



ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

ENVIRONMENTAL MONITORING

DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-3-274-285

EDN: ZMRGSU

УДК 502/504

Научная статья / Research article

Расчет обобщенных показателей радиационно-экологического риска для районов Баренцева и Карского морей, подверженных воздействию ядерно и радиационно опасных объектов

Н.А. Аникина  , А.И. Крышев 

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Российская Федерация
rosnovskaya@rpatyphoon.ru

Аннотация. Большая часть потенциальных источников радиоактивного загрязнения Арктики находится в Баренцевом и Карском морях. В связи с этим на указанных территориях регулярно проводятся научные исследования, результаты которых могут использоваться для определения и анализа радиационно-экологического риска. Целью и задачей работы является расчет интегральных показателей загрязнения радионуклидами (ИПЗ) и обобщенных показателей радиационно-экологических рисков (ОПР) в воде и донных отложениях районов Баренцева и Карского морей, подверженных воздействию ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО). Показано, что ИПЗ составляет от $9,5 \cdot 10^{-5}$ до $4,1 \cdot 10^{-4}$ для воды и от $1,2 \cdot 10^{-4}$ до $1,3 \cdot 10^{-2}$ для донных отложений, что на много меньше единицы. Расчетные значения ОПР для К-159 составляют от 3 до 6, что соответствует незначительному радиационному воздействию на морскую среду, для заливов и Новоземельской впадины от 12 до 18, что характеризуется слабым воздействием на радиационную обстановку. Таким образом, объекты оценки оказывают незначительное и слабое воздействие на радиационную обстановку в Арктическом регионе, но, с учетом потенциальной опасности, нуждаются в постоянном мониторинге компонентов морской среды для своевременного выявления радиационно-экологических изменений.

© Аникина Н.А., Крышев А.И., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: Арктика, радиационно-экологический риск, интегральный показатель загрязнения, контрольный уровень, морская биота

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

История статьи: поступила в редакцию 20.01.2024; доработана после рецензирования 14.02.2024; принята к публикации 30.03.2024.

Для цитирования: Аникина Н.А., Крышев А.И. Расчет обобщенных показателей радиационно-экологического риска для районов Баренцева и Карского морей, подверженных воздействию ядерно и радиационно опасных объектов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 3. С. 274–285. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-3-274-285>

Calculation of generalized indicators of radiation-ecological risk for areas of the Barents and Kara Seas exposed to the influence of nuclear and radiation hazardous objects

Nelli A. Anikina^{ID}✉, Alexander I. Kryshev^{ID}

Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russian Federation
✉ rosnovskaya@rpatyphoon.ru

Abstract. Most of the potential sources of radioactive contamination in the Arctic are located in the Barents and Kara Seas. In this regard, scientific research is regularly carried out in these territories, the results of which can be used to determine and analyze radiation and environmental risk. The goal and objective of the work is to calculate integral indicators of radionuclide pollution and generalized indicators of radiation-ecological risks in water and bottom sediments of the Barents and Kara Seas areas exposed to nuclear and radiation hazardous facilities. It is shown that the index ranges from $9.5 \cdot 10^{-5}$ to $4.1 \cdot 10^{-4}$ for water and from $1.2 \cdot 10^{-4}$ to $1.3 \cdot 10^{-2}$ for bottom sediments, which is much less than one. Calculated values of the risk indicator for K-159 range from 3 to 6, which corresponds to an insignificant radiation impact on the marine environment, for bays and the Novaya Zemlya depression from 12 to 18, which is characterized by a weak impact on the radiation situation. Thus, the objects under assessment have an insignificant and weak impact on the radiation situation in the Arctic region, but, taking into account the potential danger, they require constant monitoring of the components of the marine environment in order to timely detect radiation-ecological changes.

Keywords: Arctic, radiation-ecological risk, integral indicator of pollution, reference level, marine biota

Authors' contribution. All authors made an equivalent contribution to the preparation of publication.

Article history: received 20.01.2024; revised 14.02.2024; accepted 30.03.2024

For citation: Anikina NA, Kryshev AI. Calculation of generalized indicators of radiation-ecological risk for areas of the Barents and Kara Seas exposed to the influence of nuclear and radiation hazardous objects. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(3):274–285. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-3-274-285>

Введение

Ежегодно Арктический регион России приобретает все большую значимость для экологии и мировой экономики. Через Российскую Арктику проходит «Северный морской путь», который является кратчайшей коммуникацией между Европой и Азией. Северный маршрут в три раза короче классического пути через Средиземное море и Индийский океан. На территории Арктики находятся значительные запасы биоресурсов и углеводородного сырья, а природные процессы, происходящие в этом регионе, оказывают влияние на климат всей планеты [1].

