

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-255-267

EDN: QNJBLY

УДК 574

Научная статья / Research article

Радиоэкологическая оценка состояния морской среды в районе затопления атомной подводной лодки К-159 по результатам научно-исследовательской экспедиции в 2023 году

Н.А. Аникина^{}, А.И. Крышев^{}, М.Н. Каткова^{}

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Российская Федерация

^{}katkovan@list.ru

Аннотация. Атомная подводная лодка (АПЛ) К-159, затонувшая в 2003 г. в Баренцевом море в районе острова Кильдин, является потенциальным источником радиационной опасности. В 2023 г. НПО «Тайфун» была организована экспедиция с целью изучения радиационной обстановки и радиоэкологической оценки состояния морской среды в зоне затопления АПЛ К-159. Определены коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr в придонных видах рыб и водных растениях. Коэффициенты накопления ^{137}Cs в придонных видах рыб, рассчитанные с использованием данных экспедиционного обследования, в 2–5 раз выше средних значений для Баренцева моря. Рассчитаны мощности доз облучения и обобщенные показатели радиационно-экологического риска для морской биоты. Показано, что в настоящее время АПЛ К-159 оказывает незначительное влияние на морскую среду. С учетом потенциальной опасности рассматриваемый радиационный объект требует регулярного мониторинга места затопления для своевременного выявления поступления радионуклидов в природную среду Баренцева моря.

Ключевые слова: Арктика, Кильдин, зона затопления АПЛ К-159, морская биота, коэффициент накопления радионуклида, радиационно-экологический риск, доза облучения, индекс экологического риска, обобщенный показатель риска

Вклад авторов. Аникина Н.А. – верификация данных, формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация, администрирование проекта; Крышев А.И. – концептуализация, методология, создание рукописи и ее редактирование, руководство исследованием; Каткова М.Н. – ресурсы, администрирование данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Аникина Н.А., Крышев А.И., Каткова М.Н., 2025



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

История статьи: поступила в редакцию 23.12.2024; доработана после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 30.04.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Аникина Н.А., Крышев А.И., Каткова М.Н. Радиоэкологическая оценка состояния морской среды в районе затопления атомной подводной лодки К-159 по результатам научно-исследовательской экспедиции в 2023 году // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 3. С. 255–267. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-3-255-267>

Radioecological assessment of the marine environment in the area of the sinking of the nuclear submarine K-159 based on the results of the scientific research expedition in 2023

Nelli A. Anikina^{id}, Alexander I. Kryshev^{id}, Margarita N. Katkova[✉]

Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russian Federation

[✉] katkovan@list.ru

Abstract. The K-159 nuclear submarine that sank in 2003 in the Barents Sea near Kildin Island is a potential source of radiation hazard. In 2023, Research and Production Association «Typhoon» organized an expedition to study the radiation situation and conduct a radioecological assessment of the state of the marine environment in the sinking zone of the K-159 nuclear submarine. The accumulation factors of ^{137}Cs and ^{90}Sr in bottom fish species and aquatic plants were determined. The accumulation factors of ^{137}Cs in bottom fish species, calculated using the expedition survey data, are 2 to 5 times higher than the average values for the Barents Sea. The radiation dose rates and generalized indicators of radiation and environmental risk for marine biota were calculated. It was shown that the K-159 nuclear submarine currently has an insignificant impact on the marine environment. Given the potential danger, the radiation facility in question requires regular monitoring of the sinking site to promptly detect the release of radionuclides into the natural environment of the Barents Sea.

Keywords: Arctic, Kildin, K-159 submarine sinking zone, marine biota, radionuclide accumulation factor, radiation-ecological risk, radiation dose, ecological risk index, generalized risk indicator

Authors' contribution. N.A. Anikina – data verification, formal analysis, study conduct, draft manuscript creation, visualisation, project administration; A.I. Kryshev – conceptualisation, methodology, manuscript creation and editing, study administration; M.N. Katkova – resources, data administration. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 23.12.2024; revised 21.04.2025; accepted 30.04.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Anikina NA, Kryshev AI, Katkova MN. Radioecological assessment of the marine environment in the area of the sinking of the nuclear submarine K-159 based on the results of the scientific research expedition in 2023. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(3):255–267. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-3-255-267>

Введение

Актуальность радиоэкологической оценки состояния морской среды в Арктике и защита водных организмов становятся особенно значимыми из-за множества факторов, связанных как с глобальными экологическими изменениями, так и с местными антропогенными воздействиями. Арктический регион нашей страны, будучи одним из самых уязвимых экосистем планеты, испытывает значительное давление от различных видов человеческой деятельности, в том числе промышленного освоения и изменения климата [1; 2].

