

С.М. КИСЕЛЕВ, Ю.Н. ЗОЗУЛЬ, Т.Н. ЛАЩЕНОВА, В.В. ШЛЫГИН,
Д.В. ИСАЕВ, С.В. АХРОМЕЕВ, А.Н. МАЛАХОВА

Оценка состояния морской акватории в районе ядерной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма (Приморский край)

*Памяти Анатолия Ивановича Лукьянца
посвящается*

35 лет назад произошла ядерная авария на атомной подводной лодке в бухте Чажма (Фокино, Приморский край). Надзор за радиационной безопасностью населения на этих территориях осуществляет ФМБА России. В настоящей статье представлены результаты многолетних исследований состояния загрязнения морской акватории бухты Чажма, а также затопленного дока (пресный водоем), расположенного около судоремонтного завода (ЗС СРЗ). Водные объекты характеризуются остаточным загрязнением радионуклидами ^{60}Co , ^{235}U , ^{137}Cs , среди которых ^{60}Co является основным. Определены локальные участки акватории, где удельная активность в донных отложениях превышает установленные уровни для неограниченного использования материалов в хозяйственной деятельности ($A_{\text{мд}}$): ^{60}Co – в районе бывших аварийных пирсов ЗС СРЗ и в затопленном доке вдоль оси распространения следа, ^{137}Cs – возле пункта долговременного хранения реакторных отсеков (ПДХ РО, мыс Устричный), где ранее располагались суда АТО. Содержание ^{235}U в донных отложениях морской акватории и затопленного дока незначительно превышает фоновые значения, но не выходит за пределы установленных уровней для неограниченного использования материалов в хозяйственной деятельности. Удельная активность ^{60}Co , ^{235}U , ^{137}Cs в морской воде и воде затопленного дока соответствует требованиям, предъявляемым к прибрежным водам морей в местах водопользования населения. Отмечено превышение ПДК металлов (для свинца – до 5 раз, мышьяка – до 3, бериллия – до 6) в морской воде, в том числе омывающей территории, используемые населением в рекреационных целях. В целом гигиеническая обстановка в акватории бухты Чажма является нормальной и не требует проведения реабилитационных мероприятий и ограничения доступа населения к исследуемому водоему. При этом необходим периодический контроль воды и объектов биоты, которые могут использоваться населением в хозяйственных целях, особенно из акватории затопленного дока.

Ключевые слова: ядерное наследие, атомные подводные лодки, бухта Чажма, радиационная безопасность, техногенные радионуклиды, металлы, донные отложения, морская вода.

Environmental assessment of the marine area in the vicinity of a nuclear submarine accident in the Chazma Bay (Primorsky Krai). S.M. KISELEV¹, Yu.N. ZOZUL¹, T.N. LASCHENOVA^{1,2}, V.V. SHLYGIN¹, D.V. ISAEV¹, S.V. AHROMEYEV¹, A.N. MALAKHOVA¹ (¹ Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, ²Peoples' Friendship University of Russia, Moscow).

*КИСЕЛЕВ Сергей Михайлович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, ЗОЗУЛЬ Юлия Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ШЛЫГИН Владимир Васильевич – младший научный сотрудник, ИСАЕВ Дмитрий Викторович – научный сотрудник, АХРОМЕЕВ Сергей Викторович – научный сотрудник, МАЛАХОВА Анна Николаевна – инженер (Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва), ЛАЩЕНОВА Татьяна Николаевна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России), профессор (Российский университет дружбы народов, Москва). *E-mail: sergio@gmail.com

Thirty-five years ago, there was a nuclear accident on a nuclear submarine in the Chazhma Bay (Fokino, Primorsky Krai). The FMBA of Russia carries out supervision of radiation safety of the community in these territories. This article presents the results of long-term studies of the state of pollution of the sea area of the Chazhma Bay, the flooded dock (freshwater reservoir) located near the ship repair plant (30 SRZ). Objects of the aquatic ecosystem are characterized by residual contamination with radionuclides – ^{60}Co , ^{235}U , ^{137}Cs , among which ^{60}Co is the main one. There are local areas of the water area identified where the specific activity of ^{60}Co in bottom sediments exceeds the established levels for unrestricted use of materials in economic activities. They include the locations of ^{60}Co in the area of the former emergency piers of 30 SRZ and the flooded dock along the axis of the trace distribution, ^{137}Cs in the area of the former location of the ships of the administrative-territorial unit (ATU) at the territories of the facility for long-term storage of reactor compartments (LTS RC, Ustrichny Cape). The content of ^{235}U in the bottom sediments of the sea area and the flooded dock slightly exceeds the background values but does not exceed the established levels for unrestricted use of materials in economic activities. The specific activity of ^{60}Co , ^{235}U , ^{137}Cs in seawater and water of the flooded dock meets the requirements for coastal waters of the seas in water consumption areas for people. Excess of MPC of heavy metals (Pb – 5 MPC, As – 3 MPC, Be – 6 MPC) in seawater, as well as in territories used by the population for recreational purposes. In general, the ecological situation in the sea area of Chazhma Bay is normal and does not require remediation and public access restriction to these areas. At the same time, it is necessary to monitor periodically water and biota objects that can be used by the population, especially in the water area of a flooded dock.

Key words: nuclear legacy, Chazhma Bay, atomic submarines, radiation safety, technogenic radionuclides, metals, bottom sediments, seawater.