В прошлом Арктика подвергалась радиационному воздействию от таких источников, как испытания ядерного оружия в XX в.; сброс жидких радиоактивных отходов с европейских предприятий; затопленные и затонувшие атомные подводные лодки, ядерно и радиационно опасные объекты (ЯРОО); атмосферные выпадения после аварии на Чернобыльской АЭС [1]. Наибольшее воздействие источники поступления радионуклидов оказали на западные моря Арктического региона, а именно Баренцево и Карское. Баренцево море отличается высоким биологическим разнообразием за счет благоприятной температуры воды, которая вызвана теплым Нордкапским течением. Биота арктических морей более уязвима, чем обитатели водоемов умеренных широт [2].

При радиоактивном загрязнении морей пути облучения морских организмов могут существенно отличаться от путей облучения человека. Например, морская биота, проживающая постоянно или периодически вблизи дна, подвержена внешнему облучению радионуклидами от донных отложений. В этом случае необходимо отказаться от антропоцентрического подхода «Защищен человек = защищена окружающая среда» в пользу эоцентрического [3; 4]. МКРЗ были подготовлены публикация № 108 «Защита окружающей среды: концепция референтных животных и растений» и публикация № 124 «Защита окружающей среды при различных ситуациях облучения»¹. В основных нормах безопасности МАГАТЭ выдвинуто требование о необходимости подтверждения (а не гипотетического предположения), что окружающая среда защищена от воздействия радиоактивных загрязнителей². Также в соответствии с постановлением Правительства РФ № 639 важным

¹ ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants // Ann. ICRP. 2009. Vol. 38, no. 4–6. 251 p.; ICRP Publication 124. Protection of the environment under different exposure situations // Ann. ICRP. 2014. Vol. 43, no. 1. 59 p.

² Safety Standards Series, GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. International Basic Safety Standards, IAEA, Vienna, 2014. 458 p.

принципом функционирования системы мониторинга является совершенствование инструментов и методов выявления изменений радиационной обстановки, оценки и прогноза радиационно-экологических рисков³.

ФГБУ «НПО «Тайфун» были разработаны рекомендации по оценке риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды по данным мониторинга радиационной обстановки, которые позволяют выполнить интегральную радиоэкологическую оценку⁴. Одним из способов такой оценки является определение обобщенных показателей риска (ОПР) в компонентах водной среды с предварительным расчетом интегральных показателей загрязнения (ИПЗ) радионуклидами воды и донных отложений [7].

Ежегодно ФГБУ «НПО «Тайфун», в ходе экспедиций, проводит радиационный мониторинг компонентов морской среды вокруг ЯРОО. Одними из наиболее опасных, с точки зрения радиоэкологии, объектов являются:

- атомная подводная лодка (АПЛ) К-159, которая затонула при буксировке в Баренцевом море 30 августа 2003 г. в районе острова Кильдин;
- залив Литке архипелага Новая Земля, расположенный в зоне прошлых испытаний ядерного оружия;
- залив Степового архипелага Новая Земля, который содержит затопленные ТРО и АПЛ К-27 и также подвергся влиянию ядерных испытаний XX в.;
- Новоземельская впадина, в которой находятся затопленные твердые радиоактивные отходы и реактор АПЛ заказа № 421 [1]. Рассмотренные потенциальные радиационно опасные объекты представлены на рисунке.

По результатам радиационного мониторинга в воде, донных отложениях и биоте, вокруг ЯРОО, были обнаружены преимущественно следующие радионуклиды: ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ [1; 7].



Карта объектов исследования в Баренцевом и Карском морях

Источник: составлено авторами.

³ Постановление Правительства Российской Федерации «О государственном мониторинге радиационной обстановки на территории Российской Федерации» от 10.07.2014 № 639 (в редакции от 26.03.2021 г.).

⁴ Рекомендации Росгидромета Р 52.18.923-2022. Порядок оценки риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды по данным мониторинга радиационной обстановки / И.И. Крышев, Н.Н. Павлова, Т.Г. Сазыкина и др. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун». 2022. 28 с.

Материалы и методы

При определении обобщенного показателя риска учитываются несколько факторов: пространственный масштаб, интенсивность и продолжительность радиационного воздействия на окружающую среду.

Для расчета и анализа обобщенного показателя риска использовались рекомендации ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета⁵. Показатели риска рассчитывали по формуле

$$\text{ОПР} = A_{\text{пр}} \cdot A_{\text{вр}} \cdot \text{ИРВ}_6, \quad (1)$$

где $A_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий пространственный масштаб загрязнения территории, безразмерный; $A_{\text{вр}}$ – коэффициент, учитывающий временной масштаб радиационного воздействия, безразмерный; ИРВ_6 – показатель интенсивности радиационного воздействия на компоненты морской среды, безразмерный⁶.

