

УДК 550.424

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Е. Ю. Яковлев^{1*}, А. В. Пучков¹, А. Е. Липкина²

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН (пр-т Никольский, 20, Архангельск, Россия, 163020), *yakov24lev99@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра геоэкологии (Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034)

Статья посвящена комплексной оценке радиоэкологического состояния донных отложений северо-восточной части Баренцева моря. В основе работы лежат данные, полученные в ходе морской экспедиции «Арктический плавучий университет» в июле 2024 года. Определена удельная активность техногенного ^{137}Cs и природных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в поверхностном слое (0–3 см) донных осадков, отобранных на 39 океанографических станциях. Средняя активность составила: 1,9 Бк/кг для ^{137}Cs , 20,5 Бк/кг для ^{226}Ra , 28,4 Бк/кг для ^{232}Th и 655,9 Бк/кг для ^{40}K . Активность природных радионуклидов находится в характерных для региона диапазонах. Уровни техногенного радиационного загрязнения по ^{137}Cs ниже средних для акватории Баренцева моря. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии современных поступлений и общей тенденции к снижению техногенного радиоактивного загрязнения. Корреляционный анализ выявил сильную взаимосвязь между ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , а также их зависимость от гранулометрического состава и содержания органического вещества. В отличие от естественных радионуклидов накопление ^{137}Cs контролируется в первую очередь локальными литолого-геохимическими условиями, а не глубиной бассейна. Расчет индексов радиологической безопасности показал, что текущие уровни естественной радиоактивности не представляют угрозы для морских экосистем. Полученные данные создают актуальную фоновую основу для мониторинга арктического шельфа в условиях его планируемого промышленного освоения и климатических изменений.

Ключевые слова: Арктика; арктический шельф; Баренцево море; радионуклиды; донные отложения; динамика загрязнения; радиологическая безопасность

Для цитирования: Яковлев Е. Ю., Пучков А. В., Липкина А. Е. Оценка современного радиоэкологического состояния донных отложений северо-восточной части Баренцева моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 72–86. doi: 10.17076/lim2388

Финансирование. Исследование выполнено в рамках ФНИР FUUW-2025-0011 «Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений» (№ госрегистрации 125022002727-2). Экспедиционные исследования выполнены в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-03-2025-662/8).

E. Yu. Yakovlev^{1*}, A. V. Puchkov¹, A. E. Lipkina². ASSESSMENT OF THE CURRENT RADIOECOLOGICAL STATE OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE NORTHEASTERN PART OF THE BARENTS SEA

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (20 Nikolsky Ave., 163020 Arkhangelsk, Russia), *yakov24lev99@mail.ru

² St. Petersburg State University, Department of Geoecology (7-9 Universitetskaya Emb., 199034 St. Petersburg, Russia)

This article presents a comprehensive assessment of the radioecological state of bottom sediments in the northeastern part of the Barents Sea. The study is based on data obtained during the marine expedition "Arctic Floating University" in July 2024. Specific activities of anthropogenic ¹³⁷Cs and natural ²²⁶Ra, ²³²Th, and ⁴⁰K radionuclides were determined in the top 3-cm layer of sediments collected at 39 oceanographic stations. The average activities were 1.9 Bq/kg for ¹³⁷Cs, 20.5 Bq/kg for ²²⁶Ra, 28.4 Bq/kg for ²³²Th, and 655.9 Bq/kg for ⁴⁰K. The levels of anthropogenic radioactive contamination, proxied by ¹³⁷Cs activity, are characterized as extremely low, below the average values for the Barents Sea. The data indicate the absence of recent inputs and a general declining trend in anthropogenic radioactive contamination. The activities of natural radionuclides fall within the ranges characteristic of the region. Correlation analysis revealed strong alignment between ²²⁶Ra, ²³²Th, and ⁴⁰K, as well as their dependence on grain size composition and organic matter content. In contrast to natural radionuclides, the accumulation of ¹³⁷Cs is primarily controlled by local lithological and geochemical conditions rather than by water depth. Calculations of radiological safety indices showed that the current levels of natural radioactivity pose no threat to marine ecosystems. The results provide a relevant background framework for monitoring the Arctic shelf in the context of its planned industrial development and ongoing climate change.