Введение

Самая тяжелая радиационная авария за все время существования отечественного атомного флота произошла 10 августа 1985 г. на судоремонтном заводе в бухте Чажма (Приморский край). У пирса судоремонтного завода при выполнении операций по перегрузке ядерного топлива на АПЛ возникла самопроизвольная цепная реакция (СЦР) с тепловым взрывом. След осадения радиоактивных выпадений пересек п-ов Дунай в северо-западном направлении и вышел к морю на побережье Уссурийского залива. В результате выброса летучих веществ, фрагментов топлива и поступления радиоактивной воды через образовавшуюся пробоину в корпусе АПЛ загрязненной оказалась часть акватории бухты Чажма и сформировался радиоактивный след протяженностью 5,5 км на территории лесного массива полуострова. Южнее места аварии располагается пгт Дунай (около 11 000 жителей на 1985 г.), территория которого не была затронута облаком аварийного выброса (рис. 1).

По международной шкале INES авария отнесена к 5 уровню – «авария с широкими последствиями». В момент возникновения СЦР в реакторе находилось только что загруженное «свежее» топливо, в котором отсутствовали накопленные за время работы продукты деления. Поэтому возникший выброс радиоактивности определялся, главным образом, короткоживущими радионуклидами, образовавшимися в результате самой СЦР, в основном изотопами йода и благородных газов – около 7 МКи (259 ПБк), при этом доля долгоживущих продуктов деления не превышала 0,8 Ки [8]. Однако за время предыдущей кампании ядерного реактора в конструкциях реакторной установки образовалось значительное количество (десятки кКи) активационных радионуклидов, включая ^{60}Co , часть из которых также поступила в окружающую среду в результате аварии. Мощность выброса (Бк) составила: по ^{60}Co – $1,2 \cdot 10^{13}$, ^{90}Sr – $4,1 \cdot 10^9$, ^{137}Cs – $4,4 \cdot 10^9$, ^{131}I – $37 \cdot 10^9$ [6].

На месте радиоактивного загрязнения были проведены исследования последствий аварии для окружающей среды, осуществлен комплекс реабилитационных мероприятий механическим и физико-химическим способами, выполнена дезактивация пирсов и прибрежной полосы, прилегающей к заводу. За территорией завода была удалена сопка высотой 70 м с загрязненными склонами, чистые подстилающие породы использованы, чтобы разбавить поверхностное радиоактивное загрязнение до допустимых уровней. Для хранения образующихся отходов на береговой технической базе ПВХ (пункт временного хранения отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов) в бухте Сысоева были построены хранилища траншейного типа (8000 м³). На территории лесного массива



Рис. 1. Ситуационная картограмма расположения объектов в районе аварии на АПЛ в бухте Чажма

реабилитационные мероприятия не проводились с расчетом на естественное восстановление окружающей среды за счет распада техногенных радионуклидов. Защита населения была организована путем ограничения доступа на загрязненные территории, выделена область максимального радиоактивного загрязнения (~2 км²) [6].

Реабилитация морской акватории (~200 000 м²) заключалась в локальном углублении дна бухты с выемкой загрязненного грунта. Максимально загрязненный участок бухты Чажма (~12 000 м²) вокруг эпицентра аварии оставили на естественную дезактивацию.

В 1991 г. специалисты НИЦ «Курчатовский институт» совместно с представителями ВМФ обследовали акваторию с помощью подводного гамма-спектрометра. В месте аварии на дне были отмечены локальные аномалии мощности дозы от 9 до 64 мГр/ч. В образцах грунта обнаруживались микрочастицы урана с удельной активностью 4–6 кБк/кг [10, 13]. Общая активность основного дозообразующего активационного радионуклида ⁶⁰Со в донных отложениях бухты Чажма в 1992 г. оценена на уровне 5 Ки (185 ГБк) [9, 11]. По данным радиационного обследования, проведенного в 2009 г., в районе аварии максимальная мощность дозы на дне составляла 0,1 мГр/ч, а максимальная концентрация ⁶⁰Со в донных отложениях – 2,5 · 10⁴ Бк/кг [4]. Такой уровень гамма-излучения донных отложений в месте аварии обусловлен тем, что в этом месте под слоем ила до сих пор находятся неизвлеченные фрагменты разрушенной активной зоны реактора, являющиеся

источником радиационной и химической опасности. Таким образом, радиоэкологическая обстановка на акватории бухты Чажма в течение последних лет характеризуется как нарушенная, источник радиоактивного загрязнения относится к наиболее опасному открытому типу и требует постоянного контроля [5].

Целью настоящего исследования является радиационно-гигиеническая оценка водных объектов в районе бухты Чажма спустя более 35 лет после аварии.

Материалы и методы

Исследования радиационно-гигиенической обстановки морской акватории включали измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД) донных отложений, отбор и лабораторные исследования проб морской среды (гидробионты, вода, донные отложения). Измерения радиационных параметров объектов окружающей среды выполнены в соответствии со стандартными методиками аккредитованного испытательного лабораторного центра ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна (аттестат RA.RU.21BY01).

Для измерения МЭД и удельной активности техногенных радионуклидов в донных отложениях бухты Чажма использован подводный гамма-спектрометр РЭМ-25 с детектором NaI(Tl) \varnothing 75 × 180 мм, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт». МЭД и удельную активность техногенных радионуклидов ^{60}Co и ^{137}Cs в донных отложениях затопленного дока определяли на гамма-спектрометре МКС-01А «Мультирад-Гамма» с блоком детектирования на основе NaI(Tl) с кристаллом \varnothing 63 × 63 мм БДКС63-01А в комплектации для измерений на дне водоемов «Гамма-Аква» (Россия).