Данные показатели определяли согласно градациям из рекомендаций⁷. С помощью шкалирования оценивали, насколько значительную площадь занимает загрязнитель и как долго радиационный объект воздействует на окружающую среду.

$A_{\text{пр}}$ и $A_{\text{вр}}$ определяются на основе данных мониторинга, модельных или экспертных оценок. $A_{\text{пр}}$ равен 1, если территория радиационного объекта не превышает 10 км²; 2 – для территории до 100 км², 3 – для территории площадью свыше 100 км². Если радиационный объект воздействует на окружающую среду не более месяца, то $A_{\text{вр}}$ равен 1; не более года – 2; более года – 3.

Одним из способов определения ИРВ_6 является сопоставление его с интегральным показателем загрязнения, который рассчитывается по формуле (2). Если ИПЗ значительно не отличается от фона, то ИРВ_6 равен 1; при $\text{ИПЗ} < 0,1$ ИРВ_6 равен 2; при $\text{ИПЗ} < 1$ ИРВ_6 равен 3; при $\text{ИПЗ} \geq 1$ ИРВ_6 равен 30 [10].

$$\text{ИПЗ} = \sum_i \frac{A_i}{A_{i, \text{min}}}, \quad (2)$$

где A_i – удельная активность (УА) i -го радионуклида в компоненте морской среды (вода, донные отложения, Бк/кг сырого веса); $A_{i, \text{min}}$ – контрольный

⁵ Рекомендации Росгидромета Р 52.18.923-2022. Порядок оценки риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды по данным мониторинга радиационной обстановки / И.И. Крышев, Н.Н. Павлова, Т.Г. Сазыкина и др. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун». 2022. 28 с.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

уровень (КУ) активности i -го радионуклида в соответствующем компоненте морской среды (вода, донные отложения, Бк/кг сырого веса)⁸.

Контрольный уровень содержания радионуклидов в морской воде является показателем качества окружающей среды, который способен обеспечить приемлемый экологический риск за счет непревышения критерия предельно допустимого радиационно-экологического воздействия на объекты морской среды (пороговой мощности дозы, мГр/сут). Единицами измерения контрольных уровней являются Бк/л и Бк/кг в воде и донных отложениях соответственно, за счет чего их удобно использовать для оперативного мониторинга. С целью получения контрольных уровней содержания радионуклидов в воде и донных отложениях для региональной биоты ФГБУ «НПО «Тайфун» были разработаны рекомендации⁹ и утверждены Росгидрометом. Формула из рекомендаций отражает прямую зависимость контрольного уровня с максимально допустимой мощностью дозы, которая не приводит к появлению детерминированных эффектов у биоты. Таким образом, контрольный уровень – это отношение мощности дозы к показателям, отражающим особенности биоты, проживающей в рассматриваемом регионе; вид ионизирующего излучения от определенного радионуклида; накопление радионуклидов в биоте (коэффициент накопления); распределение радионуклидов между морской водой и донными отложениями (коэффициент распределения). Для определения коэффициентов накопления и коэффициентов распределения использовались данные удельных активностей радионуклидов, полученные в ходе мониторинга НПО «Тайфун» и значения из литературных источников [14; 15]. КУ содержания радионуклидов в компонентах Баренцева и Карского морей были рассчитаны ранее и приведены в публикациях [15; 16].

Удельные активности радионуклидов в воде и донных отложениях Баренцева, Карского морей и их районов, подверженных воздействию ЯРОО, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Удельные активности техногенных радионуклидов в пробах воды и донных отложений, отобранных вблизи ЯРОО Баренцева и Карского морей (2006–2021 гг.)

Объект оценки	Радионуклид	УА в воде, Бк/л	Двусторонний доверительный интервал УА в воде	УА в донных отложениях, Бк/кг	Двусторонний доверительный интервал УА в донных отложениях
1	2	3	4	5	6
Баренцево море					
К-159	¹³⁷ Cs	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$[1,1 \cdot 10^{-3} - 4,3 \cdot 10^{-3}]$	$2,5 \cdot 10^0$	$[1,6 \cdot 10^0 - 3,4 \cdot 10^0]$
	⁹⁰ Sr	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$[1,9 \cdot 10^{-3} - 3,8 \cdot 10^{-3}]$	$9,7 \cdot 10^{-1}$	$[3,6 \cdot 10^{-1} - 1,4 \cdot 10^0]$
	^{239,240} Pu	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$[1,4 \cdot 10^{-6} - 6,1 \cdot 10^{-6}]$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$[9 \cdot 10^{-4} - 1,1 \cdot 10^0]$

⁸ Рекомендации Росгидромета Р 52.18.923–2022. Порядок оценки риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды по данным мониторинга радиационной обстановки / И.И. Крышев, Н.Н. Павлова, Т.Г. Сазыкина и др. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун». 2022. 28 с.

