

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ МОРСКИХ ГИДРОБИОНТОВ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА ПОСЛЕ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-1» В 2011 г.

**Борисенко Г.С., Зуенко Ю.И., Басюк Е.О.**

*Тихоокеанский филиал Всероссийского научно-исследовательского  
института рыбного хозяйства и океанографии,  
Россия, 690091, Владивосток, переулок Шевченко, д. 4,  
e-mail: [zuenko\\_yury@hotmail.com](mailto:zuenko_yury@hotmail.com)*

Статья поступила в редакцию 16.07.2020, одобрена к печати 20.10.2020.

Обобщены результаты измерений радиоактивного загрязнения тканей промысловых рыб, крабов, креветок и водорослей в российских водах СЗТО в течение нескольких лет после аварии на АЭС «Фукусима-1», произошедшей в марте 2011 г. и сопровождавшейся выбросами радиоактивных изотопов в атмосферу и непосредственно в Тихий океан. В течение всего времени, прошедшего после аварии, не отмечено ни одного случая опасного загрязнения уловов российских рыбаков. Наибольшая активность радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$  до 8,1 Бк/кг сырой массы,  $^{134}\text{Cs}$  до 6,9 Бк/кг с.м.) наблюдалась у рыб (молоди горбуши), выловленных в южной части экономзоны России через несколько дней после мощного выброса радионуклидов в атмосферу. Уже летом 2011 г. уровень радиоактивного загрязнения гидробионтов повсеместно, даже в этом районе, приблизился к региональному фоновому уровню, в том числе у рыб – южных мигрантов, в 2012 г. восстановился доаварийный уровень загрязнения, а в 2013 г. восстановилась тенденция к снижению радиоактивного загрязнения, установившаяся со времени окончания испытаний ядерного оружия. Измеренная активность радионуклидов в тканях всех видов промысловых гидробионтов значительно (на 1–2 порядка) ниже допустимых по санитарным нормативам уровней для изотопов цезия и стронция. Отсутствие существенных последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» для биоресурсов российских вод объясняется особенностями дрейфа воды, загрязненной у берегов Фукусимы. Под действием океанических течений дрейф весной–летом 2011 г. имел генеральное направление на восток, минуя пределы ИЭЗ России. Отмечено, что загрязнение тканей рыб радионуклидами определяется текущей радиационной ситуацией («здесь и сейчас»), признаков накопления и переноса загрязнения видами-мигрантами не выявлено.

**Ключевые слова:** АЭС «Фукусима-1», радиационное заражение, цезий-137, цезий-134, дрейф под действием течений, Южно-Курильский район, допустимый уровень радиоактивного загрязнения

### Введение

В результате землетрясения магнитудой 9 единиц, со смещением морского дна на 7–10 м, вызвавшего несколько волн цунами с высотой на побережье до 14–15 м, 11 марта 2011 г., в 14:46 по местному времени, произошла авария на АЭС «Фукуси-

ма-1», с последующим радиоактивным загрязнением атмосферы и природных вод. Эпицентр землетрясения располагался в 180 км от побережья японской префектуры Фукусима. Район аварии находился вблизи дальневосточных границ России, причем загрязнению подверглась акватория северо-западной части Тихого океана – местообитание трансграничных популяций рыб и беспозвоночных, составляющих основу российского рыбного промысла. Поэтому сразу же после сообщения об аварии ТИНРО (тогда ФГУП «Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр») был организован мониторинг радиационного заражения воздуха, морской воды и уловов в учащенном режиме в районах работы всех морских и береговых экспедиций. Кроме того, в марте–апреле и июне–июле 2011 г. в экспедициях ТИНРО, выполнявших траловые съемки у Курильских островов, были собраны пробы тканей промысловых рыб для радиологического исследования, которые позднее были обработаны в береговой лаборатории. В 2012 и 2013 гг. также производился массовый отбор проб гидробионтов на радиоактивное загрязнение, прежде всего, на акватории СЗТО, а в последующие годы, по мере нормализации радиационной обстановки, мониторинг радиоактивного загрязнения среды и морских гидробионтов продолжился в обычном режиме.

Выполненные наблюдения позволили дать оценку безопасности сырья рыбной промышленности, добываемого в северо-западной части Тихого океана, и проследить развитие радиологической ситуации в районах российского рыбного промысла после допущенных в Японии сбросов радиоактивных веществ в океан, а также выявить особенности радиационного заражения разных видов гидробионтов, что и является целью данной работы. Для этого выполнено сравнение активности основных радионуклидов в тканях нескольких промысловых видов рыб и беспозвоночных, выловленных в ближайших к месту аварии районах экономзоны России в разные годы, и эти результаты сопоставлены с нормативами по радиационной безопасности. Помимо анализа данных прямых измерений радиоактивности, проанализированы вероятные пути распространения радиоизотопов от места выброса и возможности их попадания в организм рыб.

#### **Краткая хронология радиоактивного загрязнения океанических вод после аварии на АЭС «Фукусима-1»**

Особенностью радиоактивного загрязнения в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» является временной сдвиг между природной катастрофой, ставшей причиной аварии, то есть землетрясением 11 марта 2011 г. и последовавшими за ним через 40–50 мин. ударами волн-цунами, и собственно загрязнением океанических вод, что необходимо учитывать при анализе распространения загрязнения. АЭС успешно выдержала сильнейшее землетрясение – работа реакторов была немедленно автоматически остановлена (в момент аварии работали 3 из 6 энергоблоков станции), нарушение энергоснабжения в результате разрушения линий электропередачи было компенсировано запуском резервных дизель-генераторов. Однако при затоплении

станции волнами-цунами резервное энергоснабжение также было нарушено. Из-за полного обесточивания станции прекратилось охлаждение реакторов, продолжавших выделять остаточное тепло и после остановки. Таким образом, хотя в момент катастрофического воздействия на станцию радиоактивного загрязнения не случилось, это воздействие спровоцировало серию техногенных катастроф в последующие дни.