Keywords: Arctic; Arctic shelf; Barents Sea; radionuclides; sediments; pollution dynamics; radiological safety

For citation: Yakovlev E. Yu., Puchkov A. V., Lipkina A. E. Assessment of the current radioecological state of bottom sediments in the northeastern part of the Barents Sea. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 72–86. doi: 10.17076/lim2388

Funding. The study was carried out within the framework of the state research assignment no. FUUW-2025-0011 "Peculiarities of the migration of elements and their isotopes in the environmental components of the Western sector of the Russian Arctic under conditions of climatic and anthropogenic changes", state registration number 125022002727-2. Fieldwork was carried out within Floating University All-Russian Scientific and Educational Program (contract # 075-03-2025-662/8).

Введение

Арктическая морская среда с середины XX века подвергалась значительному антропогенному радиоактивному загрязнению [Дибнер и др., 1970; Gwynn et al., 2004; Lokas et al., 2013; Miroshnikov et al., 2017]. Основным источником техногенной радиоактивности в Российской Арктике является полигон Новая Земля, где в период с 1954 по 1990 год проводились многочисленные атмосферные, подводные и подземные ядерные взрывы [Сыч, Дубинко, 2012]. Кроме того, регион испытал воздействие от выбросов радиохимических заводов Западной Европы, ядерных объектов в Сибири и глобальных радиоактивных выпадений и аварии

на Чернобыльской АЭС [Саркисов и др., 2015]. Эти источники обусловили попадание значительных количеств искусственных радионуклидов в арктические экосистемы [IAEA..., 1999; UNSCEAR..., 2000; Matishov et al., 2004; Saniewski, 2017; Zaborska, 2017].

В последние десятилетия наблюдается общее снижение активности искусственных радионуклидов в арктической морской среде [Ilin et al., 2017; Yakovlev, Puchkov, 2020]. Это снижение объясняется прекращением крупных атмосферных испытаний, уменьшением выбросов и естественными процессами, такими как радиоактивный распад, разбавление и эффективное связывание радионуклидов донными отложениями. Однако необходимость постоянного

радиоэкологического мониторинга в Арктике остается критически важной. Это обусловлено наличием в регионе многочисленных потенциальных источников радиоактивного загрязнения: затопленных ядерных и радиационно-опасных объектов, наследия ядерных испытаний на Новой Земле, а также активизацией хозяйственной деятельности, связанной с добычей углеводородов и развитием судоходства по Северному морскому пути [Башмакова, Ульянов, 2019; Пилисов, Котов, 2024].

Среди арктических морей Баренцево море выделяется как зона особого интереса в отношении техногенного радиоактивного загрязнения [Сивинцев и др., 2005; Величкин и др., 2013; Саркисов и др., 2015]. В нем сосредоточено наибольшее количество объектов, представляющих радиационную опасность, что обусловлено наличием промышленной, военной и портовой инфраструктуры, связанной с эксплуатацией ядерных установок, атомным судостроением и судоремонтом, транспортировкой и хранением ядерных материалов [Сивинцев и др., 2005; Кобылянский и др., 2012; Матишов и др., 2019]. Многообразие потенциальных источников радиоактивности делает Баренцево море ключевым районом для оценки последствий и текущего состояния радиационного загрязнения.

Помимо мониторинга техногенных радионуклидов первостепенное значение для Баренцева моря имеет изучение природных радионуклидов, таких как ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Это связано с наличием обширных нефтегазовых месторождений на его шельфе, планируемых к разработке в ближайшие годы [Назаров и др., 2021]. Известно, что углеводороды и связанные с ними пластовые воды содержат повышенные уровни природных радионуклидов. Отсюда предполагается, что будущая добыча может стать потенциальным источником повышенной природной радиоактивности в морской среде и это увеличит радиоэкологические риски [Dowdall, Lepland, 2012; AMAP., 2016; Skancke, Nordam, 2016].