⁹ Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах: рекомендации. Р 52.18.852–2016. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2016. 28 с.

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	8
Открытое Баренцево море	¹³⁷ Cs	1,7·10 ⁻³	[6,2·10 ⁻⁴ -2,8·10 ⁻³]	6·10 ⁻¹	[2·10 ⁻¹ -2,5·10 ⁰]
	⁹⁰ Sr	1,8·10 ⁻³	[1,0·10 ⁻³ -3,9·10 ⁻³]	7·10 ⁻¹	[4,9·10 ⁻¹ -7·10 ⁻¹]
	^{239,240} Pu	4,8·10 ⁻⁶	[2,4·10 ⁻⁶ -1,1·10 ⁻⁵]	8,3·10 ⁻¹	[3,1·10 ⁻¹ -1,1·10 ⁰]
Карское море					
Залив Литке	¹³⁷ Cs	1,5·10 ⁻³	[1,3·10 ⁻³ -1,8·10 ⁻³]	6,98	[0,38-13,05]
	⁹⁰ Sr	2,4·10 ⁻³	[1,9·10 ⁻³ -2,9·10 ⁻³]	0,58	[0,1-0,88]
	^{239,240} Pu	2,2·10 ⁻⁶	[1,4·10 ⁻⁶ -3,3·10 ⁻⁶]	0,32	[0,29-0,37]
Залив Степового	¹³⁷ Cs	2,1·10 ⁻³	[3,5·10 ⁻⁴ -1,4·10 ⁻²]	23,51	[0,59-1079]
	⁹⁰ Sr	3,2·10 ⁻³	[2,1·10 ⁻³ -6,2·10 ⁻³]	0,9	[0,1-29,57]
	^{239,240} Pu	2,9·10 ⁻⁶	[1,3·10 ⁻⁶ -5,0·10 ⁻⁶]	0,28	[0,22-0,6]
Новоземельская впадина	¹³⁷ Cs	5,0·10 ⁻⁴	[3,5·10 ⁻⁴ -7,2·10 ⁻⁴]	5,1	[0,67-7,1]
	⁹⁰ Sr	2,1·10 ⁻³	[1,7·10 ⁻³ -2,7·10 ⁻³]	0,65	[0,21-3,67]
	^{239,240} Pu	8,4·10 ⁻⁶	[1,0·10 ⁻⁶ -1,6·10 ⁻⁵]	0,34	[0,31-0,82]
Открытое Карское море	¹³⁷ Cs	3,6·10 ⁻⁴	—*	1,54	[0,31-3,74]
	⁹⁰ Sr	1,8·10 ⁻³	—*	0,20	—*
	^{239,240} Pu	1,1·10 ⁻⁶	—*	0,33	—*

* – недостаточное количество данных для определения доверительного интервала.

Источник: составлено авторами.

Результаты и обсуждение

Интегральные показатели загрязнения (ИПЗ) воды и донных отложений Баренцева моря рассчитывали по формуле 2.

Интегральные показатели загрязнения для К-159, заливов Литке, Степового и Новоземельской впадины рассчитывали по максимальным значениям удельных активностей, для того чтобы оценить радиационно-экологический риск в самых загрязненных местах расположения ЯРОО. Результаты расчетов интегральных показателей загрязнения представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Интегральные показатели загрязнения воды открытых Баренцева, Карского морей и их районов, подверженных воздействию ЯРОО