Лабораторные исследования радионуклидного состава и удельной активности техногенных радионуклидов выполнены с использованием гамма-спектрометра многоканального для измерения рентгеновского и гамма-излучения «CANBERRA» (США) с полупроводниковым германиевым детектором BE5030 и радиометра УМФ-2000 (Россия) с применением предварительных методов радиохимического выделения радионуклидов по стандартным методикам аккредитованного испытательного лабораторного центра ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна.

Общий запас (Q) техногенных радионуклидов в донных отложениях рассчитан согласно формуле:

$$Q = A_i \cdot h \cdot \rho \cdot S,$$

где A_i – удельная активность радионуклида, Бк/кг; h – толщина исследуемого слоя грунта, см; ρ – плотность грунта, г/см³; S – площадь акватории, м². При расчете принималось, что радионуклидное загрязнение ^{137}Cs и ^{60}Co локализовано в слое донных отложений толщиной от 1 до 5 см ($h = 5$ см) и плотностью 2 г/см³.

Определение тяжелых металлов выполнено методом атомно-эмиссионной спектроскопии микроволновой плазмы (Agilent Technologies 4200 MP-AES, США).

Статистическая обработка результатов проведена с применением общепринятых методов. Расчеты выполнены с использованием MS Excel 2016 и Statistica 10.0 (Stat Soft) для Windows. В качестве показателя центральной тенденции, ввиду несоответствия распределения измеренных значений нормальному закону, использована медиана и границы ее доверительного интервала при $P = 0,95$ в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004¹. Согласно принципу консервативности минимальные и максимальные значения, а также границы доверительного интервала медианы приведены с запасом на расширенную неопределенность измерений.

¹ ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004. Статистические методы. Статистическое представление данных. Медиана. Определение точечной оценки и доверительных интервалов. – <http://docs.cntd.ru/document/1200035332> (дата обращения: 23.11.2020).

Контурные картограммы распределения радиационных параметров построены с использованием программного обеспечения Surfer 9.

Оценка состояния загрязнения объектов водной среды основана на соответствии требованиям НРБ-99/2009² и ОСПОРБ 99/2010³. В качестве критерия радиационной безопасности почв и донных отложений и возможности их применения в хозяйственной деятельности использован критерий неограниченного использования твердых материалов $A_{\text{НИ}}$, регламентированный ОСПОРБ 99/2010. Согласно требованиям неограниченного использования металлов, для твердых материалов (почва, донные отложения), в которых отмечено присутствие ^{137}Cs и ^{60}Co , рассчитан критерий K с учетом неопределенности измерений:

$$K = \frac{A_{^{137}\text{Cs}}}{1 \cdot 10^2} + \frac{A_{^{60}\text{Co}}}{1 \cdot 10^2} \pm \sqrt{\left(\frac{U_{^{137}\text{Cs}}}{1 \cdot 10^2}\right)^2 + \left(\frac{U_{^{60}\text{Co}}}{1 \cdot 10^2}\right)^2},$$

где A – удельная активность радионуклида, Бк/кг; U – расширенная неопределенность активности радионуклида, Бк/кг.

В случае $K < 1$ твердые материалы могут неограниченно использоваться в хозяйственной деятельности.

Результаты

Исследования радиационно-гигиенической обстановки лесного массива в районе ядерной аварии, проведенные с 2014 по 2019 г. специалистами ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, показали, что на большей части следа значения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) не превышают 0,16 мкЗв/ч при среднем значении 0,10 мкЗв/ч, что соответствует региональному фоновому значению по Приморскому краю 0,14 мкЗв/ч. Локальные участки превышения фоновых значений МАЭД до 0,6 мкЗв/ч отмечены в части следа от бухты до дороги Дунай–Фокино. Основным дозообразующим техногенным радионуклидом является ^{60}Co . Максимальное значение удельной активности детектируемых техногенных радионуклидов на порядки ниже критерия отнесения к радиоактивным отходам, регламентированного ОСПОРБ 99/2010 [14, 15].

Точки обследований акватории бухты Чажма и дока, расположенного по оси распространения следа, см. на рис. 2. Изучение морской среды в бухте Чажма (район 30 судоремонтного завода) проведены в период с 2014 по 2015 г. совместно со специалистами НИЦ «Курчатовский институт». Оценка радиационной обстановки в затопленном доке, отделенном от бухты земляной насыпью шириной 40–50 м, выполнена специалистами ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна в 2019–2020 гг.

Радиационно-гигиеническая обстановка морской акватории в бухте Чажма

МЭД на поверхности донных отложений под слоем воды в бухте Чажма (табл. 1, рис. 3) варьирует в пределах 0,03–0,83 мкЗв/ч. Центральная часть бухты и акватория в районе стоянки судов атомно-технологического обслуживания (АТО) и хранения трехотсечных блоков характеризуется значениями 0,05–0,10 мкЗв/ч. Максимальное значение получено в районе пирсов судоремонтного завода (СРЗ) – 0,83 мкЗв/ч.

² Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – <http://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения: 23.11.2020).

³ СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – <http://docs.cntd.ru/document/902214068> (дата обращения: 23.11.2020).