Новой и актуальной проблемой является риск вторичного загрязнения, вызванный глобальным изменением климата [Kwiatkowski et al., 2020; Gwynn et al., 2024]. Ускоренное таяние арктического ледового щита, особенно на Новой Земле, угрожает ремобилизацией техногенных радионуклидов, отложившихся во время атмосферных испытаний в 1950-х и 1960-х годах, и их высвобождением в морскую среду [Matishov et al., 2011; Мирошников, 2018].

Исходя из этого, целью данного исследования была оценка текущих уровней активности основных природных (^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K) и техногенных

(^{137}Cs) радионуклидов в донных отложениях Баренцева моря. Донные отложения являются основным долгосрочным хранилищем и архивом радионуклидов, накапливая значительную часть радиоактивности, попадающей в водную среду [Трапезников, 2007]. Радиоактивность донных осадков Баренцева моря рассматривалась в работах [Matishov, Matishov, 2004; Matishov et al., 2011, 2014]. Затем оценка радиационного состояния донных осадков Баренцева моря в целом была выполнена авторами в 2019 году [Yakovlev, Puchkov, 2020]. Однако в рамках проведенной работы оказалась недостаточно изучена северо-восточная часть Баренцева моря в связи со сложной ледовой обстановкой в период исследований в мае–июне 2019 года, что не позволило детально выполнить опробование донных осадков. Позднее, в июле 2024 года, когда площадь льда в этом районе сократилась, было проведено более детальное исследование. Местоположение некоторых станций отбора в 2019 и 2024 году совпадает, что позволяет сделать сопоставление динамики активности радионуклидов в донных осадках и выявить тенденции изменения радиоэкологического состояния этой части Баренцева моря. Таким образом, задачами данной работы являются анализ пространственного распределения радиоактивных элементов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря, установление современных базовых уровней активности, оценка текущей радиоэкологической ситуации, оценка динамики изменений в период с 2019 по 2024 г., связанных как с природными процессами, так и с антропогенной деятельностью в регионе.

Материалы и методы

Район исследования расположен в северо-восточной части шельфа Баренцева моря между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля. Шельф данного района обладает резко расчлененным рельефом дна с глубинами от 50–100 до 400–450 м [Никитин и др., 2020]. Изучаемая акватория имеет полярный морской климат, который характеризуется продолжительной зимой, коротким летом, малыми годовыми колебаниями температуры воздуха, значительной относительной влажностью, облачностью и большим количеством осадков (350 мм/год). Гидрологический режим района обусловлен климатическими особенностями, характером водообмена с прилегающими акваториями и рельефом дна. Температура воды на поверхности моря уменьшается

с запада на восток, соленость воды с глубиной возрастает и колеблется от 32 до 35 ‰ [Никитин и др., 2020].

Схема расположения точек опробования донных осадков и обзорная карта района исследований представлены на рис. 1. Отбор проб донных отложений проходил в июле 2024 года в рамках экспедиции «Арктический плавучий университет» на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов». Всего было выполнено опробование донных отложений на 39 станциях океанографических разрезов. Отбор проб проводился с помощью дночерпателя Ван-Вина. Для аналитических исследований отбирался только верхний слой донных отложений мощностью 0–3 см, представляющий современные осадки и отражающий текущие уровни загрязнения морской среды радионуклидами. В лабораторных условиях определяли содержание ^{137}Cs , являющегося основным дозобразующим радионуклидом техногенного происхождения, а также содержание ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , которые вносят основной вклад в формирование естественного радиационного фона.

Также выполнено определение гранулометрического состава и основных физико-химических параметров, определяющих накопление радиоактивных элементов донными осадками.