Объект оценки	Радионуклид	УА в воде, Бк/л	КУ, Бк/л [15; 16]	ИПЗ	Вклад радионуклида, %	ΣИПЗ
Баренцево море						
К-159	¹³⁷ Cs	4,3·10 ⁻³	115	3,7·10 ⁻⁵	39	9,5·10 ⁻⁵
	⁹⁰ Sr	3,8·10 ⁻³	439	8,6·10 ⁻⁶	9	
	^{239,240} Pu	6,1·10 ⁻⁶	0,124	4,9·10 ⁻⁵	52	
Открытое Баренцево море	¹³⁷ Cs	1,7·10 ⁻³	115	1,5·10 ⁻⁵	27	5,8·10 ⁻⁵
	⁹⁰ Sr	1,8·10 ⁻³	439	4,1·10 ⁻⁶	7	
	^{239,240} Pu	4,8·10 ⁻⁶	0,124	3,9·10 ⁻⁵	66	
Карское море						
Залив Литке	¹³⁷ Cs	1,8·10 ⁻³	51,8	3,5·10 ⁻⁵	29	1,2·10 ⁻⁴
	⁹⁰ Sr	2,9·10 ⁻³	298	9,7·10 ⁻⁶	9	
	^{239,240} Pu	3,3·10 ⁻⁶	0,0412	8,1·10 ⁻⁵	67	
Залив Степового	¹³⁷ Cs	1,4·10 ⁻²	51,8	2,7·10 ⁻⁴	66	4,1·10 ⁻⁴
	⁹⁰ Sr	6,2·10 ⁻³	298	2,1·10 ⁻⁵	51	
	^{239,240} Pu	5,0·10 ⁻⁶	0,0412	1,2·10 ⁻⁴	29	
Новоземельская впадина	¹³⁷ Cs	7,2·10 ⁻⁴	51,8	1,4·10 ⁻⁵	3	4,1·10 ⁻⁴
	⁹⁰ Sr	2,7·10 ⁻³	298	8,9·10 ⁻⁶	2	
	^{239,240} Pu	1,6·10 ⁻⁵	0,0412	3,9·10 ⁻⁴	95	
Открытое Карское море	¹³⁷ Cs	3,6·10 ⁻⁴	51,8	6,8·10 ⁻⁶	18	3,8·10 ⁻⁵
	⁹⁰ Sr	1,8·10 ⁻³	298	5,8·10 ⁻⁶	15	
	^{239,240} Pu	1,1·10 ⁻⁶	0,0412	2,5·10 ⁻⁵	67	

Источник: составлено авторами.

Из данных табл. 2 видно, что минимальные значения интегральных показателей загрязнения радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ имеют место для открытых Баренцева и Карского морей. Суммарный показатель загрязнения радионуклидами воды в районе затопления АПЛ К-159 в 1,6 раза превышает значение по открытому Баренцеву морю. Наибольший вклад в интегральный показатель загрязнения воды вблизи К-159 внес радионуклид $^{239,240}\text{Pu}$ (52 %).

Значения суммарных интегральных показателей загрязнения воды залива Степового и Новоземельской впадины на порядок превышают значение по открытому Карскому морю. Среди рассматриваемых объектов Карского моря наибольшие значения ИПЗ воды ^{137}Cs и ^{90}Sr характерны для залива Степового, $^{239,240}\text{Pu}$ – для Новоземельской впадины. Основной вклад в интегральный показатель загрязнения воды залива Литке и Новоземельской впадины внес радионуклид $^{239,240}\text{Pu}$ (67 и 95 % соответственно), что объясняется биологической эффективностью α -излучения. Для интегрального показателя загрязнения воды залива Степового доминирующим радионуклидом стал ^{137}Cs (66 %), что указывает на его превышение, в сравнении со значением открытого Карского моря.

Таблица 3. Интегральные показатели загрязнения донных отложений открытых Баренцева и Карского морей и их районов, подверженных воздействию ЯРОО

Объект оценки	Радионуклид	УА в донных отложениях, Бк/кг	КУ, Бк/кг [15; 16]	ИПЗ	Вклад радионуклида, %	ΣИПЗ
Баренцево море						
К-159	^{137}Cs	$3,4 \cdot 10^0$	$4,9 \cdot 10^4$	$6,9 \cdot 10^{-5}$	54	$1,2 \cdot 10^{-4}$
	^{90}Sr	$1,4 \cdot 10^0$	$1,9 \cdot 10^5$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	6	
	$^{239,240}\text{Pu}$	$1,1 \cdot 10^0$	$2,3 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	40	
Открытое Баренцево море	^{137}Cs	$6 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	24	$5,1 \cdot 10^{-5}$
	^{90}Sr	$7 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	7	
	$^{239,240}\text{Pu}$	$8,3 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	69	
Карское море						
Залив Литке	^{137}Cs	13,05	83 100	$1,6 \cdot 10^{-4}$	48	$3,3 \cdot 10^{-4}$
	^{90}Sr	0,88	298 000	$2,9 \cdot 10^{-6}$	1	
	$^{239,240}\text{Pu}$	0,37	2180	$1,7 \cdot 10^{-4}$	51	
Залив Степового	^{137}Cs	1079	83 100	$1,3 \cdot 10^{-2}$	97	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	^{90}Sr	29,57	298 000	$9,9 \cdot 10^{-5}$	1	
	$^{239,240}\text{Pu}$	0,6	2180	$2,8 \cdot 10^{-4}$	2	
Новоземельская впадина	^{137}Cs	7,1	83 100	$8,5 \cdot 10^{-5}$	18	$4,7 \cdot 10^{-4}$
	^{90}Sr	3,67	298 000	$1,2 \cdot 10^{-5}$	2	
	$^{239,240}\text{Pu}$	0,82	2180	$3,8 \cdot 10^{-4}$	80	
Открытое Карское море	^{137}Cs	1,54	83 100	$1,8 \cdot 10^{-5}$	12	$1,6 \cdot 10^{-4}$
	^{90}Sr	0,20	298 000	$7,1 \cdot 10^{-7}$	1	
	$^{239,240}\text{Pu}$	0,33	2180	$1,4 \cdot 10^{-4}$	87	

Источник: составлено авторами.