Арктика имеет огромное значение из-за своего стратегического расположения, биоразнообразия, а также социальных и экономических аспектов. Северный морской путь становится все более значимым благодаря изменению климата, открывая более короткий и выгодный маршрут для судоходства между Европой и Азией [1]. Это может изменить мировую торговлю и логистику. Арктика уникальна своим биоразнообразием, однако изменение климата угрожает экосистемам и видам. Сохранение биоразнообразия важно для глобального экологического баланса [1; 3].

Для коренных народов Арктика — это дом и часть их культурной идентичности. Их жизнь тесно связана с природой, и изменения в экосистеме могут привести к разрушительным последствиям. Учет их интересов — важный аспект развития Арктики. Экономическое значение Арктики связано с ее ресурсами: нефтью, газом, минералами и рыбой. Эксплуатация должна учитывать экологические и социальные аспекты для минимизации негативных последствий. В итоге Арктика требует ответственного подхода в балансе между развитием экономики, защитой природной среды и уважением культур местных жителей [1].

Затопление атомной подводной лодки (АПЛ) К-159 в районе острова Кильдин Баренцева моря в 2003 г. стало одним из значительных инцидентов, напоминающих о потенциальных экологических рисках, связанных с использованием ядерных технологий. Это происшествие вызвало серьезные опасения относительно радиационной безопасности морской среды, учитывая присутствие на борту ядерных реакторов. За прошедшие двадцать лет исследователи активно стремились оценить и минимизировать возможное влияние радиационного загрязнения на окружающую экосистему [2].

В 2023 г. ФГБУ «НПО «Тайфун» была проведена очередная научно-исследовательская экспедиция, целью которой было отобрать пробы воды, донных отложений и биоты в районе затопления атомной подводной лодки К-159. Далее, в лабораторных условиях, производилась пробоподготовка и определение удельных активностей наиболее значимых радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr), которые были обнаружены в рассмотренных пробах.

Цель исследования – радиоэкологическая оценка текущего состояния морской среды в районе затопления АПЛ К-159 с помощью данных, полученных в ходе экспедиции «НПО «Тайфун». Для достижения цели требовалось решить следующие задачи: определить коэффициенты накопления радионуклидов в морских организмах в районе затопления АПЛ К-159; рассчитать обобщенные показатели радиационно-экологического риска для района затопления АПЛ К-159 по данным экспедиции в 2023 г.

Лаборатория эколого-геофизического моделирования и анализа риска ИПМ ФГБУ «НПО „Тайфун“» подготовила рекомендации для оценки риска радиоактивного загрязнения окружающей среды на основе данных радиационного мониторинга, которые позволяют провести комплексную радиоэкологическую оценку. Одним из методов такой оценки является вычисление обобщенных показателей риска (ОПР) в компонентах водной среды, включая расчет индекса экологического риска (ИЭР) загрязнения радионуклидами компонентов природной среды [3; 4].

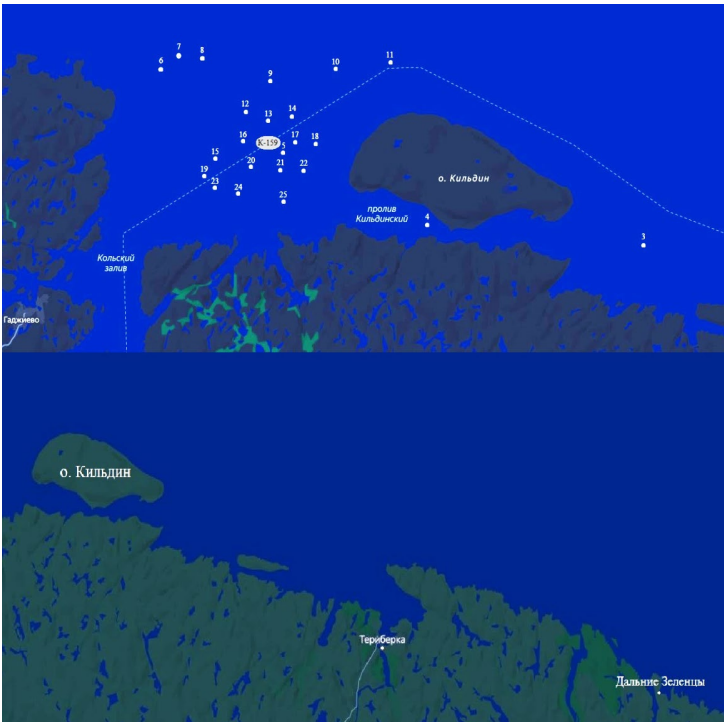
Материалы и методы

Научно-исследовательская экспедиция проводилась с 12 по 31 мая 2023 г. на судне «Иван Петров». Пробы воды и донных отложений отбирались в точках, расположенных вблизи места затопления атомной подводной лодки К-159, а также в районе острова Кильдин (4-я станция), Териберки (3-я станция) и Дальних Зеленцов (1-я станция). На 1, 3 и 4-й станциях отбирались пробы воды, донных отложений и биоты. Пункты отбора проб изображены на рисунке.