Определение радионуклидов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K проводилось с применением низкофоновых полупроводниковых гамма-спектрометров ORTEC (США) на основе коаксиальных детекторов GEM10, GMX25, GEM40 из особо чистого германия (HPGe) с цифровым анализатором и программным обеспечением (MAESTRO-32 и GAMMA-VISION-32, SpectraLine GP). Относительная эффективность детекторов составляет 15, 25 и 40 соответственно. Калибровка детекторов по энергии проводилась с применением объемных мер активности специального назначения (OMACH) разной плотности (кварцевый песок, ионно-обменная смола типа КУ-2-8, древесные опилки) с набором радионуклидов ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{88}Y , ^{137}Cs , ^{152}Eu . Отдельные экспрессные измерения активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K были проведены с применением гамма-спектрометра сцинтилляционного «Прогресс-гамма». Калибровка по энергии

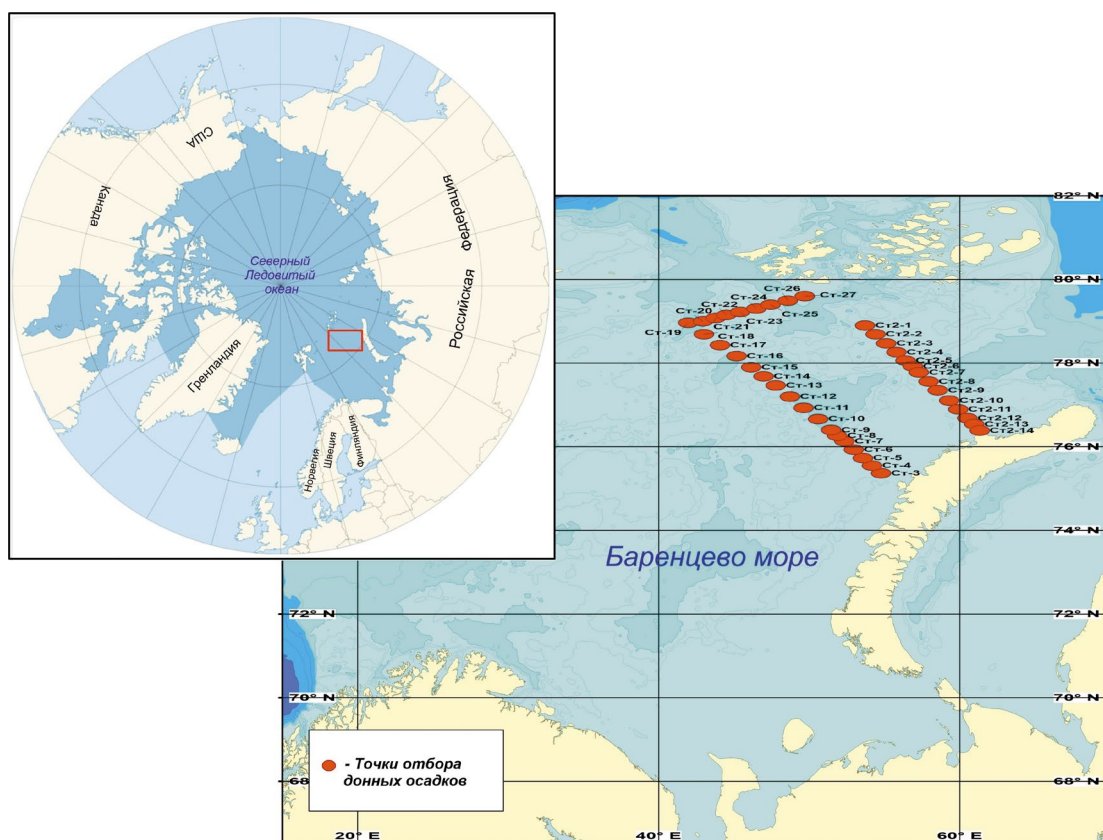


Рис. 1. Местоположение района исследований и схема опробования донных осадков в северо-восточной части Баренцева моря

Fig. 1. Location of the study area and bottom sediment sampling scheme in the northeastern part of the Barents Sea

сцинтилляционного спектрометра проводилась с применением контрольного источника «Cs-K» в геометрии «Маринелли» 1 литр. Результаты приведены на сухую массу донных отложений.

Гранулометрический состав донных отложений определяли на виброситовом анализаторе RETSCH AS 200 control (Германия). Интерпретацию гранулометрического состава донных отложений выполняли согласно шкале Вентворта [Valentine, 2019]. Физико-химические показатели, такие как массовая доля органического вещества, карбонатов (CO_3^{2-}) и золы, выполняли по общепринятым методикам [Yakovlev, Puchkov, 2020].