Из данных табл. 3 видно, что наименьшие значения суммарных интегральных показателей загрязнения донных отложений характерны для открытых Баренцева и Карского морей. Следует отметить, что значение по донным отложениям открытого Карского моря в 3 раза превышает показатель загрязнения компонента открытого Баренцева моря. Интегральный показатель

загрязнения донных отложений в районе затопления К-159 в 2,3 раза выше значения открытого Баренцева моря, доминирующим радионуклидом выступает ^{137}Cs (54 %).

Значения суммарных показателей загрязнения донных отложений залива Литке, Новоземельской впадины и залива Степового в 2,1; 2,9 раза и на два порядка соответственно превышают показатель загрязнения по открытому Карскому морю. Максимальные значения интегральных показателей загрязнения донных отложений ^{137}Cs и ^{90}Sr по расчетам составили $1,3 \cdot 10^{-2}$ и $9,9 \cdot 10^{-5}$ для залива Степового, $^{239,240}\text{Pu}$ – $3,8 \cdot 10^{-4}$ для Новоземельской впадины. Доминирующим радионуклидом в показатель загрязнения донных отложений залива Литке и Новоземельской впадины выступает $^{239,240}\text{Pu}$ (51 и 80 % соответственно), для залива Степового основной вклад в интегральный показатель загрязнения внес ^{137}Cs – 97 %. Таким образом, можно наблюдать превышение ^{137}Cs в донных отложениях залива Степового в сравнении со значением по открытому Карскому морю.

Далее, с помощью полученных интегральных показателей загрязнения радионуклидами воды и донных отложений, по формуле (1) были рассчитаны обобщенные показатели риска для открытых Баренцева, Карского морей и их районов, подверженных воздействию ЯРОО. Для расчета обобщенных показателей риска требовалась оценка: коэффициента, учитывающего пространственный масштаб загрязнения территории ($A_{\text{пр}}$); коэффициента, учитывающего временной масштаб радиационного воздействия ($A_{\text{вр}}$); показателя интенсивности радиационного воздействия на компоненты природной среды (ИРВ_б).

Анализ интегральных показателей загрязнения показал, что необходимость оценки обобщенных показателей риска имеется непосредственно только для районов расположения ЯРОО.

Для воды и донных отложений в районе затопления АПЛ К-159 $A_{\text{пр}}$ был оценен как 1, так как площадь воздействия локальная – не более 10 км². Компоненты заливов Карского моря оказывают местное воздействие на окружающую среду (от 10 до 100 км²), поэтому $A_{\text{пр}}$ был выбран 2. По шкале пространственного масштаба радиационного воздействия на компоненты природной среды для открытых морей был выбран коэффициент, равный 3, так как площадь воздействия свыше 100 км².

$A_{\text{вр}}$ на морскую воду и донные отложения для всех рассмотренных объектов был выбран 3, так как по градации объекты оценки относятся к продолжительному воздействию на окружающую среду – свыше 1 года.

Индекс радиационного воздействия выбирался с учетом полученных интегральных показателей загрязнения радионуклидами компонентов морской среды, согласно шкале из рекомендаций. Для открытых морей ИРВ_б на воду и донные отложения выбрали равным 1. Показатель загрязнения радионуклидами воды в районе затопления АПЛ К-159 значимо не отличался от регионального значения по открытому Баренцеву морю, соответственно, ИРВ_б был оценен как 1. Для заливов Литке, Степового и Новоземельской впадины ИРВ_б на воду приняли равным 2, так как ИПЗ превышают значение по открытому

Карскому морю на порядок и более. Результаты расчетов обобщенных показателей риска в воде и донных отложениях для районов, подверженных воздействию ЯРОО, представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4. Результаты расчетов обобщенных показателей радиационно-экологических рисков в воде для открытых Баренцева, Карского морей и их районов, подверженных воздействию ЯРОО

Объект оценки	ИПЗ	A_{np}	A_{op}	ИРВ ₆	ОПР	Градация воздействия на радиационную обстановку
Баренцево море						
К-159	$9,5 \cdot 10^{-5}$	1	3	1	3	Незначительное
Карское море						
Залив Литке	$1,2 \cdot 10^{-4}$	2	3	2	12	Слабое
Залив Степового	$4,1 \cdot 10^{-4}$	2	3	2	12	Слабое
Новоземельская впадина	$4,1 \cdot 10^{-4}$	2	3	2	12	Слабое

Источник: составлено авторами.