Обработка отобранных проб производилась в ФГБУ «НПО «Тайфун» лабораторией радиационного мониторинга и контроля.

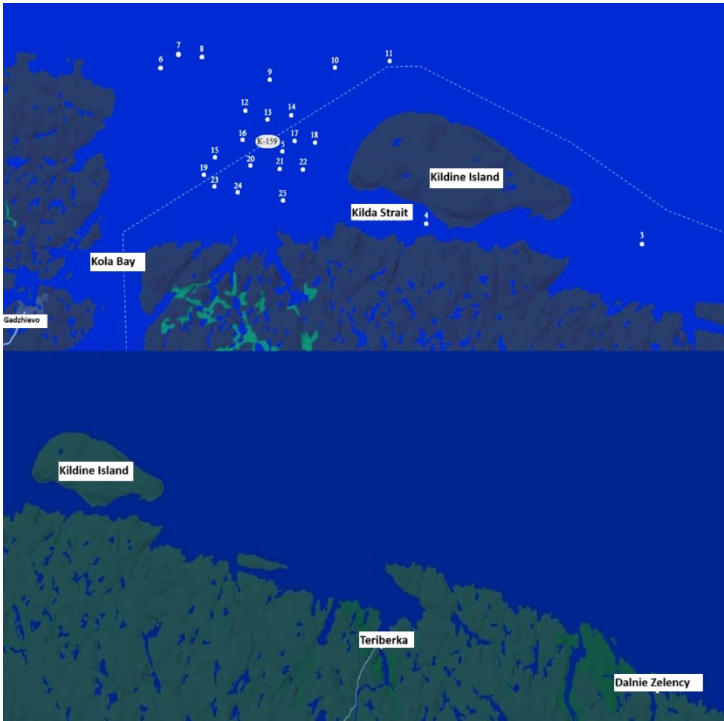
Радиоэкологическая оценка включала в себя расчет коэффициентов накопления радионуклидов в морских организмах, обитающих в районе затопления атомной подводной лодки К-159.

Определение коэффициентов накопления радионуклидов в морских организмах из водной среды и донных осадков играет важную роль в оценке радиационной безопасности и в проведении эколого-биологических исследований в морских экосистемах. Данные показатели помогают понять, насколько эффективно организмы усваивают радионуклиды из морской среды и как они накапливаются в пищевых цепях. Знание коэффициентов накопления позволяет оценить уровень загрязнения морской среды и его потенциальное воздействие на морскую флору и фауну. Это особенно важно в контексте биосферы, где организмы могут накапливать радионуклиды, что может привести к вредным последствиям для их здоровья и жизни. Также расчеты коэффициентов накопления помогают предсказать возможные риски для человека, связанного с потреблением морепродуктов.



Карта-схема отбора проб

Источник: составлено Н.А. Аникиной, А.И. Крышевым, М.Н. Катковой.



Sampling map

Source: compiled by N.A. Anikina, A.I. Kryshev, M.N. Katkova.

Таким образом, значения коэффициентов накопления радионуклидов могут использоваться при оценке состояния экосистем, разработки стратегий управления и защиты здоровья человека и морских биологических сообществ.

Коэффициенты накопления рассчитывали по формуле

$$КН = \frac{УА \text{ в биоте}}{УА \text{ в морской воде}}, \quad (1)$$

где КН – коэффициент накопления определенного радионуклида, л·кг⁻¹; УА – удельная активность в компоненте природной среде, Бк/кг или Бк/л сырого веса¹.

Коэффициенты накопления рассчитывались для водных растений и придонных видов рыб, пробы которых были отобраны в ходе экспедиции 2023 г. – фукус пузырчатый (*Fucus vesiculosus*), ламинария северная (*Laminaria hyperborea*), зубатка полосатая (*Anarhichas lupus*), пикша (*Melanogrammus aeglefinus*).

Пикша – морская рыба семейства тресковых. Она распространена в северной части Атлантического океана, включая Баренцево море, где является важным объектом промысла. В промысловом отношении пикша играет важную роль для экономики, так как ее ловят и для внутреннего потребления, и на экспорт. В Баренцевом море пикша обычно обитает на глубинах от 30 до 200 м [5].

Зубатка – рыба, обитающая в Северном Ледовитом океане, включая районы Баренцева моря. Зубатка, так же как и пикша, имеет значительное коммерческое значение как для продажи, так и для потребления. Зубатки предпочитают холодные воды и живут на глубинах от 50 до 300 м [5].