Первый выброс радиоактивных веществ в атмосферу произошел около 14 час. 12 марта и был организован персоналом станции с целью снижения давления в системе охлаждения реактора, чтобы избежать взрыва. Однако затем, когда сотрудникам станции все же удалось запустить подачу воды в систему охлаждения реактора 1-го энергоблока, произошел взрыв образовавшегося при этом водорода. 14 и 15 марта по той же причине случилось еще два взрыва водорода в системе охлаждения. Наиболее сильное радиоактивное загрязнение произошло 15 марта, когда при разгерметизации 2-го энергоблока в атмосферу было выброшено большое количество радиоактивных изотопов инертных газов, прежде всего, ксенона, а также изотопов йода, цезия и других. Общее количество радиоактивных выбросов в атмосферу за время событий 12–15 марта оценивается в 20% от аналогичных выбросов при катастрофе на Чернобыльской АЭС, до 80% этих выбросов вскоре поступили в поверхностный слой океана (The Fukushima Dai-ichi Accident, 2015).

Максимальный уровень радиации на границе площадки АЭС был зафиксирован 12 марта: 1015 мкЗв/ч, в дальнейшем он снижался. Загрязнение океанических вод, напротив, не росло существенно вплоть до 25 марта, когда у берега на расстоянии 10–30 км от АЭС «Фукусима-1» максимальная концентрация радиоактивных изотопов йода-131 и цезия-137 поднялась до 77 Бк/л и 24 Бк/л соответственно, что связывается с поступлением в океан загрязненных вод с суши. В открытых водах к востоку от АЭС радиоактивность в начале апреля 2011 г. была в диапазоне 5–18 Бк/л по  $^{131}\text{I}$  и 1–11 Бк/л по  $^{137}\text{Cs}$ .

Второй эпизод сильного радиоактивного загрязнения коснулся, прежде всего, океанических вод и был вызван начатым 4 апреля сбросом в океан скопившихся на станции в ходе аварийных мероприятий низкоактивных жидких радиоактивных отходов. В тот же день вблизи места сброса было зафиксировано увеличение радиоактивности с ~11 кБк/л до 41 кБк/л для  $^{131}\text{I}$  (в 280 тыс. раз выше установленного в Японии предельно допустимого уровня) и с 5.1 кБк/л до 19 кБк/л для  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . На следующий день содержание радиоизотопов в месте сброса снизилось, хотя все же превышало нормы по  $^{131}\text{I}$  в 21 тыс. раз, по  $^{134}\text{Cs}$  в 7 тыс. раз, по  $^{137}\text{Cs}$  – в 4.7 тыс. раз, далее продолжало снижаться. Напротив, на удалении от места сброса радиоактивное загрязнение воды еще некоторое время возрастало: в открытом океане на удалении около 20 миль на восток от АЭС с 1 по 5 апреля наблюдалось увеличение концентрации  $^{131}\text{I}$  с ~12 Бк/л до ~65 Бк/л,  $^{134}\text{Cs}$  с ~15 Бк/л до ~40 Бк/л. После 7 апреля радиоактивность в этом районе стала снижаться, и, начиная с 12 апреля, активность всех радиоизотопов была постоянно ниже 2 Бк/л, несмотря на то, что сбросы и просачивание жидких радиоактивных отходов АЭС «Фукусима-1» в океан продолжались и продолжают по сей день.

Таким образом, хронология событий после аварии на АЭС «Фукусима-1» позволяет выделить два периода значительного радиоактивного загрязнения окружающей среды:

12–15 марта 2011 г. – выбросы радионуклидов в атмосферу с последующим их ветровым переносом, осаждением и попаданием в океан в основном в 3-ей декаде марта;

4–7 апреля 2011 г. – сброс радиоактивных отходов непосредственно в прибрежную зону океана и распространение загрязнения от места сброса.

### Материалы и методы

Мониторинг радиационного заражения с учащенными измерениями радиоактивности воздуха, морской воды, уловов, отбором проб воды и гидробионтов для определения активности радиоизотопов был организован ТИНРО в северо-западной части Тихого океана уже в марте 2011 г. и продолжался почти 3 года. В 2011 г. измерения радиационного фона воздуха, воды (в 10 см от поверхности моря) и уловов выполнялись ежедневно во всех экспедициях ТИНРО с использованием дозиметров-радиометров МКС-01СА1М, МКС-05 «Терра» и дозиметра ДКГ-АТ2503А. За период с марта по декабрь 2011 г. выполнено более 12 000 измерений радиационного фона воздуха, воды и уловов. Первые пробы промысловых рыб для радиологического исследования в береговой лаборатории были собраны 23 марта на НИС «ТИНРО», выполнявшем траловую съемку с тихоокеанской стороны от южных Курильских островов. В дальнейшем пробы разных видов гидробионтов собирали во всех дальневосточных морях и СЗТО, но преимущественно в Южно-Курильском районе, наиболее близком к месту аварии (рис. 1).

Радиоизотопный анализ проб проводили с помощью калиброванного и поверенного комплекса для измерения активности радионуклидов «Прогресс» по бета- и гамма-излучению. В нативных пробах массой не менее 1.0 кг измеряли активность радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$  (маркера аварийных выбросов АЭС). При низких активностях радионуклиды цезия и стронция определяли специальными радиохимическими методами после ступенчатого термического концентрирования пробы. Радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$  выделяли в виде сурьмяноидидной соли по МУК 4.3.2504-09 (2009). Радиохимическое выделение  $^{90}\text{Sr}$  осуществляли по оксалатной методике в соответствии с МУК 4.3.2503-09 (2009) с последующим измерением активности выделенных препаратов на малофоновой установке УМФ-2000. Измерительные приборы калибровали с использованием хлорида калия. Предел обнаружения активности радионуклидов в гидробионтах при применении данных методов и оборудования оценивается в 3 Бк/кг сырой массы.