Из данных табл. 4 видно, что обобщенный показатель риска в воде в районе затопления АПЛ К-159 составил 3, следовательно, рассмотренный объект оказывает незначительное воздействие на радиационную обстановку в Баренцевом море.

Обобщенные показатели риска в воде Новоземельской впадины, заливов Литке и Степового составили 12. Согласно градации из рекомендаций, районы Карского моря, подверженные воздействию ЯРОО, оказывают слабое воздействие на радиационную обстановку.

Значение ИРВ₆ на донные отложения в районе затопления АПЛ К-159, залива Литке и Новоземельской впадины оценили как 2 из-за превышения более чем на порядок значения интегрального показателя загрязнения для открытого Карского моря. Для залива Степового ИРВ₆ составил 3, так как интегральный показатель загрязнения радионуклидами донных отложений объекта оценки на два порядка превышает значение по открытому Карскому морю.

Таблица 5. Результаты расчетов обобщенных показателей радиационно-экологических рисков в донных отложениях для открытых Баренцева, Карского морей и их районов, подверженных воздействию ЯРОО

Объект оценки	ИПЗ	A_{np}	A_{op}	ИРВ ₆	ОПР	Градация воздействия на радиационную обстановку
Баренцево море						
К-159	$1,2 \cdot 10^{-4}$	1	3	2	6	Незначительное
Карское море						
Залив Литке	$3,3 \cdot 10^{-4}$	2	3	2	12	Слабое
Залив Степового	$1,3 \cdot 10^{-2}$	2	3	3	18	Слабое
Новоземельская впадина	$4,7 \cdot 10^{-4}$	2	3	2	12	Слабое

Источник: составлено авторами.

Из данных табл. 5 видно, что обобщенный показатель риска в донных отложениях района затопления АПЛ К-159 составил 6. Следовательно, донные отложения в месте затопления К-159 не представляют опасности для окружающей среды. Обобщенный показатель риска в донных отложениях для залива Литке и Новоземельской впадины составил 12, для залива

Степового – 18, согласно градации из рекомендаций. Эти районы нуждаются в мониторинге и анализе полученных данных с целью предупреждения негативных последствий для акватории Карского моря и обитающей в ней биоты.

Выводы

Полученные оценки показывают, что в настоящее время источники поступления техногенных радионуклидов в Баренцево и Карское моря оказывают незначительное или слабое воздействие на радиационную обстановку Арктики. В настоящее время данный регион не нуждается в проведении дополнительных природоохранных мероприятий, направленных на сохранение благоприятной окружающей среды. Однако, с учетом потенциальной опасности, нельзя исключать риск утечки радионуклидов из затопленных и затонувших ЯРОО, а также их дальнейшего поступления в морскую среду, что может привести к их переносу с течениями и мигрирующими видами рыб. Данная территория нуждается в продолжении радиационно-экологического мониторинга компонентов морской среды, что позволит своевременно заметить изменения в уровне радиоактивности и предпринять все усилия по сохранению акватории и обитающей в ней биоты. Радиационному мониторингу донных отложений в районе залива Степового следует уделить особое внимание, так как обобщенный показатель риска превышает риск для открытого Карского моря в два раза.

Список литературы

- [1] Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в Арктические и Дальневосточные моря. М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
- [2] Sazykina T.G., Kryshev A.I. Manifestation of radiation effects in cold environment: data review and modeling // *Radiation and Environmental Biophysics*, 2011. Vol. 50, no. 1. P. 105 – 114.
- [3] Алексахин Р.М. Ядерная энергия и биосфера. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
- [4] Поликарпов Г.Г. Радиационная экология как научная основа радиационной защиты биосферы и человечества // *Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин*. Вып. 8. Екатеринбург, 2000. С. 3-28.
- [5] Крышев И.И., Павлова Н.Н., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Косых И.В., Бурякова А.А., Росновская Н.А. Оценка экологического риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды // *Проблемы анализа риска*. 2023. Т. 20, № 3. С. 10–26. <http://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-10-26>
- [6] Булгаков В.Г., Каткова М.Н., Запезалов М.А., Гниломедов В.Д., Семенова И.В., Самсонов Д.П., Лукьянова Н.Н., Сурнин В.А., Моршина Т.Н. Концентрации радиоактивных и токсических химических веществ в донных отложениях Карского моря // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 4. С. 77-90. <http://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-4-77-90>
- [7] Jensen L.K., Steenhuisen F., Standring W., Chen, J., Leppanen A.-P., Nikitin A.I., Kryshev A.I., Gudnason K., Gwynn J., Stocki T., Joensen H.P. Monitoring of radioactivity in the Arctic // *AMAP Assessment 2015: Radioactivity in the Arctic*. Oslo: AMAP, 2016. P. 35–57.