Выбранные виды морских рыб, обитающие преимущественно на глубинах и вблизи дна, являются представительными объектами для анализа радиоэкологической обстановки и накопления техногенных радионуклидов придонными организмами.

Для оценки риска от радиоактивного загрязнения морской среды по данным мониторинга радиационной обстановки 2023 г. вокруг места затопления АПЛ К-159 использовались рекомендации².

Согласно рекомендациям² рассчитывали обобщенный показатель риска от радиоактивного загрязнения морской среды по формуле

$$ОПР = A_{пр} \cdot A_{вр} \cdot ИРВ_б, \quad (2)$$

где $A_{пр}$ – коэффициент, учитывающий пространственный масштаб загрязнения территории; $A_{вр}$ – коэффициент, учитывающий временной масштаб радиационного воздействия; $ИРВ_б$ – показатель интенсивности радиационного воздействия на компоненты природной среды.

Для оценки интенсивности радиационного воздействия использовался индекс экологического риска (ИЭР).

Индекс экологического риска рассчитывается по формуле

$$\text{ИЭР} = \frac{D_i}{\text{ПДРН}_i}, \quad (3)$$

где D_i – мощность дозы облучения i -го биологического организма, мГр/сут, определяемая согласно требованиям Международной комиссии по радиологической защите¹; ПДРН $_i$ – предельно допустимая радиационная нагрузка для i -го биологического организма, мГр/сут.

Значение ПДРН $_i$ принимается равным 1 мГр/сут для млекопитающих, позвоночных животных и сосны обыкновенной, и 10 мГр/сут – для растений (кроме сосны обыкновенной) и беспозвоночных животных².

Результаты и обсуждение

С помощью формулы (1) были рассчитаны коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr в морской биоте, обитающей вблизи места затопления АПЛ К-159. В табл. 1 показаны результаты вычислений коэффициентов накопления ^{137}Cs в морских организмах Баренцева моря. Для сравнения в табл. 1 и 2 представлены усредненные данные по Баренцеву морю за период с 1992 по 2020 г. [6] и коэффициенты накопления по рекомендациям¹.

Наибольший коэффициент накопления ^{137}Cs в водных растениях имеет место для фукуса, отобранного около села Териберка (табл. 1). Данное значение превышает в 7–10 раз коэффициенты накопления, рассчитанные для всего Баренцева моря по обобщенным данным мониторинга и среднемировые значения.

Таблица 1. Значения коэффициентов накопления ^{137}Cs в биологических организмах, живущих в окрестностях места затопления АПЛ К-159

Место отбора	Биота	Удельная активность ^{137}Cs в биоте, Бк/кг сырого веса	Удельная активность ^{137}Cs в морской воде, Бк/л	Коэффициент накопления по данным экспедиции 2023, л·кг ⁻¹	Коэффициент накопления по данным мониторинга за период с 1992 по 2020 год, л·кг ⁻¹ [6]	Коэффициент накопления по рекомендациям ¹ (мировые значения), л·кг ⁻¹
Териберка	Фукус	0,3 ± 0,1	0,0006 ± 0,0001	500 ± 250	69 ± 9	50
	Пикша	0,11 ± 0,06	0,0006 ± 0,0001	180 ± 130	93 ± 26	100
Дальние Зеленцы	Пикша	0,2 ± 0,1	0,0007 ± 0,0001	290 ± 180	93 ± 26	100
	Зубатка	0,39	0,0007 ± 0,0001	490 ± 160	93 ± 26	100
о. Кильдин	Фукус	0,033 ± 0,015	0,0013 ± 0,0002	25 ± 15	69 ± 9	50
	Ламинария	0,11 ± 0,06	0,0013 ± 0,0002	85 ± 59	69 ± 9	50

Источник: составлено Н.А. Аникиной, А.И. Крышевым, М.Н. Катковой.

¹ International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants // Annals of the ICRP. 2009. 251 p.

² Ibid.