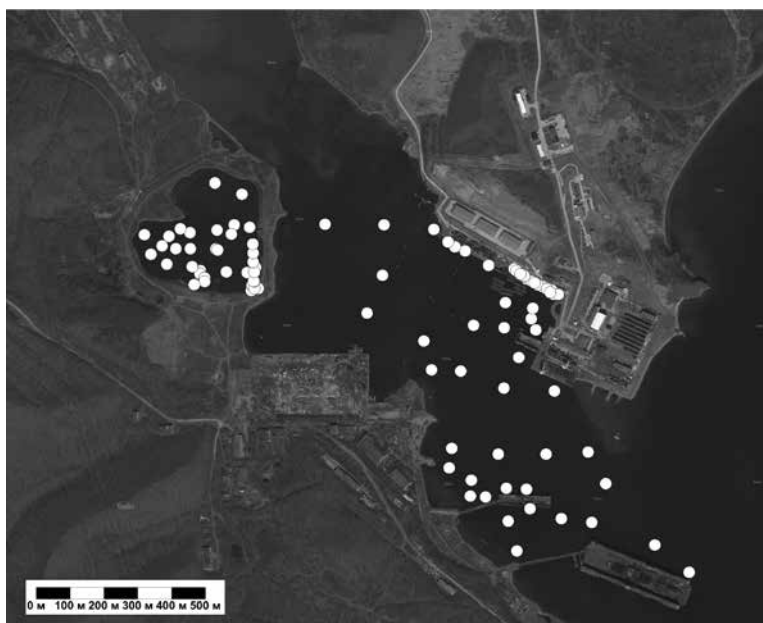


Рис. 2. Схема расположения точек измерений в акватории в районе аварии на АПЛ в бухте Чажма

Результаты измерения МЭД (мкЗв/ч) на поверхности донных отложений в бухте Чажма

Таблица 1

Локация	Минимум	Максимум	Медиана*
У пирсов СРЗ	0,03	0,83	0,13 (0,07–0,24)
По линии центра бухты	0,03	0,11	0,06 (0,03–0,10)
Район бывшей стоянки судов АТО	0,03	0,13	0,05 (0,03–0,10)

*Среднее, в скобках – границы доверительного интервала медианы при $P = 0,95$ в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004.



Рис. 3. Распределение МЭД на поверхности донных отложений в бухте Чажма

Повышенные значения МЭД в районе пирсов судоремонтного завода обусловлены в основном активационным радионуклидом ^{60}Co , удельная активность которого в донных отложениях достигает 570 Бк/кг (табл. 2). При этом отмечается заглупление загрязнения на ~5 см.

Таблица 2
Удельная активность радионуклидов (Бк/кг) в донных отложениях на участках акватории в районе аварии в бухте Чажма

Акватория	^{137}Cs	^{90}Sr	^{60}Co	^{235}U
У пирсов СРЗ	$\frac{8-250}{15}$	$\frac{<1-13}{0,3}$	$\frac{15-570}{230}$	$2,4 \pm 0,7$
По линии центра бухты	$\frac{4-10}{8}$	$\frac{<1-9}{0,3}$	$\frac{6-40}{15}$	Не обн.
Район бывшей стоянки судов АТО	$\frac{5-1500}{80}$	$\frac{<1-18}{0,3}$	$\frac{5-30}{5}$	$1,75 \pm 0,5$
Критерий оценки				
$A_{\text{ин}} / \text{ПЗУА}$	$1 \cdot 10^2 / 1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^3 / 1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^2 / 1 \cdot 10^4$	$- / 1 \cdot 10^4$
Фоновые значения (акватории Японского моря)				
Амурский залив	5–12	–	<1	–
Уссурийский залив	4–7	–	<1–4	–
Зал. Стрелок	4 ± 2	–	Не обн.	–
Зал. Находка	3 ± 2	–	–	–

Примечание. Прочерк – нет данных. Здесь и в табл. 4–7: над чертой – диапазон изменения (минимальное и максимальное значения), под чертой – медиана. $A_{\text{ин}}$ – удельная активность, допустимая для неограниченного использования. ПЗУА – предельные значения удельной активности для отнесения к радиоактивным отходам.

В сравнении с результатами обследования акватории 1998 г. [6] видно, что за 20 лет удельная активность радионуклидов в донных отложениях существенно снизилась (табл. 3). Это связано с комплексом естественных процессов, вызванных распадом основного дозообразующего радионуклида ^{60}Co , заиливанием, которое сопровождает все виды перемещений техногенных радионуклидов в придонном слое морской воды во внутренних заливах и бухтах северо-западной части Японского моря [1].

Таблица 3
Удельная активность (медиана, Бк/кг) в бухте Чажма в 1998 и 2018 гг.

Объект	^{235}U		^{60}Co		^{137}Cs		^{90}Sr	
	1998	2018	1998	2018	1998	2018	1998	2018
Донные отложения	$\sim 10^3$	2,1	$\sim 10^3$	18	180	25	2,9	0,32
Морская вода	–	0,02	–	0,03	0,003	0,004	–	0,017

Примечание. Прочерк – нет данных.

Проведенные исследования показали, что значимый вынос ^{60}Co в прилегающий к бухте зал. Стрелок отсутствует (> 5 Бк/кг мокрого веса (мв)). Общий запас ^{60}Co в обследованной акватории по результатам измерений составил $\sim 0,1$ Ки. Эта величина по порядку величины с учетом распада совпадает с полученной в 1992 г. оценкой поступления ^{60}Co в акваторию – 0,3 Ки.