С целью оценки безопасности исследуемого рыбного сырья, полученные результаты сравнивали с допустимыми уровнями активности радионуклидов, установленными санитарными нормами Российской Федерации для рыбы и рыбной продукции в размере 130 Бк/кг по  $^{137}\text{Cs}$  (СанПиН, 2002) и санитарными нормами

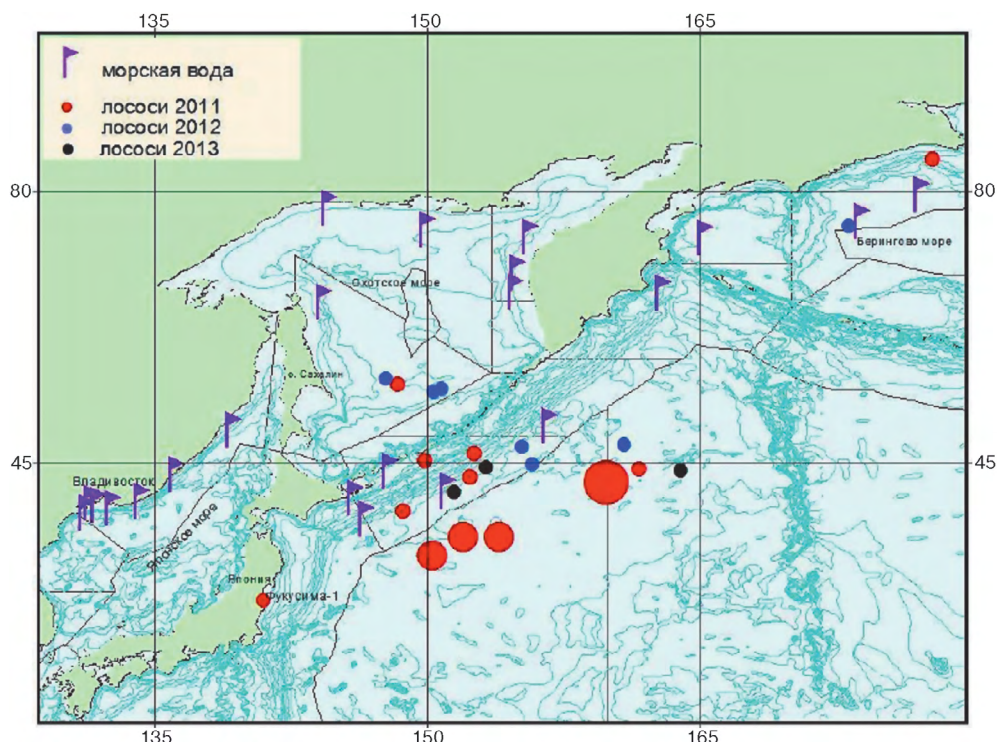


Рис. 1. Места измерений радиоактивности поверхности моря и отбора проб на радиоактивное загрязнение уловов в 2011–2013 гг. Размеры кругов пропорциональны активности  $^{137}\text{Cs}$  в тканях рыб.

Таможенного Союза для морепродуктов (водорослей и беспозвоночных) в размере 200 Бк/кг по  $^{137}\text{Cs}$  и 100 Бк/кг по  $^{90}\text{Sr}$  (Единые санитарно-эпидемиологические..., 2010).

Для определения направления распространения радиоактивного загрязнения после его попадания в океан вблизи АЭС «Фукусима-1» выполнен реанализ циркуляции вод в верхнем 30-метровом слое океана по модели OSCAR (Ocean Surface Current Analysis) с пространственным разрешением  $1/3^\circ$  и временным 5 сут. Модель OSCAR совмещает результаты расчета бароклинных и баротропных течений по данным спутниковых альтиметрических измерений и оценок скорости приводного ветра, а также ассимилирует данные спутниковых наблюдений за перемещениями термических неоднородностей на поверхности моря. Расчеты произведены онлайн на сайте NASA: [https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR\\_L4\\_OC\\_third-deg](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR_L4_OC_third-deg). Для общей характеристики поля течений в СЗТО результаты реанализа осреднены за апрель 2011 г., кроме того, восстановлены треки перемещения ядер загрязнения в поле циркуляции вод в течение 100 дней после старта у побережья Фукусимы в моменты наиболее активного поступления радиоизотопов в прибрежные воды (условно 25 марта и 5 апреля 2011 г.). Для построения треков 5-дневные данные реанализа течений проинтерполированы по времени на каждый день, для каждого дня рассчитано суточное перемещение, а затем посуточные отрезки состыкованы в 100-дневные треки.

### Циркуляция вод СЗТО в апреле 2011 г. и распространение радиоактивного загрязнения вод от АЭС «Фукусима-1»

К востоку от побережья префектуры Фукусима проходит Субарктический фронт Тихого океана, в зоне которого формируется сложная турбулентная циркуляционная система с множеством потоков, меандров, струй и вихрей. Все они неустойчивы, поэтому невозможно при рассмотрении дрейфа в этом районе использовать какую-либо схему течений – следует определять направление и скорость переносов в каждый конкретный момент времени для каждой конкретной точки. Пожалуй, лишь основной для этого района поток – Куроисио – присутствует всегда, перенося вдоль южного побережья о. Хонсю теплые и соленые субтропические воды. У полуострова Босо (примерно 35°с.ш.) этот поток отдалека от побережья и поворачивает на восток. Между 150–155°в.д. продолжение Куроисио раздваивается на главную и северную ветви. Побережье Фукусимы находится севернее потока Куроисио и может омываться либо холодными водами Ойяисио, поступающими сюда от Курильских о-вов, либо более теплыми водами течения Цугару, выходящего из Японского моря через Сангарский пролив. В обоих случаях у берега в районе АЭС наблюдается вдольбереговой перенос на юг, но вдали от побережья преобладают зональные потоки, направленные на восток (рис. 2).