Table 1. Values of the accumulation coefficients of ¹³⁷Cs in biological organisms living in the vicinity of the sinking site of the K-159 submarine

Place of selection	Biota	Specific activity ¹³⁷ Cs in biota, Bq/kg wet weight	Specific activity ¹³⁷ Cs in sea water, Bq/l	Accumulation coefficient according to monitoring data 2023, l·kg ⁻¹	Accumulation coefficient according to monitoring data for the period from 1992 to 2020, l·kg ⁻¹ [6]	Accumulation coefficient according to recommendation ¹ (world values), l·kg ⁻¹
Teriberka	Fucus	0.3 ± 0.1	0.0006 ± 0.0001	500 ± 250	69 ± 9	50
	Haddock	0.11 ± 0.06	0.0006 ± 0.0001	180 ± 130	93 ± 26	100
Dalnie Zelentsy	Haddock	0.2 ± 0.1	0.0007 ± 0.0001	290 ± 180	93 ± 26	100
	Crandall	0.39	0.0007 ± 0.0001	490 ± 160	93 ± 26	100
Kildin Island	Fucus	0.033 ± 0.015	0.0013 ± 0.0002	25 ± 15	69 ± 9	50
	Kelp	0.11 ± 0.06	0.0013 ± 0.0002	85 ± 59	69 ± 9	50

Source: compiled by N.A. Anikina, A.I. Kryshev, M.N. Katkova.

Коэффициент накопления ¹³⁷Cs в пикше в 2–3 раза выше, а в зубатке – в 5 раз выше, чем средняя величина по Баренцеву морю, существенно превышая также и среднемировые значения. Это подтверждает сделанное ранее предположение о возможности биологического переноса ¹³⁷Cs промысловыми мигрирующими рыбами Баренцева моря, связанными с бентосной пищевой цепочкой. Такая возможность может реализовываться при наличии пятен повышенного содержания ¹³⁷Cs в донных отложениях Баренцева моря (даже небольшого размера), находящихся на путях сезонной миграции рыб [7]. Необходимо дальнейшее изучение и мониторинг радиоактивного загрязнения ¹³⁷Cs и другими техногенными радионуклидами мигрирующих придонных видов рыб Баренцева моря.

Выполнен расчет значений коэффициентов накопления ⁹⁰Sr в водных растениях по данным экспедиционного обследования (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты накопления ⁹⁰Sr в живых организмах, обитающих поблизости от места затопления подводной лодки АПЛ К-159

Место отбора	Биота	Удельная активность ⁹⁰ Sr в биоте, Бк/кг сырого веса	Удельная активность ⁹⁰ Sr в морской воде, Бк/л	Коэффициент накопления по данным экспедиции 2023, л·кг ⁻¹	Коэффициент накопления по данным мониторинга за период с 1992 по 2020 год, л·кг ⁻¹ [6]	Коэффициент накопления по рекомендациям ¹ (мировые значения), л·кг ⁻¹
Териберка	Ламинария	0,03 ± 0,01	0,0031 ± 0,0007	10 ± 6	19 ± 10	10
	Фукус	0,01 ± 0,003	0,0031 ± 0,0007	3 ± 2	19 ± 10	10
о. Кильдин	Фукус	0,05 ± 0,01	0,0014 ± 0,0004	36 ± 17	19 ± 10	10
	Ламинария	0,06 ± 0,01	0,0014 ± 0,0004	43 ± 20	19 ± 10	10

Источник: составлено Н.А. Аникиной, А.И. Крышевым, М.Н. Катковой.

Table 2. Accumulation coefficients of ^{90}Sr in living organisms living near the site of the sinking of the K-159 submarine

Sampling location	Biota	Specific activity ^{90}Sr in biota, Bq/kg wet weight	Specific activity ^{90}Sr in sea water, Bq/l	Accumulation coefficient according to monitoring data 2023, l*kg ⁻¹	Accumulation coefficient according to monitoring data for the period from 1992 to 2020, l*kg ⁻¹ [6]	Accumulation coefficient according to recommendations ¹ (world values), l*kg ⁻¹
Teriberka	Kelp	0.03 ± 0.01	0.0031 ± 0.0007	10 ± 6	19 ± 10	10
	Fucus	0.01 ± 0.003	0.0031 ± 0.0007	3 ± 2	19 ± 10	10
Kildin Island	Fucus	0.05 ± 0.01	0.0014 ± 0.0004	36 ± 17	19 ± 10	10
	Kelp	0.06 ± 0.01	0.0014 ± 0.0004	43 ± 20	19 ± 10	10

Source: compiled by N.A. Anikina, A.I. Kryshev, M.N. Katkova.

Из табл. 2 следует, что коэффициент накопления ^{90}Sr в ламинарии в районе Териберки ниже среднего значения для всего Баренцева моря и совпадает со среднемировым значением. Коэффициент накопления ^{90}Sr в фукусе в районе Териберки существенно ниже как среднего значения для всего Баренцева моря, так и среднемирового значения. В то же время значения коэффициентов накопления ^{90}Sr в фукусе и ламинарии в районе острова Кильдин, полученные по результатам экспедиционного обследования, в 2 раза выше значений средних значений по всему Баренцеву морю и в 4 раза выше среднемировых значений.