Статистическая обработка данных и корреляционный анализ выполнялись с использованием программного пакета OriginPro (версия 2021, OriginLab Corporation, США). Для анализа корреляционных связей использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена, поскольку распределение большинства исследуемых параметров не соответствовало нормальному закону (проверка нормальности выполнялась по критерию Колмогорова – Смирнова). Визуализация корреляционных матриц также выполнялась в среде OriginPro. В корреляционную матрицу были включены следующие параметры: удельная активность радионуклидов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K (Бк/кг); глубина моря (м); гранулометрические фракции: >250 мкм, 100–250 мкм, 45–100 мкм, <45 мкм (%); физико-химические параметры: содержание органического вещества (ОВ, %), содержание карбонатов (CO_3^{2-} , %), зольность (%). Оценка тесноты корреляционной связи выполнялась по шкале Чеддока: при $|\rho| < 0,3$ связь считалась слабой; при $0,3 \leq |\rho| < 0,5$ – умеренной; при $0,5 \leq |\rho| < 0,7$ – заметной; при $0,7 \leq |\rho| < 0,9$ – высокой; при $|\rho| \geq 0,9$ – весьма высокой. Уровень статистической значимости был принят при $p < 0,05$.

Первичные материалы результатов исследований приведены в приложениях.

Результаты и обсуждение

Гамма-спектрометрия

В обобщенном виде результаты гамма-спектрометрических измерений ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в верхнем слое донных отложений на 39 станциях северо-восточной части Баренцева моря представлены в табл. 1.

Карты распределения радиоактивных элементов в изученной части акватории Баренцева моря показаны на рис. 2. Так, значения удельной активности радионуклидов убывают в порядке $^{40}\text{K} > ^{232}\text{Th} > ^{226}\text{Ra} > ^{137}\text{Cs}$. Можно отметить, что полученные значения активности естественных радионуклидов ^{226}Ra и ^{232}Th в донных осадках несколько ниже среднемировых, в то время как активность ^{40}K выше [UNSCEAR..., 2000]. Согласно [UNSCEAR..., 2000] среднемировые значения активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в донных осадках составляют 35, 30 и 400 Бк/кг соответственно. Сравнительно высокое содержание ^{40}K в донных осадках этого района Баренцева моря, вероятно, связано с большей обогащенностью коренных пород калийсодержащими минералами, слагающими побережье Новой Земли [Evaluation..., 1999]. Выветривание этих пород, вероятно, является основным источником материала для формирования литогенной части донных осадков. С геохимической точки зрения средние значения содержания естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K соответствуют значениям, характерным для верхней континентальной коры, согласно [Rudnick, Gao, 2014].

Судя по картам распределения ^{226}Ra и ^{232}Th , их повышенные значения активности тяготеют к глубоким участкам изученной акватории – с глубинами более 300 м, что, по всей видимости, связано с накоплением этих радионуклидов в составе мелкодисперсных фракций донных осадков, слагающих впадины шельфа.

Таблица 1. Удельная активность ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в донных отложениях северо-восточной части Баренцева моря

Table 1. Specific activity of ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea

Радионуклид Radionuclide	Удельная активность, Бк/кг Specific activity, Bq/kg		
	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Среднее Average
^{137}Cs	< 0,5	$3,3 \pm 0,6^*$	$1,9 \pm 0,5$
^{226}Ra	$10,3 \pm 1,4$	$30,0 \pm 2,7$	$20,5 \pm 2,3$
^{232}Th	$15,8 \pm 1,7$	$40,0 \pm 4,0$	$28,4 \pm 3,2$
^{40}K	$520,0 \pm 42,0$	$790,0 \pm 71,0$	$655,9 \pm 54,1$

Примечание. *Среднее значение удельной активности $\pm$ стандартное отклонение. Бк/кг (n = 39).

Note. *Mean specific activity $\pm$ standard deviation. Bq/kg (n = 39).