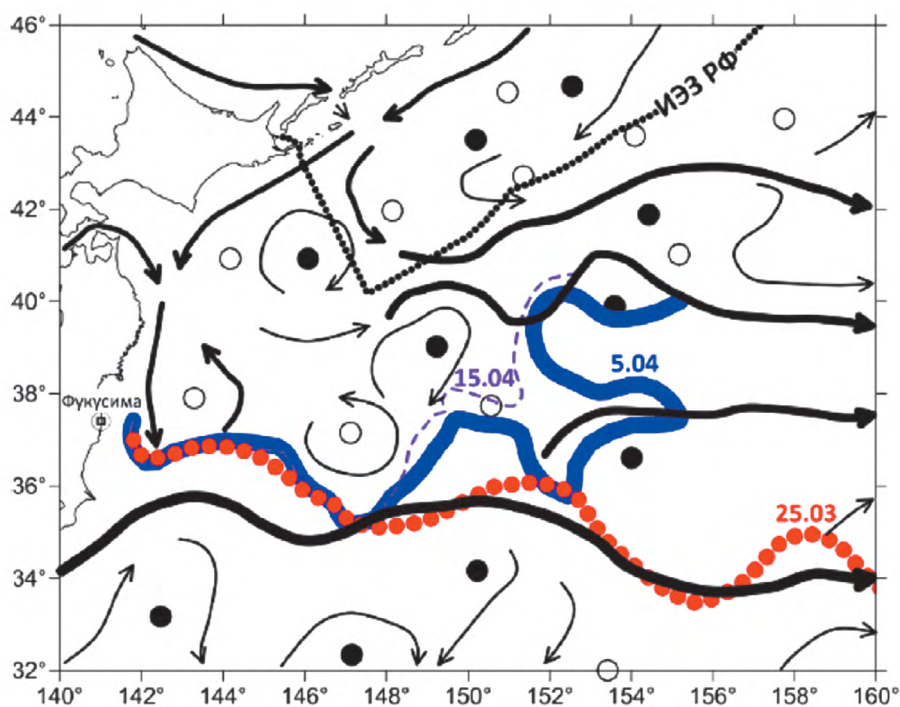


Рис. 2. Осредненная за 2002–2017 гг. схема поверхностной циркуляции вод к востоку от Японии в апреле и расчетные треки дрейфа воды, загрязненной у побережья префектуры Фукусима 25 марта, 5 апреля и 15 апреля 2011 г., в течение 100 суток. Стрелками показаны потоки (толщина стрелки пропорциональна скорости), темными кружками – центры антициклонических круговоротов, светлыми кружками – центры циклонических круговоротов. Треки подписаны датами начала дрейфа.

В апреле 2011 г. циркуляция вод несколько отличалась от среднемноголетней схемы большей завихренностью, которая усиливала меридиональный обмен (рис. 3). Тем не менее, наиболее общие черты циркуляции вод сохранялись: после обоих эпизодов поступления радиоактивного загрязнения в океан ядра загрязнения сначала распространялись со скоростью около 0.2 м/с в южном направлении, а затем, достигнув потока Куроисио, дрейфовали на восток, ускоряясь до 1.0 м/с. Между 147–153° в.д. наблюдается бифуркация треков: в зависимости от конкретных обстоятельств, дрейф загрязнения продолжался либо на восток, как это предполагается для объема, загрязненного 25 марта, либо с меньшей скоростью (0.05–0.15 м/с) на северо-восток и далее на восток, как объем, загрязненный 5 апреля. Тем не менее, в обоих случаях дрейф загрязненных у берегов Фукусимы объемов воды не был направлен в пределы экономической зоны России: на начальном участке, примерно в течение месяца после сбросов, дрейф имел генеральное направление на восток-юго-восток, а затем на восток.

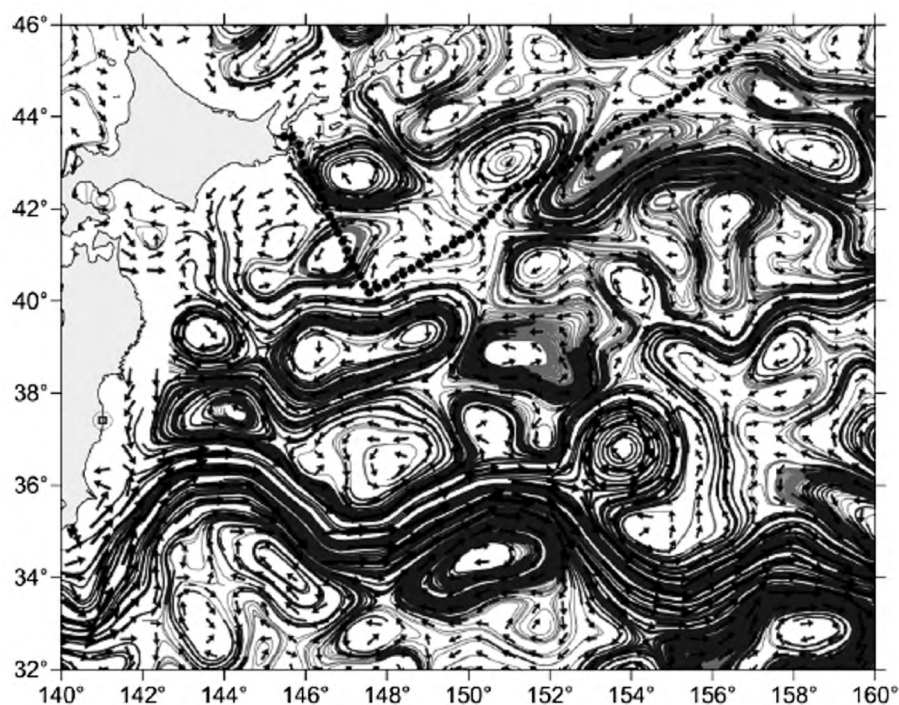


Рис. 3. Среднее за апрель 2011 г. поле течений в поверхностном слое (по данным реанализа OSCAR). Темными линиями выделены потоки со скоростью более 0.1 м/с.

Дрейф ядра радиоактивного загрязнения, образовавшегося в марте–апреле 2011 г. у берегов Фукусимы, с генеральным направлением на восток, вплоть до достижения им берегов Америки, подтверждается многочисленными прямыми наблюдениями радиоактивного загрязнения вод Тихого океана в течение нескольких лет после аварии (см., напр., Аоуама et al., 2016), а также прямым экспериментом с дрейферами, правда, проведенным лишь осенью 2011 г. (Buessler et al., 2012). Интересно, что по мере развития летних процессов, тенденция дрейфа в северном направлении усиливается, как это можно видеть на примере трека со стартом

15 апреля, то есть, если бы авария на АЭС произошла не в конце гидрологической зимы, а летом, то возник бы риск попадания ядра радиоактивного загрязнения непосредственно в пределы экономзоны России.

### **Величины радиоактивного загрязнения промысловых видов рыб, крабов, креветок и морских водорослей**

По данным многочисленных ежедневных измерений радиационного фона воздуха, воды и уловов, начатых в марте 2011 г. и продолжавшихся около трех лет, на всей акватории экономической зоны России, а также в тех районах открытых вод Тихого океана, где работали экспедиции ТИПРО, уровень радиации не превышал предельно-допустимого значения по Нормам радиационной безопасности (2009) в 60 мкР/ч и в основном находился в пределах естественного гамма-фона: 8–13 мкР/ч. Максимальный уровень радиации – 20 мкР/ч – был зарегистрирован 26 и 28 марта 2011 г. в атмосфере в районе к востоку от Курильских островов. Судя по времени и месту обнаружения, это локальное кратковременное повышение могло быть следствием выбросов радиоактивных веществ в атмосферу при взрывах на АЭС «Фукусима-1», произошедших 12–15 марта, однако из-за значительного расстояния, которое преодолел загрязненный воздух, уровень радиоактивности снизился до величин, лишь немногим превышающих фоновый уровень.

