/кг сырой массы. Таким образом, содержание хлорорганических соединений не превышает ПДК, принятых в России.

Биоаккумуляция ХОП в пробах (мышцы, печень, молоко, икра) из рыб 4 видов лососей: горбуши (*Oncorhynchus gorbusha*), кеты (*O. keta*), чавычи (*O. tshawytscha*) и нерки (*O. nerka*) – из Охотского и Берингова морей рассмотрена О.Н. Лукьяновой с соавторами [40]. Во всех исследованных образцах были обнаружены токсичные соединения. Сумма концентраций ХОП в мышцах горбуши (35,4 нг/г сырой массы), кеты (41,8), чавычи (103,8) и нерки (158,7 нг/г сырой массы), согласно СанПиН

Заключение

К настоящему моменту имеется большой объем данных о микроэлементном составе морских организмов из различных зон морей Дальнего Востока России, мониторинг содержания тяжелых металлов и мышьяка широко развит и регулярен. Исследования концентраций микроэлементов актуальны, учитывая наличие гидрохимических аномалий, локального загрязнения и активного судоходства в дальневосточных морях. В первую очередь необходим контроль бентосных организмов (рыб и ракообразных) и организмов с фильтрующим характером питания (двустворчатых моллюсков). Также, для более полного использования природных ресурсов Дальнего Востока, необходима оценка безопасности использования водорослей в различных отраслях промышленности.

Исследование концентраций хлорорганических соединений на Дальнем Востоке России находится только на начальном этапе. Из промысловых морских организмов на текущий момент хорошо исследованы лишь тихоокеанские лососи и камбалы. Однако при проведении мониторинговых исследований СОЗ обнаруживают во всех исследуемых образцах, что говорит о необходимости расширения подобных работ. В западной части России мониторинг ХОП и ПХБ проводится сравнительно регулярно, Дальний Восток все еще остается мало изученным. Расширение исследований стойких органических поллютантов позволит более полно оценить экологическое состояние региона и провести расчет экологических рисков для населения России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амирова З.К., Сперанская О.К. Новые стойкие органические супертоксикианты и их влияние на здоровье человека. М.: Москва, 2016. 169 с.
2. Васильев А.А., Чащин А.Н. Тяжелые металлы в почвах города Чусового: оценка и диагностика загрязнения. Пермь: Пермская ГСХА, 2011. 197 с.
3. Волотка Ф.Б., Богданов В.Д. Пищевая безопасность дальневосточной красноперки и кефали-лобана в заливе Петра Великого // Науч. тр. Дальневост. гос. техн. рыбохоз. ун-та. 2012. Т. 27. С. 110–115.
4. Вышкварцев Д.И., Лебедев Е.Б. Проект экономического развития реки Туманган (TREDA) – угроза экосистеме мелководных бухт залива Посьета Японского моря // Биология моря. 1997. Т. 23, № 1. С. 51–55.
5. Вязникова К.С., Ковековдова Л.Т. Содержание металлов и мышьяка в культивируемом приморском гребешке (*Mizuhopecten yessoensis*) и влияние марикультурного хозяйства в заливе Петра Великого на содержание тяжелых металлов в донных отложениях // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия: Рыбное хозяйство. 2016. № 3. С. 109–114.
6. Жадько Е.А., Стеблевская Н.И., Полякова Н.В. и др. Микроэлементы в тканях некоторых видов гидробионтов залива Петра Великого // Науч. тр. Дальневост. гос. техн. рыбохоз. ун-та. 2013. Т. 30. С. 19–27.
7. Кобзарь А.Д., Христофорова Н.К. Мониторинг загрязнения прибрежных вод Амурского залива (Японское море) тяжелыми металлами с использованием бурой водоросли *Sargassum miyabei* Yendo, 1907 // Биология моря. 2015. Т. 41, № 5. С. 361–365.
8. Кобзарь А.Д., Христофорова Н.К. Оценка загрязнения вод залива Петра Великого тяжелыми металлами по их содержанию в бурых водорослях-макрофитах // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря: монография. Владивосток: Изд. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. С. 362–381.
9. Ковековдова Л.Т., Христофорова Н.К. Микроэлементы в морских макрофитах Дальнего Востока России // Успехи наук о жизни. 2011. № 3. С. 41–60.
10. Ковековдова Л.Т., Кику Д.П., Касьяненко И.С. Мониторинг содержания металлов и мышьяка в промысловых рыбах и морской воде дальневосточных морей // Рыб. хоз-во. 2015. № 2. С. 18–24.
11. Ковековдова Л.Т., Кику Д.П., Касьяненко И.С., Власенко Р.В. Оценка уровней содержания металлов и мышьяка в двустворчатых моллюсках северо-западной части российской зоны Японского моря // Современные проблемы управления природными ресурсами и развитием социально-экономических систем: материалы XII междунар. науч. конф. М.: Моск. ун-т им. С.Ю. Витте, 2016. С. 116–123.
12. Ковековдова Л.Т., Кику Д.П. Оценка уровней содержания микроэлементов в морских промысловых объектах Дальневосточного бассейна // Экологические проблемы природопользования и охрана окружающей среды в Азиатско-Тихоокеанском регионе: среды жизни, их охрана и восстановление. Владивосток: Дальнаука: Изд-во ВГУЭС, 2016. С. 101–108.
13. Коженкова С.И., Христофорова Н.К. Биомониторинг содержания тяжелых металлов в морских прибрежных водах юго-западной части залива Петра Великого с использованием бурых водорослей // Экологическое