Диапазон вариаций ^{226}Ra (10,3–30,0 Бк/кг) и ^{232}Th (15,8–40,0 Бк/кг) соответствует интервалу значений активности, характерных для акватории Баренцева моря, согласно данным 2019 года [Yakovlev, Puchkov, 2020]. Пространственное распределение ^{226}Ra и ^{232}Th коррелирует между собой, указывая на схожие закономерности накопления в морских донных осадках. Для ^{40}K отмечается достаточно узкий диапазон вариаций активности в изученной части акватории Баренцева моря (520–790 Бк/кг). В то же время для акватории Баренцева моря в целом диапазон вариаций активности ^{40}K составляет от 40 до 700 Бк/кг [Yakovlev, Puchkov, 2020]. Заметно также, что пространственное распределение ^{40}K в изученной части акватории является относительно равномерным, и это указывает на предположительно единый источник калия в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря, обусловленный, по всей видимости, выносом с Новой Земли. Согласно работе [Дибнер,

Крылов, 1970], содержание К в глинистых сланцах Новой Земли составляет в среднем 2,1 %, что соответствует ~ 650 Бк/кг радиоактивного ^{40}K . Таким образом, содержание ^{40}K в донных осадках изученной акватории близко к содержанию ^{40}K в коренных породах Новой Земли.

В то же время необходимо отметить, что планируемая активная добыча углеводородов на баренцевоморском шельфе может привести к поступлению в морскую среду пластовых вод, обогащенных изотопами радия и тория, и к локальному повышению их удельной активности, как наблюдается в настоящее время на норвежском шельфе [Skanske, Nordam, 2016]. Таким образом, полученные данные о фоновых значениях естественных радионуклидов в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря представляют собой отправную точку для будущих радиоэкологических оценок при разработке углеводородных месторождений на арктическом шельфе.