Тем не менее, уже в первых пробах на радиоактивное загрязнение, собранных из уловов нагульной молоди горбуши с тихоокеанской стороны Курильских островов 23 марта, то есть всего через 12 дней после аварии, зарегистрирована повышенная радиоактивность: активность  $^{137}\text{Cs}$  составила 8.1 Бк/кг сырой массы, что в несколько раз превышало величины, наблюдавшиеся в этом районе до аварии (в среднем  $1.5 \pm 0.3$  Бк/кг), отмечено также присутствие короткоживущего изотопа  $^{134}\text{Cs}$  – маркера аварийных выбросов АЭС с активностью 6.9 Бк/кг с.м. (см. рис. 1). Эта горбуша мигрировала в северо-западную часть Тихого океана из Охотского моря в октябре–ноябре 2010 г., зимой она нагуливалась в субарктической зоне и не бывала у берегов Японии, следовательно, радиоактивное загрязнение, пусть в небольшом, неопасном количестве, было получено ей непосредственно в районе нагула, куда радионуклиды попали через атмосферу. В пробах из уловов в этом же районе 2 и 7 апреля 2011 г. повышенная активность радиоизотопов цезия сохранялась (табл. 1).

Ко времени следующей траловой съемки в том же районе, выполненной в июне–июле 2011 г., во всех исследованных образцах горбуши и кеты активность  $^{137}\text{Cs}$  не превышала 2.6 Бк/кг, а радионуклид  $^{134}\text{Cs}$  обнаружен не был. В 2012 и 2013 гг. ни у нагульных лососей, ни у лососей, мигрировавших на нерест из Тихого океана в Охотское море, повышенная активность радионуклидов в тканях более не наблюдались (табл. 2), а в июне–июле 2013 г. активность  $^{137}\text{Cs}$  снизилась до 1.8–1.5 Бк/кг, то есть ниже доаварийного уровня. Таким образом, восстановился многолетний тренд на снижение радиоактивности, установившийся после прекращения испытаний ядерного оружия.



Таблица 1. Средняя удельная активность радионуклидов цезия в пробах мышечной ткани лососей, выловленных в северо-западной части Тихого океана в 2011 г.

Объект, размер, см	Дата отбора проб	Координаты станций	Активность $^{137}\text{Cs}$ / $^{134}\text{Cs}$ в мышцах, Бк/кг
Горбуша, 29–30	23.03.2011	43°54'с.ш. 159°55'в.д.	8.1 / 6.9
Горбуша, 24–25	01.04.2011	40°59'с.ш. 153°58'в.д.	2.0 / 1.0
Горбуша, 24–25	02.04.2011	41°00'с.ш. 152°00'в.д.	5.8 / 4.0
Горбуша, 26–27	07.04.2011	40°06'с.ш. 150°17'в.д.	4.9 / 4.1
Горбуша, 30–32	10.06.2011	45°36.5'с.ш. 152°37,7'в.д.	2.6 / 0.0
Горбуша, 30–31	14.06.2011	42°24.9'с.ш. 148°35,0'в.д.	2.6 / 0.0
Кета, 35–36	16.06.2011	44°14.7'с.ш. 152°24,5'в.д.	2.0 / 0.0
Горбуша, 32–33	02.07.2011	44°31'с.ш. 160°50'в.д.	1.9 / 0.0

Таблица 2. Удельная активность радионуклидов цезия в пробах мышечной ткани лососей, выловленных в северо-западной части Тихого океана в 2012–2013 гг.

Объект исследования	Дата отбора проб	Координаты станций	Активность $^{137}\text{Cs}$ в мышцах, Бк/кг
Кета	14.06.2012	44°33'с.ш. 155°13'в.д.	2.0±0.3
Кета	16.06.2012	45°56'с.ш. 155°13'в.д.	2.2±0.3
Горбуша	29.06.2012	46°02'с.ш. 160°51'в.д.	1.9±0.4
Горбуша	11.06.2013	43°28'с.ш. 151°08'в.д.	1.8±0.3
Горбуша	12.06.2013	44°48'с.ш. 153°14'в.д.	1.8±0.3
Кета	06.07.2013	44°39'с.ш. 163°59'в.д.	1.5±0.2

Потенциально более подвержен опасности радиационного заражения после аварии на АЭС «Фукусима-1» мог быть другой важный объект российского промысла в Тихом океане, хотя и не столь массовый, как лососи – тихоокеанская сайра *Cololabis saira*, которая нерестится к востоку от Японии, но ежегодно в летне-осенний период приходит на нагул в субарктические воды к востоку от Курильских островов, где облавливаются отечественным флотом. Пробы сайры (в основном крупной, в возрасте года и более) на радиоактивное заражение в период сайровой путины 2011 г. были взяты непосредственно в районе промысла у южных Курильских островов. Радиохимический анализ проб показал, что удельная активность радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в тканях сайры находилась на низком уровне 1.0–1.5 Бк/кг, что не превышает пределы регионального фоновый уровень для рыб дальневосточного бассейна (1.5–2.5 Бк/кг), а радионуклид  $^{134}\text{Cs}$ , присутствовавший в «свежих» выбросах во время аварии на АЭС «Фукусима-1», вообще зарегистрирован не был. Тем не менее, отмеченный летом 2011 г. уровень радиоактивного загрязнения сайры, незначительно превысил уровни, наблюдавшиеся у этого вида до аварии (например, летом 2010 г. удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в образцах сайры была 0.8–1.2 Бк/кг), что, вероятно, отражало небольшое увеличение радиоактивности среды, вызванное радиоактивными атмосферными осадками. В 2012 г. радиоактивное загрязнение