состояние и биота юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. Т. 3. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 33–41.

14. Купина Н.М., Баштовой А.Н., Павелъ К.Г. Исследование химического состава, биологической ценности и безопасности минтая *Theragra chalcogramma* залива Петра Великого // Изв. ТИНРО. 2015. Т. 180. С. 310–319.

15. Лукьянова О.Н., Цыганков В.Ю., Боярова М.Д., Христофорова Н.К. Тихоокеанские лососи рода *Oncorhynchus* как вектор переноса стойких загрязняющих веществ в океане // Вопр. ихтиологии. 2015. Т. 55, № 3. С. 351–355.

16. Мамонтова Е.А., Лепская Е.В., Тарасова Е.Н. и др. Хлорорганические пестициды и полихлорированные бифенилы в тканях жилой формы нерки Толмачевского водохранилища, п-ов Камчатка // Биология внутренних вод. 2018. № 2. С. 76–83.

17. Мощенко А.В., Ванин Н.С., Ламыркина А.Е. Рельеф дна, донных отложений и гидрологические условия российской части приустьевой зоны реки Туманной // Экологическое состояние и биота юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. Владивосток: Дальнаука, 2000. Т. 1. С. 42–75.

18. Наревич И.С., Ковалова Л.Т. Микроэлементы (As, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Se, Hg) в промысловых ракообразных Японского моря // Изв. ТИНРО. 2017. Т. 189. С. 147–155.

19. Стеблевская Н.И., Полякова Н.В., Жадько Е.А. и др. Микроэлементный состав тканей некоторых видов гидробионтов залива Петра Великого (бухта Северная) // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 5. С. 127–132.

20. Титлянов Э.А., Титлянова Т.В. Морские растения стран Азиатско-Тихоокеанского региона, их использование и культивирование. Владивосток: Дальнаука, 2012. 377 с.

21. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 194 с.

22. Фадеев Н.С. Справочник по биологии и промыслу рыб северной части Тихого океана. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2005. 366 с.

23. Христофорова Н.К., Цыганков В.Ю., Боярова М.Д. и др. Отражение биогеохимических условий морской среды на содержание микроэлементов в тихоокеанских лососях // Успехи наук о жизни. 2014. Т. 8, № 1. С. 91–100.

24. Христофорова Н.К., Кобзарь А.Д. Оценка экологического состояния залива Посыета (Японское море) по содержанию тяжелых металлов в бурых водорослях-макрофитах // Самар. науч. вестн. 2017. Т. 6, № 2. С. 91–95.

25. Христофорова Н.К., Цыганков В.Ю., Боярова М.Д. и др. Содержание микроэлементов в тихоокеанских и атлантических лососях // Океанология. 2015. Т. 55, № 5. С. 751–758.

26. Христофорова Н.К., Цыганков В.Ю., Боярова М.Д. и др. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в горбуше *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum, 1792 из прикурильских океанических вод во время анадромной миграции // Биология моря. 2015. Т. 41, № 6. С. 447–452.

27. Христофорова Н.К., Гамаюнова О.А., Афанасьев А.П. Состояние бухт Козьмина и Врангеля (залив Петра Великого, Японское море): динамика загрязнения тяжелыми металлами // Изв. ТИНРО. 2015. Т. 180. С. 179–186.