Локальный участок с повышенной активностью ^{137}Cs в донных отложениях бухты Чажма выявлен у пункта долговременного хранения реакторных отсеков (ПДХ РО, мыс Устричный), где ранее располагались загрязненные суда атомного технического обслуживания (АТО) (рис. 4). Загрязнение сосредоточено главным образом в тонком (~1 см) поверхностном слое и имеет площадь не более нескольких десятков квадратных метров. Максимальное значение удельной активности ^{137}Cs составляет ~ 910 Бк/кг мв. При этом МЭД на поверхности донных отложений под слоем воды не превышает 0,13 мкЗв/ч. Общий

запас ^{137}Cs в донных отложениях этого района по результатам исследований 2014 г. оценивается в $\sim 0,02$ Ки. Для остальной акватории, прилегающей к ПДХ РО на мысе Устричный, в том числе в районе хранения трехотсечных блоков АПЛ на плаву, значимого загрязнения донных отложений техногенными радионуклидами не выявлено, удельная активность ^{137}Cs менее 15 Бк/кг мв. МЭД на поверхности донных отложений под водой варьирует в диапазоне от 0,03 до 0,12 мкЗв/ч. Такой разброс мощности дозы обусловлен различным содержанием в донном грунте природных радионуклидов, главным образом ^{40}K , удельная активность которого меняется от 100 (песчаные грунты) до 400 (илистые грунты) Бк/кг мв.

Оценивая современное состояние радиоактивного загрязнения морской акватории бухты Чажма, следует

отметить, что по уровню удельной активности техногенных радионуклидов донные отложения не относятся к категории радиоактивных отходов, но на локальных участках фиксируются повышенные по сравнению с фоновыми значения удельной активности ^{60}Co и ^{137}Cs . Содержание радионуклидов в выявленных локациях (район пирсов судоремонтного завода) превышает установленные показатели для неограниченного использования материалов в хозяйственной деятельности в соответствии с ОСПОРБ 99/2010 (табл. 2). Донные отложения в районе бывшего расположения судов АТО характеризуются повышенной активностью ^{137}Cs (медианное значение на уровне $A_{\text{нп}}$, максимальное на порядок выше). Присутствие ^{60}Co в донных отложениях Уссурийского залива связано с последствиями аварии в бухте Чажма [3, 12], но в прилегающем к бухте Чажма зал. Стрелок изотопы наведенной активности ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{65}Zn не были зарегистрированы [7].

Проведенные в 2014–2019 гг. исследования акватории бухты Чажма (табл. 4) показали, что с точки зрения радиационной безопасности ее воды отвечают требованиям СанПиН 2.1.5.2582-10⁴, предъявляемым к прибрежным водам морей в местах водопользования населения. Превышения допустимых уровней (ДУ) удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr , установленных СанПиН 2.3.2.1078-01⁵ для моллюсков, ракообразных и рыб, не выявлено.

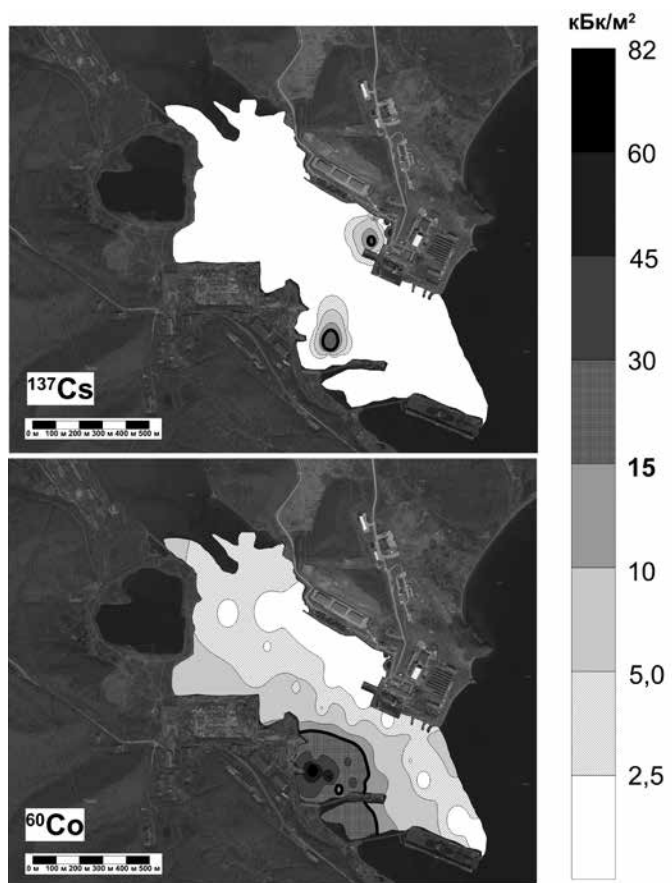


Рис. 4. Распределение ^{60}Co и ^{137}Cs в донных отложениях бухты Чажма (данные 2014 г.)

⁴ СанПиН 2.1.5.2582-10. Санитарно-эпидемиологические требования к охране прибрежных вод морей от загрязнения в местах водопользования населения. М., 2010. 66 с.

⁵ СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. – <http://docs.cntd.ru/document/901806306> (дата обращения: 23.11.2020).

Таблица 4

Удельная активность (Бк/кг) радионуклидов в объектах акватории бухты Чажма по данным исследований 2014–2019 гг.