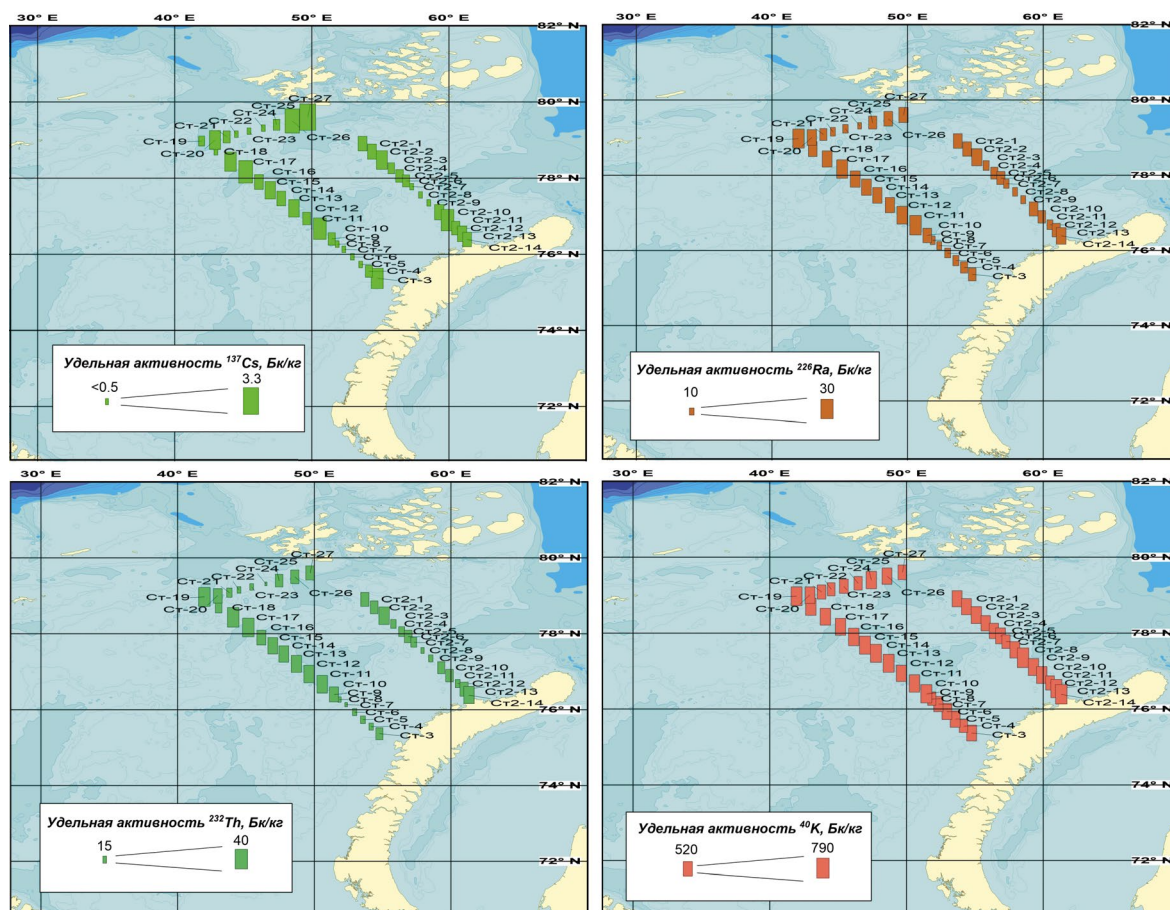


Рис. 2. Распределение удельной активности ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в донных отложениях северо-восточной части Баренцева моря

Fig. 2. Distribution of specific activities of ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K in bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea

Наибольший интерес с точки зрения оценки радиоактивности акватории Баренцева моря представляет радионуклид ^{137}Cs , являющийся одним из основных компонентов техногенного радионуклидного загрязнения природной среды в Арктике. Так, удельная активность ^{137}Cs в изученных донных осадках варьирует в пределах $<0,5\text{--}3,3$ Бк/кг, при среднем значении 1,9 Бк/кг, что несколько ниже, чем в баренцево-морской акватории в целом (3,2 Бк/кг) [Yakovlev, Puchkov, 2020]. Низкий уровень техногенного радиационного загрязнения донных осадков северо-восточной части Баренцева моря обусловлен как особенностями гидродинамики (разрыв поверхностного слоя осадка течениями) и низкой скоростью осадконакопления, характерной для открытых участков моря, так и общим резким снижением поступления техногенных изотопов в морскую среду Арктики. Короткоживущие техногенные радионуклиды, такие как ^{134}Cs и ^{60}Co (периоды полураспада ~ 2 и ~ 5 лет соответственно), в донных осадках не обнаружены, что связано с отсутствием современного внешнего поступления техногенной радиоактивности в изученную часть акватории Баренцева моря.

Обращает на себя внимание пространственное распределение ^{137}Cs в изученном районе. На рис. 2 наблюдается тенденция к повышению его удельной активности в донных осадках, тяготеющих к побережью архипелага Новая Земля, и в северной части района, приближенной к архипелагу Земля Франца-Иосифа. Это, вероятно, связано с тем, что донные осадки вблизи Новой Земли накапливали техногенные радионуклиды в период активных атмосферных ядерных испытаний на Новоземельском полигоне. Как показано в работе [Miroshnikov et al., 2017], основная масса радиоактивных выпадений от взрывов была направлена к северо-востоку, в сторону Северного Ледовитого океана, и проходила непосредственно над северной оконечностью Новой Земли и вдоль ее побережья, а также в сторону архипелага Земля Франца-Иосифа. Именно вдоль этих траекторий фиксируются локальные аномалии повышенной удельной активности ^{137}Cs в донных осадках, что полностью согласуется с полученными данными в настоящей работе.

Физико-химические параметры донных осадков

Донные отложения северо-восточной части Баренцева моря характеризуются преобладанием тонкодисперсных фракций. В большинстве проб доля фракции < 45 мкм (глинистая и тонкая алевритовая составляющая) варьирует

в пределах 20–30 %, достигая в отдельных точках 30–40 %. Крупнообломочные фракции (> 250 мкм) присутствуют в незначительных количествах, в основном не превышая 5 %. Содержание органического вещества, определенное по потерям при прокаливании, в среднем составляет 10–12 %, с тенденцией к увеличению в зонах аккумуляции тонкодисперсного материала и в глубоководных впадинах. Карбонатность осадков (CO_3^{2-}) варьирует в пределах 5–15 %, при этом ее повышенные значения приурочены к районам, испытывающим влияние терригенного сноса с близлежащих островов и архипелагов.