Большая часть значений коэффициентов накопления в морской биоте, определенных по данным экспедиционного обследования, существенно выше значений, рассчитанных по данным мониторинга в среднем для Баренцева моря [6]. Поэтому для оценки радиационного воздействия на биоту предпочтительно использовать не интегральный показатель загрязнения (ИПЗ), а индекс экологического риска. В данном случае оценки ИПЗ базируются на использовании величин контрольных уровней содержания радионуклидов в воде и донных отложениях Баренцева моря, при расчете которых, в свою очередь, применялись значения коэффициентов накопления радионуклидов в рыбе в среднем для Баренцева моря по данным мониторинга 2006–2020 гг. [8]. При использовании индекса экологического риска выполняется расчет мощности дозы облучения биоты.

Результаты расчетов индекса экологического риска представлены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что для морских придонных рыб значения варьируются от $1,5 \cdot 10^{-6}$ до $2,3 \cdot 10^{-6}$, а для водных растений – от $1,7 \cdot 10^{-7}$ до $3,0 \cdot 10^{-7}$. Таким образом, рассчитанные индексы экологического риска $\ll 1$ для всех случаев, следовательно, показатели находятся на уровне фона.

По формуле (2) выполнены оценки обобщенного показателя риска с учетом рассчитанных индексов экологического риска, пространственного и временного масштаба радиационного воздействия.

Определим значение коэффициента, учитывающего пространственный масштаб загрязнения акватории. Согласно данным экспедиционного обследования, площадь воздействия на компоненты природной среды была не более 10 км^2 и по градации² значение $A_{\text{пр}} = 1$ (коэффициент безразмерный).

Таблица 3. Результаты расчетов индекса экологического риска загрязнения радионуклидами компонентов природной среды

Место отбора пробы (№ станции)	Название вида	Радио-нуклид	Мощность дозы облучения (D _i), мГр/сут	Предельно допустимая радиационная нагрузка (ПДРН), мГр/сут	Индекс экологического риска (ИЭР)
Териберка (3)	Фукус	¹³⁷ Cs	3,0·10 ⁻⁶	10	3,0·10 ⁻⁷
Териберка (3)	Пикша	¹³⁷ Cs	2,2·10 ⁻⁶	1	2,2·10 ⁻⁶
Дальние Зеленцы (1)	Пикша	¹³⁷ Cs	1,5·10 ⁻⁶	1	1,5·10 ⁻⁶
Дальние Зеленцы (1)	Зубатка	¹³⁷ Cs	2,3·10 ⁻⁶	1	2,3·10 ⁻⁶
о. Кильдин (4)	Фукус	¹³⁷ Cs	2,5·10 ⁻⁶	10	2,5·10 ⁻⁷
о. Кильдин (4)	Ламинария	¹³⁷ Cs	2,7·10 ⁻⁶	10	2,7·10 ⁻⁷
Териберка (3)	Ламинария	⁹⁰ Sr	1,9·10 ⁻⁶	10	1,9·10 ⁻⁷
Териберка (3)	Фукус	⁹⁰ Sr	1,7·10 ⁻⁶	10	1,7·10 ⁻⁷
о. Кильдин (4)	Фукус	⁹⁰ Sr	1,9·10 ⁻⁶	10	1,9·10 ⁻⁷
о. Кильдин (4)	Ламинария	⁹⁰ Sr	2,0·10 ⁻⁶	10	2,0·10 ⁻⁷

Источник: составлено Н.А. Аникиной, А.И. Крышевым, М.Н. Катковой.

Table 3. Results of calculations of the index of ecological risk of contamination of natural environment components with radionuclides

Sampling location (station no.)	Species name	Radionuclide	Radiation dose rate (D _i), mGy/day	Maximum permissible radiation load (MPRLi), mGy/day	Environmental Risk Index (ERI)
Teriberka (3)	Fucus	¹³⁷ Cs	3.0·10 ⁻⁶	10	3.0·10 ⁻⁷
Teriberka (3)	Haddock	¹³⁷ Cs	2.2·10 ⁻⁶	1	2.2·10 ⁻⁶
Dalnie Zelentsy (1)	Haddock	¹³⁷ Cs	1.5·10 ⁻⁶	1	1.5·10 ⁻⁶
Dalnie Zelentsy (1)	Crandall	¹³⁷ Cs	2.3·10 ⁻⁶	1	2.3·10 ⁻⁶
Kildin Island (4)	Fucus	¹³⁷ Cs	2.5·10 ⁻⁶	10	2.5·10 ⁻⁷
Kildin Island (4)	Kelp	¹³⁷ Cs	2.7·10 ⁻⁶	10	2.7·10 ⁻⁷
Teriberka (3)	Kelp	⁹⁰ Sr	1.9·10 ⁻⁶	10	1.9·10 ⁻⁷
Teriberka (3)	Fucus	⁹⁰ Sr	1.7·10 ⁻⁶	10	1.7·10 ⁻⁷
Kildin Island (4)	Fucus	⁹⁰ Sr	1.9·10 ⁻⁶	10	1.9·10 ⁻⁷
Kildin Island (4)	Kelp	⁹⁰ Sr	2.0·10 ⁻⁶	10	2.0·10 ⁻⁷

Source: compiled by N.A. Anikina, A.I. Kryshev, M.N. Katkova.