	Морская вода*	Водоросли	Гидробионты**
¹³⁷ Cs	$(0,2-3,8) \cdot 10^{-2}$ (11) 3,5 · 10 ⁻³	<u>0,02–4,3</u> 1,5	<u>0,1–2,9</u> (200, рыба – 130) 0,9
⁹⁰ Sr	<u>0,01–0,23</u> (4,9) 0,03	<u>0,1–6,2</u> 4,2	<u>0,1–2,6</u> (100) 0,6
⁶⁰ Co	<u>0,03–0,03</u> (40) 0,03	<u>0,02–3,3</u> 1,18	<u>0,1–0,8</u> (–) 0,2
²³⁵ U	0,021 ± 0,003 (2,9)	<u>2,2–9,1</u> 2,2	<u>0,05–0,5</u> (–) 0,3

* В скобках – гигиенические нормативы в соответствии с СанПиН 2.1.5.2582-10.

** В скобках – допустимые уровни для морепродуктов (СанПиН 2.3.2.1078-01).

Примечание. Прочерк – удельная активность не нормируется.

Радиационная обстановка на территории городского пляжа ПГТ Дунай (табл. 5) отвечает требованиям радиационной безопасности. Значения МАЭД вдоль береговой черты не превышают 0,12 мкЗв/ч, что соответствует региональному фоновому значению для Приморского края. Удельная активность техногенных радионуклидов в морской воде отвечает требованиям СанПиН 2.1.5.2582-10.

Таблица 5

Средняя удельная активность (Бк/кг) радионуклидов в районе пляжа ПГТ Дунай по данным исследований 2014–2019 гг.

Объект	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	⁶⁰ Co	²³⁵ U
Морская вода	2,1 · 10 ⁻³ (11)	0,01 (4,9)	<0,01 (40)	<0,01 (2,9)
Донные отложения	2 –	1 –	<5 –	2,4 –
Водоросли	0,5 –	8,7 –	0,7 –	1,5 –

Примечание. В скобках – гигиенические нормативы в соответствии с СанПиН 2.1.5.2582-10. Прочерк – удельная активность не нормируется.

Оценка содержания тяжелых металлов в воде бухты Чажма (табл. 6) показала, что вблизи 30 судоремонтного завода и пгт Дунай повышено содержание свинца (до 5 ПДК) и мышьяка (до 3 ПДК). Содержание бериллия в основном на уровне ПДК, но в районе ПГТ Дунай отмечено повышение до 6 ПДК. Полученные данные нельзя однозначно связать с последствиями аварии в бухте Чажма, они характеризуют содержание тяжелых металлов в воде прибрежной зоны п-ова Дунай, поэтому превышения ПДК по свинцу, мышьяку и бериллию требуют проведения дальнейших исследований, в т.ч. в акватории зал. Стрелок.

Таблица 6

Удельное содержание металлов (мг/дм³) в пробах воды Японского моря, 2019 г.

Локация	As	Be	Cd	Pb	Ni
Акватория бухты Чажма	<u>0,018–0,027</u> 0,023	$1 \cdot 10^{-4}$ – $8 \cdot 10^{-4}$ 4 · 10 ⁻⁴	<0,001	<u>0,04–0,07</u> 0,05	<u>0,003–0,004</u> 0,004
Пгт Дунай	0,026	0,0016	<0,001	0,05	0,008
Уссурийский залив (макс./сред. за 2010–2017 гг.) [2]	Нет данных	Нет данных	0,012/0,002	0,004/0,001	0,015/0,002
ПДК ⁶	0,01	0,0003	0,01	0,01	0,01

⁶ Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

Радиационно-гигиеническая обстановка водной среды в затопленном доке

Рядом с территорией 30 судоремонтного завода находится затопленный док, который изначально предназначался для ремонта военных морских судов. После аварии территория дока была загрязнена техногенными радионуклидами, преимущественно ^{60}Co . По результатам обследования донных отложений осушенного дока, проведенного в 2002 г., выявлены локальные зоны радиоактивного загрязнения с уровнями МЭД до 7 мкЗв/ч. Была проведена частичная реабилитация с выемкой грунта (с активностью более 10 000 Бк/кг), относящегося к категории радиоактивных отходов.

В настоящее время док по прямому назначению не используется. Территория дока общедоступна, что требует обеспечения радиационной безопасности населения, использующего ее в рекреационных целях и хозяйственной деятельности. Док (глубина до 18 м) заполнен пресной водой, источником которой являются грунтовые воды близкого залегания. МЭД на поверхности донных отложений достигает 0,18 мкЗв/ч (рис. 5).

