

Исследование радиоактивного загрязнения морской биоты в связи с аварией на АЭС «Фукусима-1»

В.П. Рамзаев¹, С.А. Иванов¹, Ю.Н. Гончарова¹, Н.М. Вишнякова¹, А.В. Севастьянов²

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Санкт-Петербург

² Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Владивосток

*Изучено содержание радионуклидов ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs в 44 пробах морских организмов, представленных четырьмя видами водорослей (11 проб), четырьмя видами беспозвоночных животных (8 проб) и десятью видами рыб (25 проб). Образцы морских организмов были отобраны в водах Японского и Охотского морей и северо-западной части Тихого океана в 2011–2012 гг. в рамках программы комплексных исследований по изучению последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» для дальневосточных регионов Российской Федерации. Во всех проанализированных пробах удельная активность радионуклидов цезия (по сумме двух изотопов) не превышала 1 Бк/кг (на сырой вес). Присутствие ¹³⁴Cs – маркера «фукусимских» выбросов и сбросов – было достоверно обнаружено в трех пробах тихоокеанской сайры (*Cololabis saira*), выловленной у Южных Курил в 2011 и 2012 гг. Проведенное исследование показывает, что авария на АЭС «Фукусима-1» не оказывает заметного воздействия на радиационную обстановку в Японском море и Курило-Камчатском районе Тихого океана.*

Ключевые слова: авария, АЭС «Фукусима-1», Тихий океан, Дальний Восток, биота, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs.

Введение

11 марта 2011 г. в Тихом океане у восточного побережья японского острова Хонсю произошло 9-балльное землетрясение, вызвавшее цунами с высотой волны более 13 м. В результате воздействия этих природных факторов и других причин на японской атомной станции «Фукусима-1» сложилась аварийная ситуация, переросшая в полномасштабную радиационную аварию. Были затронуты четыре энергоблока из шести – произошли взрывы на трех ядерных реакторах и пожар в хранилище отработавшего ядерного топлива 4-го энергоблока. Этой аварии был присвоен самый высокий – седьмой уровень по шкале INES [1, 2].

Во время аварии на АЭС «Фукусима-1» прибрежные воды в районе станции вдоль восточного побережья острова Хонсю подверглись беспрецедентному радиоактивному загрязнению. Распространение радионуклидов от аварийной станции и поступление их в воды Тихого океана происходило как воздушным путем, так и в результате контролируемого и неконтролируемого сброса в океан воды, использованной для охлаждения аварийных реакторов. По разным оценкам [3–5], непосредственно в океан с водой было сброшено от $1 \cdot 10^{15}$ Бк до $41 \cdot 10^{15}$ Бк ¹³⁷Cs и столько же ¹³⁴Cs. По предварительным оценкам, непосредственно в атмосферу было выброшено около $18 \cdot 10^{15}$ Бк ¹³⁴Cs и $15 \cdot 10^{15}$ Бк ¹³⁷Cs [2]; значительная часть этого выброса выпала на поверхность северной части Тихого океана.

В связи с поступлением в Тихий океан долгоживущих радионуклидов цезия возникла необходимость проведения широкомасштабного радиационного мониторинга морской воды и морепродуктов как у берегов Японии, так и у дальневосточного побережья Российской Федерации [6, 7].

С самого начала аварии на АЭС «Фукусима-1» специалисты НИИ радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева (НИИРГ) совместно с другими учреждениями Роспотребнадзора приступили к мониторингу ситуации с целью изучения радиационной обстановки и обеспечения радиационной безопасности населения дальневосточных регионов Российской Федерации. Часть исследований проводилась в тесном сотрудничестве с организациями и учреждениями других российских ведомств, таких как Росгидромет, МЧС, Минатом, Рослесхоз. С марта 2011 г. по октябрь 2012 г. в эти регионы были организованы две морские экспедиции и четыре сухопутные. Одной из целей этих экспедиций был сбор и последующий лабораторный анализ проб гидробионтов – рыб, беспозвоночных животных и водорослей, используемых в пищу человеком. Предварительные данные по итогам экспедиций 2011 г. приведены в работах [2, 8, 9]. В настоящей статье, во-первых, представлены новые результаты исследований проб гидробионтов, отобранных в августе – сентябре 2012 г. Во-вторых, результаты исследований 2012 г. дополнены соответствующими данными, полученными в лабораториях НИИРГ в 2011 г. В процессе работы с архивными материалами были уточнены значения минимально детектируемой активности и погрешности определения активности в пробах. При проведении этих работ нас в первую очередь интересовали радиоактивные изотопы цезия, ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs, так как именно эти радионуклиды определяют потенциальную опасность, которую представляют собой выбросы и сбросы с аварийной АЭС в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

Материалы и методы

Работы по отбору проб гидробионтов были проведены как в прибрежной и открытой области северо-западной части Тихого океана, так и в акватории Японского

и Охотского морей вблизи российского побережья. Географические координаты и даты пробоотбора приведены в таблицах 1–3.