- [8] Gwynn J.P., Nikitin A.I., Shershakov V.M., Heldal H.E., Lind B., Teien H.C., Lind O.C., Sidhu R.S., Bakke G., Kazennov A., Grishin D., Fedorova A., Blinova O., Sværen I., Liebig P.L., Salbu B., Wendel C., Strålberg E., Valetova N., Petrenko G., Katrich I., Logoyda I., Osvath I., Levy I., Bartocci J., Pham M.K., Sam A. K., Nies H., Rudjord A.L. Main results of the 2012 joint Norwegian – Russian expedition to the dumping sites of the nuclear submarine K-27 and solid radioactive waste in Stepovogo Fjord, Novaya Zemlya // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. Vol. 151. P. 417–426.
- [9] Yoshitome R., Kunito T., Ikemoto T., Tanabe S., Zenke H., Yamauchi M., Miyazaki N. Global Distribution of Radionuclides (^{137}Cs and ^{40}K) in Marine Mammals // *Environ. Sci. Technol.* 2003. Vol. 37. P. 4597–4602.
- [10] Beresford N. A., Wright S. M., Brown J. E., Sazykina T.G. Transfer and Uptake Models for Reference Arctic Organisms // *Review of approaches for the estimation of radionuclide transfer to reference Arctic biota*, 2003. 100 p.
- [11] Gwynn J.P., Brown J.E., Kovacs K.M., Lydersen C. The derivation of radionuclide transfer parameters for and dose-rates to an adult ringed seal (*Phoca hispida*) in an Arctic environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 90. P. 197–209.
- [12] Gwynn J.P., Nikitin A.I., Shershakov V.M., Heldal H.E., Lind B., Teien H.C., Lind O. C., Sidhu R. S., Bakke G., Kazennov A., Grishin D., Fedorova A., Blinova O., Sværen I., Liebig P. L., Salbu B., Wendell C. C., Strålberg E., Valetova N., Petrenko G., Katrich I., Logoyda I., Osvath I., Levy I., Bartocci J., Pham M.K., Sam A., Nies H., Rudjord A.L. Main results of the 2012 joint Norwegian-Russian expedition to the dumping sites of the nuclear submarine K-27 and solid radioactive waste in Stepovogo Fjord, Novaya Zemlya // *Investigation into the radioecological status of Stepovogo fjord*. 2012. 69 p.
- [13] Brown J., Børretzen P., Dowdall M., Sazykina T., Kryshev I. The derivation of transfer parameters in the assessment of radiological impacts on Arctic marine biota // *Arctic*. 2004. Vol. 57, no. 3. P. 279–289.
- [14] Kryshev I.I., Sazykina T.G., Strand P., Brown J. E. Concentration factors of radionuclides in arctic marine biota // *Proceedings from the 5th International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic (St. Petersburg, 16–20 June 2002)*. NRPA, Østerås, 2002. P. 322–325.
- [15] Росновская Н.А., Крышев А.И., Крышев И.И. Определение в воде и донных отложениях Баренцева моря контрольных уровней содержания радионуклидов, обеспечивающих приемлемый экологический риск // *Морской биологический журнал*. 2022. Т. 7, № 4. С. 70–80. <http://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.4.06>
- [16] Росновская Н.А., Крышев И.И., Крышев А.И., Каткова М.Н. Показатели качества морской среды по уровню активности радионуклидов для экосистемы Карского моря // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 4. С. 91–98. <http://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-4-91-98>

Сведения об авторах:

Аникина Нелли Александровна, инженер, лаборатория радиационно-экологического моделирования и анализа риска, институт проблем мониторинга, ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», Российская Федерация, 249031, Обнинск, ул. Победы, д. 4. ORCID: 0000-0001-8839-5104, eLIBRARY SPIN-код: 7199-4800, AuthorID: 1143723. E-mail: rosnovskaya@rpatyphoon.ru

Крышев Александр Иванович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория радиационно-экологического моделирования и анализа риска, институт проблем мониторинга, ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», Российская Федерация, 249031, Обнинск, ул. Победы, д. 4. ORCID: 0000-0001-6816-0260, eLIBRARY SPIN-код: 5696-7633. E-mail: kai@rpatyphoon.ru