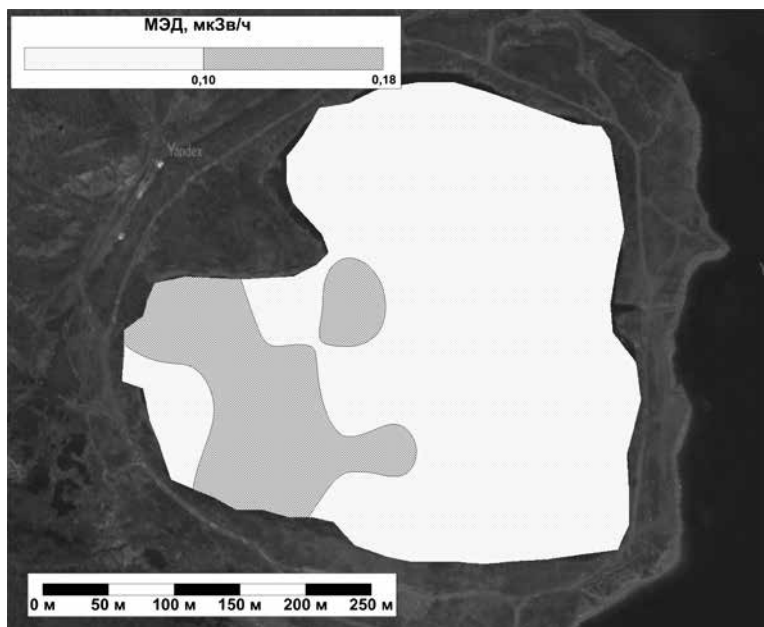


Рис. 5. МЭД в придонном слое отложений в доке

Анализ воды дока (табл. 7) показал наличие ^{235}U с активностью, превышающей аналогичный показатель в морской воде бухты Чажма, но на порядок ниже гигиенических требований СанПиН 2.1.5.980-00⁷. Удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs на три порядка ниже гигиенических требований СанПиН 2.1.5.980-00, ^{60}Co в воде не идентифицирован. Основным загрязнителем донных отложений является ^{60}Co , удельная активность которого в локальных участках превышает $A_{\text{инт}}$, но на два порядка ниже критерия отнесения к радиоактивным отходам согласно ОСПОРБ 99/2010. Удельная активность ^{235}U превышает аналогичные показатели в бухте Чажма, но на три порядка ниже уровня РАО. Удельная активность ^{137}Cs соответствует фоновым значениям.

⁷ СанПиН 2.1.5.980-00 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод». – <http://docs.cntd.ru/document/1200006938> (дата обращения: 23.11.2020).

Параметры содержания радионуклидов в акватории затопленного дока

Объект	Удельная активность, Бк/кг							
	^{137}Cs		^{90}Sr		^{60}Co		^{235}U	
Вода	0,09 ± 0,05	(11)	0,007	(4,9)	Не обн.	(40)	0,62 ± 0,20	(2,9)
Донные отложения	<u>1-12</u>	-	<u><1-3</u>	-	<u><1-490</u>	-	<u>6-16</u>	-
	10		1		27		12	

Примечание. В скобках – гигиенические нормативы в соответствии с СанПиН 2.1.5.980-00. Прочерк – удельная активность не нормируется.

По критерию неограниченного использования твердых материалов ($A_{\text{ни}}$) для ^{60}Co расчетным путем оценена площадь участка дна дока, где удельная активность ^{60}Co меньше 100 Бк/кг (8,6 га, или 82 % площади дна затопленного дока) и больше этой величины (1,8 га, или 18 %). На втором участке региональные фоновые значения превышены в 10–100 раз. Он расположен в западной части дока вдоль оси распространения следа выпадений (рис. 6).

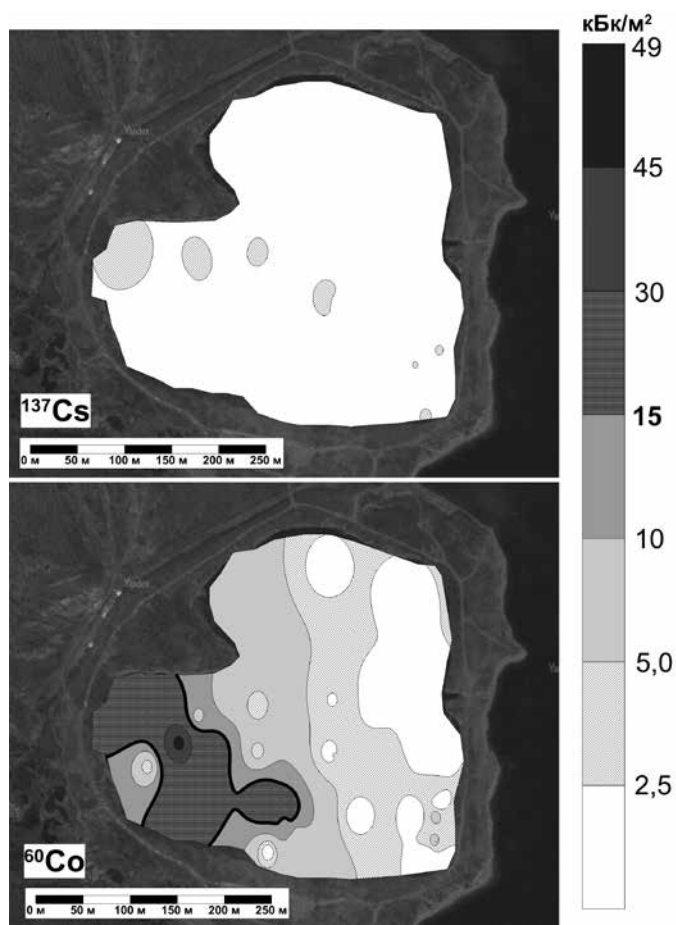


Рис. 6. Распределение ^{60}Co и ^{137}Cs в донных отложениях дока (данные 2019 г.)

Выводы

Проведено радиационно-гигиеническое обследование акватории в районе бухты Чажма (ЗАТО Фокино, Приморский край) спустя 35 лет после ядерной аварии на атомной подводной лодке. Определено содержание токсичных металлов в морской воде (As, Be, Cd, Pb, Ni). Основным загрязняющим техногенным радионуклидом является ^{60}Co . Локальные загрязнения ^{60}Co обнаружены в районе аварийного пирса на территории 30 судоремонтного завода, загрязненная акватория которого была оставлена на естественную реабилитацию с момента аварии. Локальный участок с повышенной активностью ^{137}Cs в донных отложениях выявлен в акватории бухты Чажма, прилегающей к пункту долговременного хранения реакторных отсеков (ПДХ РО, мыс Устричный), данное загрязнение (здесь ранее располагались суда АТО) не является результатом аварии на АПЛ. ^{60}Co локализуется преимущественно в 5-сантиметровом слое донных отложений, тогда как ^{137}Cs сосредоточен главным образом в тонком (~1 см) поверхностном слое на площади не более нескольких десятков квадратных метров.