сайры резко снизилось до 0.5–1.3 Бк/кг по  $^{137}\text{Cs}$ , при этом отмечено, что особенно низкой активностью радиоизотопа отличаются сеголетки длиной 20–23 см (0.55–0.65 Бк/кг по  $^{137}\text{Cs}$ ), а у крупных особей длиной 30–31 см она снизилась не столь заметно (до 1.1–1.3 Бк/кг). Возникло предположение, что такие различия определялись тем, пережили ли особи катастрофу, находясь в непосредственной близости от места аварии, или родились после нее. Однако оно не подтвердилось по материалам наблюдений 2013 г., когда возрастные различия в радиоактивном загрязнении сайры повторились в точности: максимальная удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  вновь была отмечена у старших крупноразмерных особей (в среднем  $1,32 \pm 0,13$  Бк/кг), хотя рыбы всех возрастов родились уже после аварии (табл. 3). При этом удельная активность радиоцезия в каждой размерной группе сайры не зависела от времени и места лова. Как и в предшествующие годы, радиоактивное загрязнение сайры не выходило за пределы регионального фоновое уровня, оставаясь на два порядка ниже уровня, допустимого по санитарным нормам. Таким образом, авария на АЭС «Фукусима-1» не оказала значительного влияния на радиоактивное загрязнение сайры, несмотря на то, что этот вид воспроизводится в наиболее загрязненном аварийными выбросами районе Тихого океана, прилегающем с востока к о. Хонсю. А несколько более высокие величины радиоактивного загрязнения взрослых особей сайры по сравнению с молодью, вероятно, связаны с особенностями ее питания. Например, следует учитывать, что крупная сайра питается более «радиоактивной» пищей, а именно крупным зоопланктоном, прежде всего, эвфаузидами и амфиподами, совершающими активные вертикальные суточные миграции и проводящими большую часть своей жизни в подповерхностном слое океана, где наблюдается максимальная концентрация радионуклидов.

Таблица 3. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в тканях тихоокеанской сайры различных размерных групп в 2013 г, Бк/кг с.м.

Период лова	Длина тела		
	<24 см	24–29 см	>29 см
10–28 сентября	0.61±0.02	1.26±0.12	1.34±0.13
4–10 октября	0.78±0.02	1.03±0.10	1.30±0.13

Перспективным объектом дальневосточного рыбного промысла является сардина-иваси *Sardinops melanosticta*. Во время аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. этот вид имел низкую численность и практически не был доступен отечественному рыболовному флоту, хотя в периоды своей высокой численности становится одним из основных объектов как российского, так и иностранного промыслов. Рост численности сардины-иваси в последние годы способствовал расширению области ее нагула в северо-западной части Тихого океана, что позволило возобновить российский промысел иваси в 2014 г. Эта возможность была использована для мониторинга радиационного заражения этого вида, который нерестится в прибрежных водах Японии и потому потенциально уязвим для ра-

диоактивных сбросов и утечек с аварийной АЭС, продолжающихся по сей день. Пробы были собраны в 2014–2017 гг. на плавбазе «Всеволод Сибирцев», принявшей для переработки уловы сардины из южной части экономзоны России. Измерения показали, что активность радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в тканях сардины-иваси была низкой и в течение периода исследований постепенно снижалась с 0.68 до 0.44 Бк/кг, активность  $^{90}\text{Sr}$  не превышала 0.15 Бк/кг (табл. 4). Эти величины значительно ниже допустимых уровней радиоактивного загрязнения по цезию и стронцию, определенных санитарными нормами, т. е. сырье сардины полностью соответствует требованиям радиационной безопасности.

Таблица 4. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в тканях сардины-иваси, выловленной в Южно-Курильском промысловом районе, Бк/кг сырой массы

Год	2014	2015	2016	2017
Активность $^{137}\text{Cs}$	0.68±0.05	0.78±0.08	0.63±0.02	0.44±0.02

Среди донных гидробионтов наибольший интерес представляет радиоактивное загрязнение тканей ракообразных, поскольку они отличаются большой продолжительностью жизни, что может способствовать накоплению радионуклидов в тканях. Промысел крабов и креветок ведется, в основном, на шельфах дальневосточных морей, наиболее близким к району аварии на АЭС «Фукусима-1» является шельф Приморья (Японское море). Активность радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в съедобных тканях крабов *Chionoecetes opilio* и *Paralithodes camtchaticus* и креветок *Pandalus borealis*, *Pandalus hypsinotus* и *Sclerocrangon salebro*, выловленных в этом районе в 2014–2015 гг., не превышала 2.6 Бк/кг и 0.6 Бк/кг сырой массы соответственно, что значительно (на 2 порядка) ниже допустимых уровней для морепродуктов (морских беспозвоночных и водорослей), предусмотренных санитарными нормами Российской Федерации и требованиями Таможенного союза. Радиоактивное загрязнение бурой водоросли ламинарии *Saccharina japonica* («морской капусты»), произрастающей в этом же районе, оказалось еще ниже: 0.6–0.9 Бк/кг по  $^{137}\text{Cs}$ , 0.1–0.2 Бк/кг по  $^{90}\text{Sr}$  в 2011–2012 гг., радионуклид  $^{134}\text{Cs}$  зарегистрирован не был.

### Обсуждение

Данные о радиоактивном загрязнении тканей гидробионтов, выловленных в российских водах, собиравшиеся в течение многих лет, прошедших после аварии на АЭС «Фукусима-1», обобщены впервые. Полученные результаты можно интерпретировать на двух уровнях. Во-первых, они убедительно показывают отсутствие сколько-либо существенных последствий аварии и связанных с ней радиоактивных выбросов в атмосферу и океан для российских рыбных промыслов, в то время как в японских водах у побережья Фукусимы отмечено опасное загрязнение рыбы и морепродуктов радионуклидами, хотя и менее значительное, чем загрязнение пресноводных рыб (Takeda et al., 2017; Wada et al., 2019). Аналогичный результат – отсутствие опасного радиоак-