Вылов морских гидробионтов осуществлялся с судов, которые использовались для проведения морских экспедиций. В 2011 г. это было научно-исследовательское судно «Павел Гордиенко», а в 2012 г. – пассажирское судно «Академик Шокальский». Суда принадлежат ФБГУ «Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт» Росгидромета. Морские экспедиции проводились по решению Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» (РГО) и Росгидромета России о проведении исследований с целью оценки радиационной обстановки в Японском море и Курило-Камчатском районе Тихого океана в связи с аварией на АЭС «Фукусима-1» и определения потенциальной опасности для дальневосточных территорий Российской Федерации [9, 10].

Основная часть проб рыбы была добыта недалеко от берега при глубине моря не более 100 м с использованием любительских снастей (леска–крючок). Улов состоял из видов, заглатывающих приманку у дна, таких как треска, минтай, бычок, камбала, палтус, терпуг, навага. У поверхности воды и на глубинах до 20 м от поверхности ловились корифена и кальмар. Пробы водорослей отбирали во время высадки с судов на берег для обследования прибрежной территории Курильских островов и полуострова Камчатка.

Часть проб гидробионтов была проанализирована специалистами НИИ радиационной гигиены в рамках мониторинговых исследований, организованных и проведенных Роспотребнадзором в Сахалинской и Магаданской областях, а также в Камчатском, Приморском и Хабаровском краях в 2011 и 2012 гг.

Масса пробы, доставленной в лабораторию и использованной для анализа, колебалась от 0,3 до 1,7 кг, составляя в среднем около 1 кг.

Определение удельной активности радионуклидов цезия (раздельно ^{134}Cs и ^{137}Cs) проводилось, в основном, методом гамма-спектрометрии с использованием полупроводниковых детекторов (ППД) и многоканальных анализаторов фирмы ORTEC (США). Процесс калибровки гамма-спектрометров подробно описан в работах [9, 11]. Следует отметить, что этот этап подготовки лаборатории к измерениям «фукусимских» проб потребовал дополнительных усилий, связанных с определением поправок на каскадное суммирование гамма-квантов от ^{134}Cs . Эта задача была решена с использованием объемных мер активности и точечных источников ^{134}Cs и ^{137}Cs , а также программы Nuclide Master Plus [12]. Кроме того, в 2011 г. после выполнения измерений первого десятка проб гидробионтов в нативном состоянии стало понятно, что потребуется проводить дополнительное концентрирование – удельная активность радиоактивного цезия в пробах была ниже, чем 1 Бк/кг. Поэтому для концентрирования радионуклидов применяли озолнение при температуре менее 450°C. После озолнения пробу помещали в пластиковый или металлический контейнер и направляли на измерение содержания гамма-излучающих радионуклидов на ППД-гамма-спектрометре.

В 2011 г., наряду с применением полупроводниковой гамма-спектрометрии, количественную оценку содержания радиоактивного цезия в пробах проводили с использованием радиохимического метода [13]. После выделения цезия с осадком последний переносили на алюминиевую подложку диаметром 1,5 см и высушивали. Величину активности измеряли на малофоновом бета-альфа-радиометре УМФ-2000. Недостатком этого метода является измерение суммарной активности радионуклидов цезия без возможности учета вклада каждого из изотопов (в данном случае ^{134}Cs и ^{137}Cs). С целью изучения соотношения ^{134}Cs и ^{137}Cs в таких пробах некоторые подложки с осадком, полученным в результате радиохимического выделения, направляли для гамма-спектрометрических измерений.

Результаты и обсуждение

В таблицах 1–3 представлена удельная активность радионуклидов цезия в пробах гидробионтов, отобранных в рамках сухопутных экспедиций (май и сентябрь – октябрь 2011 г.) и морских экспедиций (апрель – май 2011 г. и август – сентябрь 2012 г.). Пробы разбиты на три группы: водоросли (табл. 1), беспозвоночные животные (табл. 2) и рыбы (табл. 3). Данные расположены в хронологическом порядке, соответственно времени отбора проб.

Как видно из таблицы 1 (а также таблиц 2 и 3), во многих пробах содержание радионуклидов цезия оказалось ниже предела детектирования (ПД), величина которого для полупроводникового детектора колебалась от 0,07 Бк/кг до 0,7 Бк/кг. Достаточно широкий разброс значений ПД зависел в основном от: а) исходной массы пробы (от 0,3 кг до 1,7 кг); б) конечного объема счетного образца золы (от 20 см³ до 250 см³); в) продолжительности экспозиции (от 3 часов до двух суток). Для массы пробы около 1 кг и суточной продолжительности набора спектра можно было выйти на величину ПД, равную 0,1 Бк/кг или даже несколько меньше. Однако и при очень длительных экспозициях (сутки и более) не всегда удавалось обнаружить пики характерных гамма-линий в полученных спектрах.