Вычислим значение второго коэффициента, учитывающего временной масштаб радиационного воздействия. Так как атомная подводная лодка К-159 затонула в 2003 г., то по градации из рекомендаций² рассматриваемый случай можно отнести к продолжительному воздействию (свыше 1 года). Следовательно, $A_{вр} = 3$ (безразмерная величина).

Определим значение показателя интенсивности радиационного воздействия на компоненты морской среды. Значение интенсивности радиационного воздействия зависит от индекса экологического риска, представленного в табл. 3. Как следует из табл. 3, все индексы экологического риска значительно ниже 1 и, следовательно, оказывают незначительное воздействие на радиационную обстановку. Таким образом, изменения в морской среде района затопления АПЛ К-159 не превышают пределы естественной изменчивости, а индекс радиационного воздействия равен 1.

Таким образом, обобщенный показатель риска в нашем случае составил 3. Это означает, что согласно шкале рисков из рекомендаций² компоненты морской среды воздействуют на радиационную обстановку незначительно.

В рассмотренной области не требуется проведения природоохранных мероприятий по обеспечению радиационной безопасности морской биоты. Однако с учетом потенциальной опасности необходимо проведение регулярных обследований места затопления АПЛ К-159 для своевременного выявления поступления радионуклидов в природную среду Баренцева моря.

Выводы

Проведена радиоэкологическая оценка состояния морской среды в районе затопления атомной подводной лодки К-159 по результатам научно-исследовательской экспедиции НПО «Тайфун» в 2023 г. Определены коэффициенты накопления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в придонной рыбе и водных растениях.

Коэффициент накопления ^{137}Cs в пикше в 2–3 раза выше, а в зубатке – в 5 раз выше, чем средняя величина по Баренцеву морю, существенно превышая также и среднемировые значения. Это подтверждает возможность биологического переноса ^{137}Cs промысловыми мигрирующими рыбами Баренцева моря, связанными с бентосной пищевой цепочкой. Необходимо дальнейшее изучение и мониторинг радиоактивного загрязнения ^{137}Cs и другими техногенными радионуклидами мигрирующих придонных видов рыб Баренцева моря.

Коэффициент накопления ^{90}Sr в водных растениях по данным экспедиционного обследования зависит от места отбора пробы. В районе Териберки он существенно ниже как среднего значения для всего Баренцева моря, так и среднемирового значения, а в районе острова Кильдин – в 2 раза выше средних значений по всему Баренцеву морю и в 4 раза выше среднемировых значений.

Рассчитаны индексы экологического риска загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr компонентов морской среды. Все полученные значения оказались намного меньше единицы, что соответствует уровню фоновое радиационное воздействие. Обобщенный показатель риска от радиоактивного загрязнения равен 3. В соответствии с принятой градацией это означает, что в рассматриваемой области отсутствует необходимость в природоохранных мероприятиях по обеспечению радиационной безопасности.

С учетом потенциальной опасности затопленной АПЛ К-159 необходимо продолжать регулярные обследования окружающей среды в этом районе, отслеживая динамику уровней содержания техногенных радионуклидов в морской воде, донных отложениях и биоте. Необходимо учитывать в моделях расчета миграции радиоактивных веществ в Баренцевом море возможность биологического переноса радионуклидов, содержащихся в донных отложениях, мигрирующими придонными видами рыб.

Список литературы

- [1] Вакуловский С.М., Васильев А.П., Высоцкий В.Л., Губин А.Т., Данилян В.А., Крышев И.И., Мазокин В.А., Никитин А.И., Скорик Ю.И., Кобзев В.И., Лавковский С.А., Петров О.И., Пологих Б.Г. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию // Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в Арктические и Дальневосточные моря («Белая книга – 2000»). Москва : ИздАТ, 2005. 624 с. EDN: QKOFYF
- [2] Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Никитин В.С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики : радиологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей. Москва : ИБРАЭ РАН, 2015. 699 с. EDN: XMNHNR.
- [3] Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде. Москва : Маска, 2022. 638 с. EDN: AFREHA
- [4] 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. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-10-26> EDN: FWYODN
- [5] Долгов А.В. Атлас-определитель основных промысловых рыб Баренцева моря. Мурманск : ПИНРО, 2011. 187 с.
- [6] 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. 70–80. EDN: UEMHKSC
- [7] Крышев А.И., Сазыкина Т.Г. Расчет максимальных уровней накопления и биологического переноса ^{137}Cs в рыбе Баренцева моря при гипотетической аварии с затонувшей атомной подводной лодкой К-159 // Траектория исследований – человек, природа, технологии. 2023. № 2 (6). С. 3–15. EDN: MHKEDG
- [8] 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> EDN: ZMRGSU.