По уровню загрязнения донные отложения в бухте Чажма не относятся к категории радиоактивных отходов, хотя на локальных участках установленные уровни для неограниченного использования материалов в хозяйственной деятельности ($A_{\text{ши}}$) в соответствии с ОСПОРБ–99/2010 превышены.

За 23 года запас ^{60}Co в бухте Чажма сократился в 50 раз. Общий запас ^{137}Cs в донных отложениях этого района по результатам исследований 2014 г. оценивается в ~0,02 Ки. Значимый вынос радионуклидов ^{60}Co и ^{137}Cs в прилегающий к бухте Чажма зал. Стрелок отсутствует.

Морская вода пляжа ПТТ Дунай и в районе аварии в бухте Чажма, используемых населением в рекреационных целях, с точки зрения радиационной безопасности отвечает требованиям, предъявляемым к прибрежным водам морей в местах водопользования населения. При этом в воде отмечено превышение концентрации токсичных металлов (свинца – до 5 ПДК, мышьяка – до 3 ПДК, бериллия – до 6 ПДК), что требует проведения дальнейших исследований.

Радиоактивное загрязнение затопленного дока с пресной водой, используемого населением в хозяйственной деятельности, характеризуется наличием локальных участков с повышенной активностью ^{60}Co в поверхностном слое донных отложений (18 % площади дна). Содержание техногенных радионуклидов в пресной воде отвечает нормам, установленным для поверхностных водоемов.

В целом радиационная обстановка в акватории бухты Чажма является нормальной и не требует проведения реабилитационных мероприятий и ограничения доступа населения к водоему затопленного дока. При этом необходим периодический контроль воды и объектов биоты, которые могут использоваться населением.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» А.Ю. Казеннову, О.Е. Кикнадзе, И.А. Гапонову, которые совместно со специалистами ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России участвовали в исследованиях по оценке радиационной обстановки в акватории бухты Чажма в 2014 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян Р.В., Данилян В.В., Высоцкий В.Л. и др. Анализ и оценка радиэкологических последствий ядерной аварии в бухте Чажма: препр. № IBRAE–98–09. М., 1998. 43 с.
2. Качество морских вод по гидрохимическим показателям за 2017 год: ежегодник / под ред. А.Н. Коршенко. М.: Наука, 2018. 220 с.
3. Кондратьев И.И., Лишавский С.С. Радиоактивное загрязнение полуострова Дунай (Приморский край) в свете перспектив строительства промышленных объектов на его территории // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 4. С. 96–104.

4. Попов В.Е., Высоцкий В.Л., Сивинцев Ю.В. и др. Первичное радиационное обследование бухты Чажма. Владивосток: ДВ-Нуклид, 2009. 47 с.
5. Радиоэкологические последствия эксплуатации и утилизации объектов атомного флота в Дальневосточном регионе / С.В. Антипов, В.Д. Ахунов, В.П. Биляшенко и др.; под ред. акад. РАН А.А. Саркисова. М.: Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2010. 388 с.
6. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л. Ядерная авария на атомной подводной лодке в бухте Чажма. Реконструкция событий и анализ последствий // Вестн. РАН. 2018. Т. 88, № 7. С. 599–618.
7. Седова Л.Г., Борисенко Г.С., Ковековдова Л.Т., Симоконь М.В., Хлебородов А.С. Состояние экосистемы залива Стрелок (Японское море) в условиях антропогенного воздействия // Соврем. наукоемкие технологии. 2005. № 7. С. 38–39.
8. Сивинцев Ю.В. Была ли авария в Чажме дальневосточным Чернобылем? // Атом. энергия. 2003. Т. 94, вып. 6. С. 472–479.
9. Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Данилян В.А. Радиоэкологические последствия радиационной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма // Атом. энергия. 1994. Т. 76, вып. 2. С. 158–160.
10. Сойфер В.Н. Радиоэкология северного шельфа Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 2002. 252 с.
11. Сойфер В.Н., Горячев В.А., Сергеев А.Ф. и др. Эволюция радиоактивного загрязнения донных отложений в зоне аварии на атомной подводной лодке в 1985 г. в бухте Чажма Японского моря // Метеорол. и гидрология. 1999. № 1. С. 48–63.
12. Чайковская Э.Л., Высоцкий В.Л., Гичев Д.В. Закономерности формирования радиационной обстановки на территории Приморского края // Атом. энергия. 2001. Т. 91, вып. 3. С. 223–237.
13. Чайковская Э.Л. Радиационная обстановка на территории Дальневосточного региона в 2000 году. Отчет ПУГМС. Владивосток, 2001. 38 с.
14. Шандала Н.К., Киселев С.М., Титов А.В. Научно-практический опыт надзорной деятельности в области обеспечения защиты населения и окружающей среды на объектах ядерного наследия России // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № S2. С. 83–96.
15. Shandala N.K., Kiselev S.M., Titov A.V., Starinsky V.G., Belskih Yu., Shlugin V., Isaev D. 30 years following the accident at the Chazhma Bay (Primorsky territory): environmental assessment of the contaminated areas // Seventh International Conference on Radiation in Various Fields of Research, RAD 7: book of abstracts. Herceg Novi, Montenegro: RAD Centre, 2019. С. 347.