тивного загрязнения рыбных ресурсов – получен и в другой соседствующей с Японией стране – Южной Корее (Kim et al., 2019). Очевидной причиной такого положения является преимущественно восточное направление распространения ядра загрязнения вод океана радионуклидами, в стороне от российских вод, чему способствовали как общие особенности циркуляции вод северо-западной части Тихого океана, так и то, что авария случилась в конце гидрологической зимы, когда адвекция субтропических вод на север еще не началась. Во-вторых, случаи наибольшего превышения радиоактивного загрязнения тканей морских гидробионтов относительно доаварийных значений отмечены в первые дни после их аварийных выбросов радионуклидов в атмосферу на АЭС, когда ни загрязненная вода, ни морские рыбы, получившие радиоактивное заражение у берегов Японии, физически не могли достигнуть пределов ИЭЗ России. Этот факт указывает на то, что основным каналом проникновения радиоактивности в районы российского промысла были атмосферные переносы. Какие-либо свидетельства в пользу переноса загрязнения с морскими течениями и, что особенно интересно, с рыбой, мигрирующей из зоны Японии на нагул к Курильским островам, не были выявлены и в дальнейшем. Напротив, наибольшее радиоактивное загрязнение обнаружено не у южных мигрантов, которых просто не было в пределах экономзоны России и прилегающих открытых водах в первые месяцы после аварии, а у лососей, чьи миграционные пути не проходили у берегов Японии. Когда же виды-мигранты (сайра, а позднее сардина-иваси), нерестившиеся в загрязненных районах, прибыли на нагул в российские воды, они не отличались по уровню радиационного заражения от местных видов. Получается, что степень радиоактивного загрязнения морских гидробионтов, в основном, определяется текущей радиационной ситуацией в среде их обитания, «здесь и сейчас», с небольшими межвидовыми и внутривидовыми вариациями.

Заметим, что тот же вывод, что радиоактивное загрязнение гидробионтов определяется текущей радиоактивностью среды их обитания, сделан японскими и корейскими исследователями, в том числе для рыб с опасным уровнем заражения (Tateda et al., 2017; Kim et al., 2019). В этой связи сообщение о том, что тунцы, мигрирующие из западной части Тихого океана к берегам Калифорнии, транспортируют радиоактивное загрязнение через весь океан, появившееся в научной литературе сразу же после аварии на АЭС «Фукусима-1» (Madigan et al., 2012), представляется сомнительным. Небольшой рост радиоактивности, отмеченный у тунцов-мигрантов, выловленных близ Сан-Диего в августе 2011 г. (до уровней активности  $^{134}\text{Cs}$   $4,0 \pm 1,4$  Бк/кг и  $^{137}\text{Cs}$   $6,3 \pm 1,5$  Бк/кг, близких к нашим результатам), вполне мог быть следствием повышения радиоактивности среды непосредственно в районе отбора проб в результате атмосферного переноса загрязнения, как это было отмечено в наших сборах в прикурильских водах в 2011 г. Для того, чтобы вывод о транспорте рыбами-мигрантами радиоактивного загрязнения выглядел обоснованным, следовало бы сравнить эти результаты с аналогичными измерениями для местных видов, чего американскими исследователями сделано не было. Нами же такое сравнение было проведено и показало, что радиоактивность видов-мигрантов, прибывших из японских вод, не отличалась существенно от радиоактивности видов, весь жизненный цикл которых проходит вдали от берегов Японии.

## Выводы

Авария на АЭС «Фукусима-1» в марте 2011 г., сопровождавшаяся выбросами радионуклидов в атмосферу и непосредственно в океан, не вызвала опасного радиационного заражения морских гидробионтов в районах российских рыбных промыслов. В течение всего периода после аварии активность радиоизотопов цезия и стронция во всех проанализированных образцах была значительно (на 1–2 порядка) ниже установленных в России допустимых уровней радиоактивности рыбы и морепродуктов.

Причиной отсутствия существенного радиоактивного загрязнения в пределах экономзоны России и в прилегающих к ней открытых водах северо-западной части Тихого океана является преимущественно восточное направление распространения образовавшегося после аварии на АЭС ядра загрязнения вод океана радионуклидами, вдалеке от берегов России.

Все выявленные в 2011 г. случаи повышения радиоактивного загрязнения тканей морских гидробионтов относительно доаварийных значений ( $^{137}\text{Cs}$  до 8.1 Бк/кг,  $^{134}\text{Cs}$  до 6.9 Бк/кг) локализованы в районе к востоку от Курильских о-вов, причем максимальный рост радиоактивности наблюдался после аварийных выбросов радионуклидов в атмосферу, то есть именно атмосферные переносы стали каналом проникновения радиоактивности в российские воды, а не переносы загрязнения с морскими течениями или с рыбами-мигрантами.

В прикурильских водах уже в 2012 г. уровень радиоактивного загрязнения промысловых гидробионтов снизился до доаварийных величин, а в 2013 г. возобновилась тенденция снижения радиоактивности, наблюдаемая после прекращения испытаний ядерного оружия. В других промысловых районах тенденция к снижению радиоактивности не прекращалась.

## Литература

- Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому контролю // Решение комиссии Таможенного союза. 2010. 28 мая. № 299.
- МУК 4.3.2503-09 Стронций-90. Определение удельной активности в пищевых продуктах (методические указания). М.: Федеральный медицинский биофизический центр, 2009.
- МУК 4.3.2504-09 Цезий-137. Определение удельной активности в пищевых продуктах (методические указания). М.: Федеральный медицинский биофизический центр, 2009.
- Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
- СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: ИнтерСЭН, 2002. С. 50–58.
- Aoyama M., Hamajima Y., Hult M., Uematsu M., Oka E., Tsumune D., Kamamoto Y.  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi

- nuclear power plant accident, Japan. Part 1: Surface pathway and vertical distribution // *J. Oceanogr.* 2016. Vol. 72. P. 53–65. DOI: 10.1007/s10872-015-0335-z.
- Buesseler K.O., Jayne S.R., Fisher N.S., Rypina I.I., Baumann H., Baumann Z., Breier C.F., Douglass E.M., George J., McDonald A.M., Miyamoto H., Nishikawa J., Pike S.M., Yoshida S.* Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan // *Proc. National Ac. Sci. USA.* 2012. Vol. 109. No. 16. P. 5984–5988.
- Kim S.-H., Lee H.-M., Lee S.-H., Kim I.-T.* Distribution and accumulation of artificial radionuclides in marine products around Korean Peninsula // *Mar. Pollut. Bull.* 2020. Vol. 146. P. 521–531.
- Madigan D.J., Baumann Z., Fisher N.S.* Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California // *Proc. National Ac. Sci. USA.* 2012. Vol. 109. No. 24. P. 9483–9486.
- Tateda Y., Tsumune D., Misumi K., Aono T., Kanda J., Ishimaru T.* Biokinetics of radiocesium depuration in marine fish inhabiting the vicinity of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant // *J. Environm. Radioact.* 2017. Vol. 166. Part 1. P. 67–73.
- The Fukushima Dai-ichi Accident. Part 4. Radiological Consequences: Vienna: International Atomic Energy Agency. 2015. 262 p.
- Wada T., Konoplev A., Wakiyama Y., Watanabe K., Furuta Y., Morishita D., Kawata G., Nanba K.* Strong contrast of cesium radioactivity between marine and freshwater fish in Fukushima // *J. Environm. Radioact.* 2019. Vol. 204. P. 132–142.