28. Цыганков В.Ю., Боярова М.Д., Лукьянова О.Н. и др. Гексахлорциклогексан и ДДТ в морских организмах Охотского и Берингова морей // Изв. ТИНРО. 2014. Т. 176. С. 225–232.

29. Цыганков В.Ю., Лукьянова О.Н., Боярова М.Д. Стойкие органические загрязняющие вещества в морских птицах Охотского моря // Изв. ТИНРО. 2018. Т. 192. С. 136–144.

30. Шулькин В.М., Чернова Е.Н., Христофорова Н.К. и др. Влияние горнорудной деятельности на изменение химического состава компонентов водных экосистем // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 6. С. 483–494.

31. Шулькин В.М. Оценка загрязнения металлами вод реки Туманной и прилегающих морских вод // Экологическое состояние и биота юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. Владивосток: Дальнаука, 2000. Т. 1. С. 76–85.

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

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

34. Borak J., Hosgood H.D. Seafood arsenic: Implications for human risk assessment // Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2007. Vol. 47, N 2. P. 204–212.

35. Bruland K.W., Lohan M.C. Control of trace metals in seawater // Treatise on Geochemistry. Vol. 6 / ed. H. Elderfield. Elsevier, 2003. P. 23–47.

36. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific Opinion on Arsenic in Food: Arsenic in Food // EFSA Journal. 2009. Vol. 7, N 10. – <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2009.1351> (дата обращения: 23.05.2019).

37. Eto K. Minamata disease // Neuropathology. 2000. Vol. 20, iss. s1. P. 14–19.

38. Fung F., Wang H.-S., Menon S. Food safety in the 21st century // Biomed. J. 2018. Vol. 41, N 2. P. 88–95.

39. Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu., Lukyanova O.N. et al. High mercury bioaccumulation in Pacific salmon from the Sea of Okhotsk and the Bering Sea // Environmental Chemistry Letters. 2018. Vol. 16, N 2. P. 575–579.

40. Lukyanova O.N. et al. Bioaccumulation of HCHs and DDTs in organs of Pacific salmon (genus *Oncorhynchus*) from the Sea of Okhotsk and the Bering Sea // Chemosphere. 2016. Vol. 157. P. 174–180.

41. Lukyanova O.N., Belcheva N.N., Chelomin V.P. Cadmium bioaccumulation in the scallop *Mizuhopecten yessoensis* from an unpolluted environment // *Ecotoxicology of metals in invertebrates*. Boca Raton (Florida): Lewis Publ., 1993. P. 25–35.
42. Lukyanova O.N., Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in the Bering flounder (*Hippoglossoides robustus*) from the Sea of Okhotsk // *Marine Pollution Bull.* 2018. Vol. 137. P. 152–156.
43. Mogol B.A., Gökmen V. Effect of chitosan on the formation of acrylamide and hydroxymethylfurfural in model, biscuit and crust systems // *Food Funct.* 2016. Vol. 7, N 8. P. 3431–3436.
44. Ojagh S.M., Hasani S. Characteristics and oxidative stability of fish oil nano-liposomes and its application in functional bread // *J. of Food Measurement and Characterization*. 2018. Vol. 12, N 2. P. 1084–1092.
45. Shimohata T. et al. Clinical aspects of the Niigata Minamata disease // *Brain Nerve*. 2015. Vol. 67, N 1. P. 31–38. In Jap.
46. Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D., Kiku P.F. et al. Hexachlorocyclohexane (HCH) in human blood in the south of the Russian Far East // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. Vol. 22, N 18. P. 14379–14382.
47. Tsygankov V.Yu., Khristoforova N.K., Lukyanova O.N. et al. Selected Organochlorines in Human Blood and Urine in the South of the Russian Far East // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2017. Vol. 99, N 4. P. 460–464.
48. Tsygankov V.Yu., Lukyanova O.N., Khristoforova N.K. The Sea of Okhotsk and the Bering Sea as the region of natural aquaculture: Organochlorine pesticides in Pacific salmon // *Marine Pollution Bulletin*. 2016. Vol. 113, N 1/2. P. 69–74.
49. Vijaykrishnaraj M., Roopa B.S., Prabhasankar P. Preparation of gluten free bread enriched with green mussel (*Perna canaliculus*) protein hydrolysates and characterization of peptides responsible for mussel flavour // *Food Chem.* 2016. Vol. 211. P. 715–725.