В определенной мере на форму гамма-спектра (и величину ПД для ^{134}Cs и ^{137}Cs) влияло присутствие ^{40}K и других природных гамма-излучателей в озолненных пробах. Это влияние полностью исчезало после проведения радиохимического выделения цезия и осаждения преципитата на небольшую алюминиевую подложку. Кроме того, в данном случае геометрия счетного образца достаточно хорошо соответствовала геометрии точечного источника. Это позволяло провести измерение активности счетного образца при максимально возможной эффективности регистрации гамма-излучения от такого источника, поместив его на расстоянии 2–3 мм от крышки детектора. Величина ПД при этом была ниже 0,1 Бк/кг (суточная экспозиция). Тем не менее, использование весьма трудоемкого и затратного радиохимического метода концентрирования при проведении гамма-спектрометрических исследований следует рекомендовать в основном для тех случаев, когда предполагается проводить параллельное выщелачивание других радионуклидов (в частности, ^{90}Sr) из проб.

Таблица 1

Удельная активность радионуклидов цезия в пробах морских водорослей, отобранных в рамках сухопутных экспедиций (май, сентябрь и октябрь 2011 г.) и морских экспедиций (апрель – май 2011 г. и август – сентябрь 2012 г.)

Дата	Место	Координаты	Наименование пробы		Удельная активность, Бк/кг		
			Русское	Латинское	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs+ ¹³⁴ Cs
07.05.2011	Тихий океан, п-ов Камчатка, бухта Русская	52.40° N 158.43° E	Морская капуста*	<i>Laminaria</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,21±0,10**
20.05.2011	Тихий океан, о. Кунашир, Отрада	44.07° N, 145.87° E	Морская капуста*	<i>Laminaria</i>	А.н.п.	А.н.п.	2,4±0,5**
20.05.2011	Тихий океан, о. Кунашир, Южно-Курильск	44.03° N, 145.83° E	Морская капуста*	<i>Laminaria</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,67±0,21**
20.05.2011	Тихий океан, о. Кунашир, Южно-Курильск	44.03° N, 145.83° E	Морская капуста*	<i>Laminaria</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,70±0,22**
20.05.2011	Тихий океан, о. Кунашир, Южно-Курильск	44.03° N, 145.83° E	Морской виноград*	<i>Sargassum</i>	А.н.п.	А.н.п.	1,4±0,3**
27.09.2011	Тихий океан, о. Кунашир, Отрада	44.07° N, 145.87° E	Морская капуста*	<i>Laminaria</i>	0,36±0,08	<0,05	<0,49
28.09.2011	Тихий океан, о. Кунашир, н.п. Головнино	43.73° N, 145.54° E	Анфельция (красная водоросль)*	<i>Ahnfeltia</i>	8,27±0,94	7,30±0,85	15,6± 1,8
29.08.2012	Тихий океан, о. Уруп	45.60° N 149.58° E	Морская капуста	<i>Laminaria</i>	<0,08	<0,07	<0,15
03.09.2012	Тихий океан, о. Парамушир	50.73° N 155.30° E	Морская капуста	<i>Laminaria</i>	<0,10	<0,10	<0,20
03.09.2012	Тихий океан, о. Парамушир	50.73° N 155.30° E	Морская капуста	<i>Laminaria</i>	<0,10	<0,09	<0,19
01.09.2012	Тихий океан, п-ов Камчатка, Бухта Русская	52.40° N 158.43° E	Морская трава	<i>Zostera marina</i>	<0,15	<0,15	<0,30

* – активность для этой пробы дана на сухой вес; для перехода к влажному весу рекомендован понижающий коэффициент, равный 5 [22];

** – активность определена с использованием радиохимического метода и бета-радиометрии;

А.н.п. – анализ не проводился;

данные за 2011 г. приведены в [2, 8, 9].

$p \leq 0,95$.

Таблица 2

Удельная активность радионуклидов цезия в пробах морских беспозвоночных животных, отобранных в рамках сухопутных экспедиций (май, сентябрь и октябрь 2011 г.) и морских экспедиций (апрель – май 2011 г. и август – сентябрь 2012 г.)