References

- [1] Vakulovsky SM, Vasiliev AP, Vysotsky VL, Gubin AT, Danilyan VA, Kryshev II, Mazokin VA, Nikitin AI, Skorik Yu. Technogenic radionuclides in the seas washing Russia. *Radioecological consequences of radioactive waste disposal in the Arctic and Far Eastern seas* (“White Book – 2000”). Moscow: IzdAT; 2005 (In Russ.) EDN: QKOFYF
- [2] Sarkisov AA, Sivintsev YuV, Vysotsky VL, Nikitin VS. *The Atomic Legacy of the Cold War on the Arctic Seabed: Radiological and Technical-Economic Problems of Radiation Remediation of the Seas*. Moscow: IBRAE RAN; 2015 (In Russ.) EDN: XMNHNR
- [3] Sazykina TG, Kryshev AI, Kryshev II. *Modeling of radioecological processes in the environment*. Moscow: Mask publ.; 2022 (In Russ.). EDN: AFREHA
- [4] Kryshev II, Pavlova NN, Sazykina TG, Kryshev AI, Kosykh IV, Buryakova AA, Rosnovskaya NA. Assessment of environmental risk from radioactive pollution of the environment. *Issues of Risk Analysis*. 2023;20(3):10–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-10-26> EDN: FWYODN

- [5] Dolgov AV. *Atlas-identifier of the main commercial fish of the Barents Sea*. Murmansk : PINRO, 2011. (In Russ.)
- [6] Rosnovskaya NA, Kryshev AI, Kryshev II. Determination of control levels of radionuclides ensuring acceptable environmental risk in the Barents Sea water and bottom sediments. *Marine Biological Journal*. (In Russ.) 2022;7(4):70–80. EDN: UEMHKSC
- [7] Kryshev AI, Sazykina TG. Calculation of maximum accumulation levels and biological transfer of ^{137}Cs in the Barents Sea fish for scenario of the hypothetical accident with the sunken nuclear submarine “K-159”. *Trajectory of research: human, nature, technology*. (In Russ.) 2023;(2):3-15. EDN: MHKEDG
- [8] 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. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-3-274-285> EDN: ZMRGSU

Сведения об авторах:

Аникина Нелли Александровна, младший научный сотрудник, лаборатория радиационно-экологического моделирования и анализа риска, институт проблем мониторинга, ФГБУ «Научно-производственное объединение „Тайфун“», Российская Федерация, 249031, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4. ORCID: 0000-0001-8839-5104; eLIBRARY SPIN-код: 7199-4800; AuthorID: 1143723. E-mail: katkovan@list.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, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4. ORCID: 0000-0001-6816-0260; eLIBRARY SPIN-код: 5696-7633. E-mail: kai@rpatyphoon.ru

Каткова Маргарита Николаевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория радиационного мониторинга и контроля окружающей среды, институт проблем мониторинга, ФГБУ «Научно-производственное объединение „Тайфун“», Российская Федерация, 249031, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4. AuthorID: 524808. E-mail: katkova@rpatyphoon.ru

Bio notes:

Nelli A. Anikina, Junior Researcher, Laboratory of Radiation-Ecological Modeling and Risk Analysis, Institute of Monitoring Problems, Federal State Budgetary Institution “Research and Production Association “Typhoon”, 4 Pobeda St, Obninsk, 249031, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-8839-5104; eLIBRARY SPIN-code: 7199-4800; AuthorID: 1143723. E-mail: katkovan@list.ru

Alexander I. Kryshev, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Radiation-Ecological Modeling and Risk Analysis, Institute of Monitoring Problems, Institute of Monitoring Problems, Federal State Budgetary Institution “Research and Production Association “Typhoon”, 4 Pobeda St, Obninsk, 249031, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-6816-0260; eLIBRARY SPIN-code: 5696-7633. E-mail: kai@rpatyphoon.ru

Margarita N. Katkova, Candidate of Biological Sciences, Senior Research Fellow, Laboratory of Radiation Monitoring and Environmental Control, Institute of Monitoring Problems, Federal State Budgetary Institution “Research and Production Association “Typhoon”, 4 Pobeda St, Obninsk, 249031, Russian Federation. AuthorID: 524808. E-mail: katkova@rpatyphoon.ru