## RESULTS OF MONITORING ON RADIOACTIVE POLLUTION OF COMMERCIAL MARINE ORGANISMS IN THE NORTH-WEST PACIFIC AFTER THE ACCIDENT AT FUKUSHIMA DAI-ICHI NUCLEAR POWER STATION IN 2011

**Borisenko G.S., Zuenko Yu.I., Basyuk E.O.**

*Pacific branch of Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography,  
4, Shevchenko per., Vladivostok, 690091, Russia,  
e-mail: [zuenko\\_yury@hotmail.com](mailto:zuenko_yury@hotmail.com)  
Submitted 16.07.2020, accepted 20.10.2020.*

Results of several years monitoring on radioactive pollution of fisheries objects in the Russian EEZ and adjacent North-West Pacific (fish, crabs, shrimps, marine algae) after the accident at Fukushima Dai-ichi nuclear power plant in 2011 are generalized. Two catastrophic releases of radioactive isotopes to atmosphere and directly to the ocean happened at Fukushima in late March and early April, 2011. However, not a single case of dangerous pollution of fish or seafoods caught by Russian fishermen was detected. The highest activity of radioisotopes ( $^{137}\text{Cs}$  up to 8.1 Bq/kg,  $^{134}\text{Cs}$  to 6.9 Bq/kg ww) was found for fish (pink salmon juveniles) caught off Kuril Islands in several days after the strongest release of radionuclides into the atmosphere. Soon, in summer 2011, the level of radioactive pollution in this area came close to the regional background level, the pre-accident level was restored in 2012, and the tendency to decreasing of radioactive pollution (that was observed after the nuclear tests termination) was restored in 2013. The observed radioactive contamination of fish, invertebrates and algae tissues is considerably (in 1–2 orders) below the sanitary permissible levels for isotopes of Cs and Sr. Lack of significant consequences of the Fukushima Dai-ichi accident for bioresources of Russian waters is explained by spatial patterns of the water drift from Fukushima coast driven by oceanic currents in spring-summer of 2011 that was directed generally eastward, far from the Russian coasts. There is noted that radioactive contamination of fish tissues is determined by current radiation situation (here and now), no signs of accumulation and transfer of pollution by migratory species are found.

**Keywords:** Fukushima Dai-ichi, radioactive pollution,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ , drift in current, South-Kuril fishery district, maximum permissible level of radioactive pollution

### References

- Aoyama, M., Y. Hamajima, M. Hult, M. Uematsu, E. Oka, D. Tsumune, and Y. Kamamoto.  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, Japan. Part 1: Surface pathway and vertical distribution. *J. Oceanogr.*, 2016, Vol. 72, pp. 53–65, doi: 10.1007/s10872-015-0335-z.
- Buesseler, K.O., S.R. Jayne, N.S. Fisher, I.I. Rypina, H. Baumann, Z. Baumann, C.F. Breier, E.M. Douglass, J. George, A.M. McDonald, H. Miyamoto, J. Nishikawa, S.M. Pike, and S. Yoshida. Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. *Proc. National Ac. Sci.*, USA, 2012, Vol. 109, No. 16, pp. 5984–5988.
- MUK 4.3.2503-09 Strontsiy-90. Opredelenie udelnoy radioaktivnosti v pishchevykh produktah (Strontium-90. Measuring of specific radioactivity in food products). Moscow: Federal Medical Biophysics Center, 2009.
- MUK 4.3.2504-09 Ceziy-137. Opredelenie udelnoy radioaktivnosti v pishchevykh produktah (Cesium-137. Measuring of specific radioactivity in food products). Moscow: Federal Medical Biophysics Center, 2009.
- Normy radiatsionnoy bezopasnosti (Radiation safety standards). Sanitary and epidemiological rules and regulations. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009, 100 p.
- SanPiN 2.3.2.1078-01. Gigiyenicheskiye trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov (Hygienic requirements for food safety and nutritional value). Sanitary and epidemiological rules and regulations. Moscow: InterSEN, 2002, pp. 50–58.
- Kim, S.-H., H.-M. Lee, S.-H. Lee, and I.-T. Kim. Distribution and accumulation of artificial radionuclides in marine products around Korean Peninsula. *Mar. Pollut. Bull.*, 2020, Vol. 146, pp. 521–531.
- Madigan, D.J., Z. Baumann, and N.S. Fisher. Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California. *Proc. National Ac. Sci.* USA, 2012, Vol. 109, No. 24, pp. 9483–9486.
- Tateda, Y., D. Tsumune, K. Misumi, T. Aono, J. Kanda, and T. Ishimaru. Biokinetics of radiocesium depuration in marine fish inhabiting the vicinity of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant. *J. Environm. Radioact.*, 2017, Vol. 166, Part 1, pp. 67–73.
- The Fukushima Daiichi Accident. Part 4. Radiological Consequences, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015, 262 p.
- Wada, T., A. Konoplev, Y. Wakiyama, K. Watanabe, Y. Furuta, D. Morishita, G. Kawata, and K. Nanba. Strong contrast of cesium radioactivity between marine and freshwater fish in Fukushima. *J. Environm. Radioact.*, 2019, Vol. 204, pp. 132–142.
- Yedinyye sanitarno-epidemiologicheskkiye i gigiyenicheskiye trebovaniya k tovaram, podlezhashchim sanitarno-epidemiologicheskomu kontrolyu (Common sanitary-epidemiological and hygienic requirements for goods subjected to sanitary and epidemiological control). Decision of the Customs Union Commission, 2010, May 28, No. 299.