Дата	Место	Координаты	Наименование пробы		Удельная активность, Бк/кг		
			Русское	Латинское	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs+ ¹³⁴ Cs
20.05.2011	Тихий океан, о. Кунашир, Южно-Курильск	44.03° N, 145.83° E	Спизула (моллюск)*	<i>Spisula sachalinensis</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,13±0,06**
03.10.2011	Тихий океан, о. Кунашир, Южно-Курильск	44.03° N, 145.83° E	Морской гребешок (моллюск)	<i>Pectinidae</i>	<0,32	<0,32	<0,64
15.05.2012	Тихий океан, о. Кунашир, Южно-Курильск	44.03° N, 145.83° E	Кукумария (моллюск)*	<i>Cucumaria japonica</i>	<0,68	<0,70	<1,38
19.08.2012	Тихий океан, станция РГО 2/2	41.50° N 136.35° E	Кальмар (головонгий моллюск)	<i>Cephalopoda</i>	<0,10	<0,10	<0,20
22.08.2012	Тихий океан, станция РГО 2/5	37.00° N 146.33° E	Кальмар (головонгий моллюск)	<i>Cephalopoda</i>	<0,36	<0,35	<0,71
25.08.2012	Тихий океан, станция РГО 2/10	39.00° N 136.41° E	Кальмар (головонгий моллюск)	<i>Cephalopoda</i>	<0,07	<0,07	<0,14
27.08.2012	Тихий океан, станция РГО 2/11д	39.33° N 146.33° E	Кальмар (головонгий моллюск)	<i>Cephalopoda</i>	0,12±0,07	<0,08	<0,27
08.09.2012	Японское море, станция РГО 2/19	43.37° N 135.17° E	Кальмар (головонгий моллюск)	<i>Cephalopoda</i>	<0,11	<0,11	<0,22

* – активность для этой пробы дана на сухой вес; для перехода к влажному весу рекомендован понижающий коэффициент, равный 5 [22];

** – активность определена с использованием радиохимического метода и бета-радиометрии;

А.н.п. – анализ не проводился;

данные за 2011 г. приведены в [2, 8, 9].

$p \leq 0,95$.

Таблица 3

Удельная активность радионуклидов цезия в пробах морских рыб, отобранных в рамках сухопутных экспедиций (май, сентябрь и октябрь 2011 г.) и морских экспедиций (апрель – май 2011 г. и август – сентябрь 2012 г.)

Дата	Место	Координаты	Наименование пробы		Удельная активность, Бк/кг		
			Русское	Латинское	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs+ ¹³⁴ Cs
02.05.11	Охотское море, около о. Уруп	46.13° N, 150.15° E	Терпуг	<i>Pleurogrammus azonus</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,28±0,11**
02.05.11	Охотское море, около о. Уруп	46.13° N, 150.15° E	Бычок	<i>Cottidae</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,15±0,08**
02.05.11	Охотское море, около о. Уруп	46.13° N, 150.15° E	Минтай	<i>Theragra chalcogramma</i>	А.н.п.	А.н.п.	< 0,1**
02.05.11	Охотское море, около о. Уруп	46.13° N, 150.15° E	Палтус	<i>Atheresthes evermanni</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,56±0,20**
07.05.11	Тихий океан, около п-ва Камчатка	52.4° N, 158.6° E	Палтус	<i>Atheresthes evermanni</i>	А.н.п.	А.н.п.	< 0,1**
07.05.11	Тихий океан, около о. Шикотан	43.24° N, 146.33° E	Бычок	<i>Cottidae</i>	А.н.п.	А.н.п.	< 0,1**
19.05.11	Японское море, Уссурийский залив	42.9° N, 131.8° E	Минтай	<i>Theragra chalcogramma</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,27±0,10**
20.05.2011	Тихий океан, около о. Кунашир,	43.73° N, 145.54° E	Камбала	<i>Pleuronectidae</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,54±0,16**
20.05.2011	Тихий океан, около о. Кунашир,	44.03° N, 145.83° E	Навага	<i>Eleginus gracilis</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,21±0,09**
21.05.2011	Тихий океан, около о. Шикотан	43,8° N, 146,8° E*	Камбала	<i>Pleuronectidae</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,40±0,18**
21.05.2011	Тихий океан, около о. Шикотан	43,8° N, 146,8° E*	Минтай	<i>Theragra chalcogramma</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,22±0,09**
21.05.2011	Тихий океан, около о. Шикотан	43,8° N, 146,8° E*	Треска	<i>Gadus macrocephalus</i>	А.н.п.	А.н.п.	0,30±0,10**
Сентябрь, 2011	Тихий океан, около о. Шикотан	43,8° N, 146,8° E*	Сайра	<i>Cololabis saira</i>	0,28±0,10	0,19±0,09	0,47± 0,19
Сентябрь, 2011	Тихий океан, около о. Шикотан	43,8° N, 146,8° E*	Сайра	<i>Cololabis saira</i>	0,44±0,14	0,29±0,10	0,73± 0,24
24.08.2012	Тихий океан, станция РГО 2/7	36.00°N, 150.00°E	Корифена	<i>Coryphaena equiselis</i>	0,13±0,05	<0,05	<0,23
28.08.2012	Тихий океан, станция РГО 2/12	43.24 °N, 146.33°E	Треска	<i>Gadus macrocephalus</i>	0,54±0,15	<0,12	<0,81
28.08.2012	Тихий океан, станция РГО 2/12	43.24 °N, 146.33°E	Минтай	<i>Theragra chalcogramma</i>	0,22±0,10	<0,10	<0,42
28.08.2012	Тихий океан, станция РГО 2/12	43.24 °N, 146.33°E	Бычок	<i>Cottidae</i>	<0,18	<0,15	<0,33
01.09.2012	Тихий океан, п-ов Камчатка, бухта Русская	52.40° N, 158.43° E	Навага	<i>Eleginus gracilis</i>	<0,20	<0,19	<0,39
01.09.2012	Тихий океан, п-ов Камчатка, бухта Русская	52.40° N, 158.43° E	Камбала	<i>Pleuronectidae</i>	<0,24	<0,25	<0,49
01.09.2012	Тихий океан, п-ов Камчатка, бухта Русская	52.40° N, 158.43° E	Терпуг северный одноперый	<i>Pleurogrammus monopterygius</i>	<0,20	<0,21	<0,41
07.09.2012	Японское море, станция РГО 2/17	44.57 °N, 136.41 °E	Бычок	<i>Cottidae</i>	<0,27	<0,28	<0,55
08.09.2012	Японское море, станция РГО 2/19	43.37°N, 135.17°E	Треска	<i>Gadus macrocephalus</i>	0,29±0,07	<0,07	<0,43
08.09.2012	Японское море, станция РГО 2/19	43.37°N, 135.17°E	Бычок	<i>Cottidae</i>	<0,12	<0,10	<0,22
Сентябрь, 2012	Тихий океан, около о. Шикотан	43,8° N, 146,8° E*	Сайра	<i>Cololabis saira</i>	0,38±0,07	0,16±0,04	0,54± 0,11

А.н.п. – анализ не проводился;

* – точные координаты отбора пробы в море неизвестны; указаны координаты острова Шикотан, т.к. проба была взята из улова российского рыболовецкого флота, ведущего промысел рыбы вблизи этого острова. Зоны лова могут располагаться как к северу, так и к юго-востоку на расстоянии нескольких десятков морских миль от о. Шикотан [23, 24];

** – активность определена с использованием радиохимического метода и бета-радиометрии; данные за 2011 г. приведены в [2, 8, 9].

p ≤ 0,95.

Среди проб водорослей, собранных на побережье Курильских островов и полуострова Камчатка, особое место занимает образец анфельции с острова Кунашир. Суммарное содержание радионуклидов цезия в этой пробе оказалось исключительно высоким – на момент отбора около 16 Бк/кг (сухой вес). Отношение активностей $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ в пробе анфельции в пересчете на 15 марта 2011 г. было равно $1,05 \pm 0,02$ (ошибка дана для соотношений площадей фотопиков). Эта величина полностью соответствует среднему отношению (1,03) активностей этих двух радиоактивных изотопов в выпадениях на территории Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» [14]. Аналогичные величины отношения $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ (около 1,0) были получены в лаборатории НИИРГ в 2011 г. при исследовании одежды и транспортных средств, загрязненных на территории Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» [2, 11, 15].

В отличие от свежих штормовых выбросов водорослей ламинарии, которые были собраны нами в зоне прилива – отлива, проба анфельции была получена с поверхности большой кучи водорослей, заготовленных и складированных под открытым небом в населенном пункте (н.п.) Головинно еще до аварии на АЭС «Фукусима-1». Поэтому вполне логично предположить, что радиоактивное загрязнение пробы анфельции напрямую связано с атмосферными выпадениями от аварии на АЭС «Фукусима-1». Это подтверждается и тем, что абсолютное значение удельной активности ^{134}Cs (маркера фукусимской аварии) в анфельции (около 7 Бк/кг) укладывается в диапазон колебаний удельной активности данного радионуклида (5–12 Бк/кг) для поверхностного 1-сантиметрового слоя почвы из ареала н.п. Головинно на острове Кунашир [11].

Содержание радионуклидов цезия в шести пробах беспозвоночных животных не превышало величины ПД (см. табл. 2). Нам удалось достоверно определить удельную активность ^{137}Cs лишь в одной пробе кальмаров, выловленных в Тихом океане в 500 км от побережья Японии (станция РГО 2/11д). Но и в этой пробе активность была крайне низкой – менее 0,2 Бк/кг. Важно подчеркнуть, что ни в одной из проб беспозвоночных животных, добытых как у наших берегов, так и в зоне влияния течения Куроисио в открытой части Тихого океана, ^{134}Cs не был зарегистрирован.

Более пестрая картина складывается при анализе результатов исследований проб рыбы (см. табл. 3). Присутствие малых активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs было найдено в трех пробах сайры, полученных на рыбодобывающих предприятиях о. Шикотан. Рыба выловлена в сентябре 2011 г. и в сентябре 2012 г. в Тихом океане около о. Шикотан. Суммарная удельная активность радионуклидов цезия в этих пробах не превышала 1 Бк/кг. Это на два порядка величины ниже гигиенического предела безопасности, установленного для рыбной продукции в России (130 Бк/кг по ^{137}Cs [16]) и в Японии (100 Бк/кг по сумме $^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$ [17]). Соотношение $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ в пробах сайры превышало величину 0,5 (в пересчете на 15 марта 2011 г.), что свидетельствует о заметном преобладании «фукусимского» источника в загрязнении рыбы радиоактивным цезием.

Среди исследованных нами десяти видов морской рыбы только в сайре достоверно был обнаружен ^{134}Cs . В остальных пробах (7 видов) радионуклиды цезия либо

не были идентифицированы, либо был найден в малых количествах лишь ^{137}Cs (менее 1 Бк/кг). Все эти придонные виды (за исключением корифены) были выловлены вблизи побережья Приморского края и у побережья Курильских островов и Камчатки, и поэтому присутствие измеренных малых количеств ^{137}Cs в некоторых пробах отражает фоновую (и полностью благополучную) картину состояния наших вод после аварии на АЭС «Фукусима-1». Ранее аналогичное заключение было сделано по результатам анализа содержания техногенных радионуклидов непосредственно в морской воде [2, 9, 10].

Низкая удельная активность ^{137}Cs , обнаруженная в мышцах корифены (хищный пелагический вид), вполне согласуется с текущим уровнем загрязнения поверхностных вод открытой части Тихого океана в месте вылова рыбы (станция РГО 2/7, 24 августа 2012 г.). По данным бортовых измерений второй экспедиции РГО [10], концентрация ^{137}Cs на станции РГО 2/7 для горизонта 0 м была равна $1,1 \text{ Бк/м}^3$, что лишь незначительно превышает фоновый уровень (около $1,5 \text{ Бк/м}^3$).

Полученные нами экспериментальные данные будет интересно сравнить с результатами соответствующих исследований, выполненных японскими учеными в водах исключительной экономической зоны Японии до и после аварии на АЭС «Фукусима-1».

Одно из наиболее подробных исследований природной вариативности концентрации ^{137}Cs в морских организмах, обитающих в японских водах на глубинах до 500 м, было проведено в 1984–1995 гг. в НИИ морской экологии в Токио [18]. Было изучено более 30 видов морских организмов, а общее число проб биоты достигло 900. Столь же впечатляюще выглядит перечень отобранных и проанализированных проб воды. Для концентрирования радионуклидов в биопробах японские исследователи использовали метод озоления при температуре 450°C , т.е. тот же прием, который был применен нами. Вполне сопоставимым был и метод измерения активности – полупроводниковая гамма-спектрометрия с длительной экспозицией (20 часов). Согласно проведенным измерениям, удельная активность ^{137}Cs в рыбе находилась в диапазоне от 0,05 Бк/кг до 0,74 Бк/кг (на влажный вес). Удельная активность ^{137}Cs в кальмарах колебалась от ПД (численное значение не указано) до 0,09 Бк/кг (на влажный вес). Приведенные диапазоны концентраций ^{137}Cs в биоте из японских вод до аварии на АЭС «Фукусима-1» в целом соответствуют диапазонам концентраций, определенных нами для биоты российских вод после аварии.

Совершенно иная картина складывается при изучении результатов, опубликованных в отношении тех морских организмов, которые были добыты в водах Тихого океана к востоку от Японии в 2011 и 2012 гг. Сейчас очевидно, что авария на АЭС «Фукусима-1» привела к значительному и долговременному загрязнению морской биоты, которая обитает вблизи японского побережья в зоне расположения аварийной станции. Так, удельная активность $^{134+137}\text{Cs}$ в мясе синеперого тунца, выловленного вскоре после аварии у восточного побережья Японии, находилась в диапазоне 61–168 Бк/кг (на сухой вес) [19]. Это на два порядка величины выше фонового значения удельной активности ^{137}Cs , характерного для тунца, обитающего в северо-восточной части Тихого океана у берегов Калифорнии [19]. В.С.

Репин провел математическую обработку результатов анализов проб рыбы, выловленной в феврале 2012 г. в японских экономических водах [7]. Удельная активность ^{137}Cs колебалась в весьма широких пределах – от нескольких десятых долей Бк/кг до тысячи с лишним Бк/кг. Для 10% отобранных проб уровень загрязнения ^{137}Cs превышал норматив Российской Федерации – 130 Бк/кг. По последним сводкам за октябрь 2012 г. в некоторых видах рыбы, выловленной в водах у побережья префектуры Фукусима, по-прежнему регистрируются довольно высокие уровни загрязнения, превышающие по сумме активностей $^{134+137}\text{Cs}$ допустимый предел, принятый в настоящее время в Японии – 100 Бк/кг [20]. В первую очередь речь идет о видах, ведущих придонный образ жизни и питающихся у дна [21]. В связи с сохраняющимся радиоактивным загрязнением морской биоты рыболовецкие предприятия из префектуры Фукусима остаются закрытыми [21], а перспективы возобновления рыболовецкой активности в той части Тихого океана, которая расположена напротив префектуры Фукусима, пока весьма проблематичны. Для оптимизации принятия решений по рыбодобывающей отрасли Японии и уменьшения настороженного отношения местного населения к рыбной продукции рекомендовано продолжить регулярный и подробный мониторинг самых различных видов морских организмов, обитающих вблизи побережья префектуры Фукусима и сопредельных префектур [21].

Заключение

Изучено содержание радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs в 44 пробах морских организмов, представленных четырьмя видами водорослей (11 проб), четырьмя видами беспозвоночных животных (8 проб) и десятью видами рыб (25 проб). Образцы морских организмов были отобраны в водах Японского и Охотского морей и северо-западной части Тихого океана в 2011 и 2012 гг. в рамках комплексных исследований по изучению последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» для российского Дальнего Востока. Во всех проанализированных пробах удельная активность радионуклидов цезия (по сумме двух изотопов) не превышала 1 Бк/кг (на сырой вес). Присутствие ^{134}Cs – маркера «фукусимских» выбросов и сбросов, было достоверно обнаружено в трех пробах тихоокеанской сайры (*Cololabis saira*), выловленной у южных Курил в 2011 г. и сентябре 2012 г. Проведенное исследование показывает, что авария на АЭС «Фукусима-1» не оказала заметного воздействия на морскую биоту в Японском море и Курило-Камчатском районе Тихого океана. Данный вывод полностью соответствует основным результатам исследований, полученных двумя экспедициями Русского географического общества при изучении морской воды и воздуха в этой части мирового океана в 2011 и 2012 гг.

Совершенно иная картина складывается при изучении опубликованных результатов анализов тех морских организмов, которые были выловлены в водах Тихого океана к востоку от Японии в 2011 и 2012 гг. японскими рыбодобывающими предприятиями и другими организациями [20, 21]. Сейчас очевидно, что авария на АЭС «Фукусима-1» привела к значительному и долговременному загрязнению морской биоты, которая обитает вблизи японского побережья в зоне расположения аварийной станции. По последним сводкам за октябрь 2012 г. в некоторых ви-

дах рыбы, выловленной в водах у побережья префектуры Фукусима, по-прежнему регистрируются весьма высокие уровни загрязнения, которые превышают по сумме активностей $^{134+137}\text{Cs}$ допустимый предел, принятый в настоящее время в Японии – 100 Бк/кг [20]. Это указывает на необходимость продолжения радиационного контроля морской продукции, поступающей на российский рынок из Японии.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам региональных управлений и центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора по Сахалинской области и Камчатского и Приморского краев, а также капитанам и команде судов «Павел Гордиенко» и «Академик Шокальский» за помощь, оказанную при отборе и подготовке проб для исследований.

Литература

- Ohnishi, T. The disaster at Japan's Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant after the March 11, 2011 earthquake and tsunami, and the resulting spread of radioisotope contamination / T. Ohnishi // Radiation Research. – 2012. – № 177 (1). – P. 1–14. – <http://dx.doi.org/10.1667/RR2830.1>
- Романович, И.К. Авария на АЭС «Фукусима»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / И.К. Романович [и др.] ; под ред. Академика РАН Г.Г. Онищенко. – СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. – 336 с.
- Simulation of Radioactivity Concentrations in the Pacific Ocean. Press Release. June 17, 2011. Japan Atomic Energy Agency. – <http://www.mext.go.jp/english/incident/1305758.htm>.
- Tsumune D., et al. Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, Journal of Environmental Radioactivity (2011), doi:10.1016/j.jenvrad.2011.10.007
- Bailly du Bois, P. Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident / P. Bailly du Bois [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2011). – doi:10.1016/j.jenvrad.2011.11.015
- Анализ возможности заражения промысловых рыб в дальневосточных морях и Северо-Западной части Тихого океана. Пресс-релиз от 06.04.2011. – <http://www.tinro-center.ru/tinro/production/main/press/479-2011-04-06-04-02-14>.
- Репин, В.С. Радиационно-гигиеническая оценка возможных уровней загрязнения дальневосточных морепродуктов долгоживущими радионуклидами в связи с аварией на АЭС «Фукусима-1» / В.С. Репин // Радиационная гигиена. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 61–71.
- Романович, И.К. Предварительный анализ данных первичного обследования радиационной обстановки в юго-восточных районах Сахалинской области после аварии на АЭС «Фукусима-1» / И.К. Романович [и др.] // Радиационная гигиена. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 36–42.
- Никитин, А.И. Экспедиционные радиоэкологические исследования в Японском море и северо-западной части Тихого океана после аварии на японской АЭС «Фукусима-1»: предварительные результаты / А.И. Никитин [и др.] // Радиационная гигиена. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 14–35.
- ФГБУ «ДВНИГМИ» – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт». Мониторинг радиационной обстановки в прибрежных районах Российского Дальнего Востока в связи с аварией на АЭС «Фукусима-1». Предварительный отчет. – Владивосток: ДВНИГМИ, 2012. – 77 с.

11. Ramzaev, V. Radiocesium fallout in the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011. / V. Ramzaev [et al.] // Submitted to Journal of Environmental Radioactivity.
12. LRSM – Laboratory of Spectrometry and Radiometry, 2012. – <http://en.lrsm.ru/>.
13. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / под ред. А.Н. Мареев и А.С. Зыковой – М.: Министерство здравоохранения СССР, вторая типография МЗ СССР, 1980. – 336 с.
14. Hirose, K. Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: summary of regional radioactive deposition monitoring results / K. Hirose // Journal of Environmental Radioactivity. – 2011. – doi:10.1016/j.jenvrad.2011.09.003.
15. Онищенко, Г.Г. Авария на АЭС «Фукусима-1»: первые итоги аварийного реагирования. Сообщение 2: действия органов Роспотребнадзора по радиационной защите населения Российской Федерации на ранней стадии аварии / Г.Г. Онищенко [и др.] // Радиационная гигиена. – 2011 – Т. 4, № 2. – С. 13–22.
16. Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 707 с.
17. Japanese Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries (2011). Results of the inspection on radioactivity materials in fisheries products. – <http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html>.
18. Kasamatsu F. Natural variation of radionuclide ^{137}Cs concentration in marine organisms with special reference to the effect of food habits and trophic level / F. Kasamatsu, Yu. Ishikawa // Marine Ecology Progress Series. – 1997. – V. 160. – P. 109–120.
19. Madigan D.J. Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California / D.J. Madigan [et al.]. – www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1204859109.
20. Japanese Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries (2012). Results of the inspection on radioactivity materials in fisheries products. – http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/pdf/121108_kekka_en.pdf.
21. Buesseler, K.O. Fishing for answers off Fukushima / K.O. Buesseler // Science. – 2012. – V. 338. – doi: 10.1126/science.1228250.
22. IAEA – International Atomic Energy Agency. Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment // Technical Report Series № 422. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004.
23. СахНИРО: обзор текущей обстановки на промысле сайры. 10.09.2012. – http://www.sakhniro.ru/news_188.htm.
24. СахНИРО: обзор текущей обстановки на промысле сайры. 01.10.2012. – http://www.sakhniro.ru/news_197.htm.

V.P. Ramzaev¹, S.A. Ivanov¹, Yu.N. Goncharova¹, N.M. Vishnyakova¹, A.V. Sevastyanov²

A study of radioactive contamination
of marine biota after the Fukushima accident

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Saint-Petersburg

² Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute of Federal Service
for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Vladivostok

Abstract. ^{134}Cs and ^{137}Cs contents have been studied in 44 samples of the marine biota including four species of brown and red algae (11 samples), four species of invertebrates (8 samples) and ten species of fish (25 samples). The samples have been collected in the Northwest Pacific Ocean and in the Seas of Okhotsk and Japan within the framework of the Russian monitoring program that started in 2011 to study environmental consequences of the accident at “Fukushima-1” NPP. In 2011–2012, total activity of both cesium radioisotopes for all the samples analyzed did not exceed 1 Bq kg^{-1} (wet weight). This value is negligible compared to the safe level of 130 Bq kg^{-1} (for ^{137}Cs) for the fish consumption in Russia. ^{134}Cs , a marker of the Fukushima-derived contamination, has been determined at a level of $0.2\text{--}0.4 \text{ Bq kg}^{-1}$ (wet weight) for three samples of pacific saury (*Cololabis saira*) collected from areas near Shikotan Island in September 2011 and 2012. The study shows that the Fukushima accident has no considerable impact on radiation conditions in the Kuril-Kamchatka region of the Northwest Pacific Ocean and in the Russian waters of the Sea of Japan.

Key words: accident, “Fukushima-1” NPP, Far Eastern Region, Pacific Ocean, biota, ^{134}Cs , ^{137}Cs .

Поступила: 26.11.2012 г.

В.П. Рамзаев
e-mail: V.Ramzaev@mail.ru