Для выявления особенностей накопления радионуклидов в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря выполнен корреляционный анализ полученных данных: активности радионуклидов, глубины моря и гранулометрического состава (рис. 3).

Статистический анализ результатов

Как видно из корреляционной матрицы, естественные радиоактивные ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K коррелируют между собой на уровне сильной положительной связи. Коэффициенты корреляции в парах $^{226}\text{Ra} - ^{232}\text{Th}$, $^{226}\text{Ra} - ^{40}\text{K}$ и $^{232}\text{Th} - ^{40}\text{K}$ составляют $r = 0,96$; $r = 0,59$ и $r = 0,64$ соответственно. Вероятно, это указывает на общие источники поступления естественных радионуклидов в донные осадки и сходные механизмы сорбции. Подтверждением этого служит наличие значимых положительных корреляционных связей между естественными радионуклидами и физико-химическими параметрами – содержанием органического вещества и карбонатов в донных осадках, а также содержанием глинистых фракций < 45 мкм. Эти результаты подтверждают активную сорбцию естественных радионуклидов на поверхности глинистых минералов, что закономерно. И напротив, эффективность сорбции с увеличением размера фракций донных осадков резко падает. Например, для ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K и фракции осадков 100–250 мкм наблюдается отрицательная корреляционная связь, а для более крупных фракций, от 250 мкм, связь с радионуклидами практически отсутствует.

Важную роль в их накоплении донными осадками также играют органическое вещество и карбонаты, за счет как прямой сорбции, так и, возможно, биологического концентрирования (в случае ^{40}K). При этом примечательной является связь ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K с глубиной моря. Так, для ^{226}Ra и ^{232}Th связь с глубиной характеризуется значимой положительной корреляцией $r = 0,56$ и $0,54$ соответственно. Очевидно,

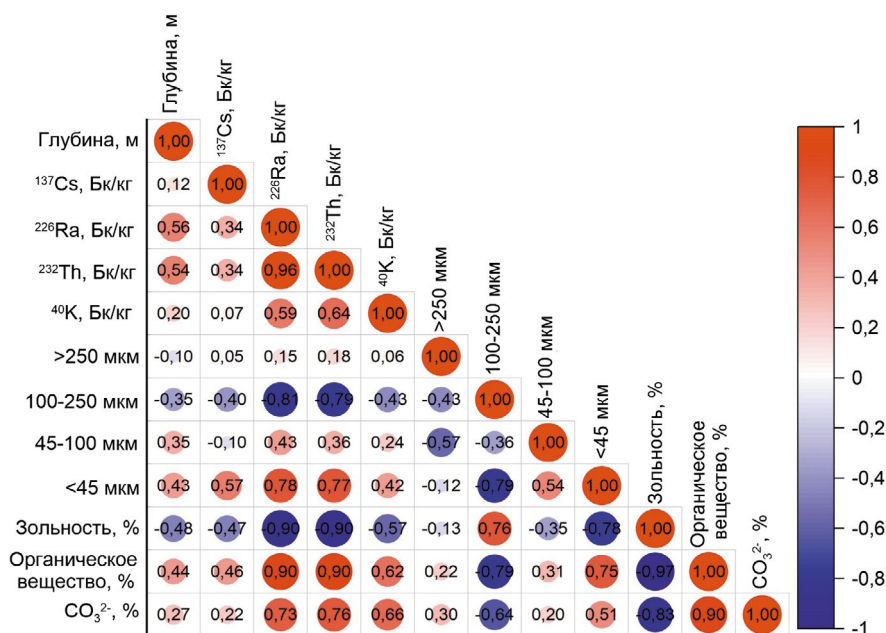


Рис. 3. Корреляционная матрица набора данных по донным осадкам северо-восточной части Баренцева моря. Поскольку распределение выборки является ненормальным (по критерию Колмогорова – Смирнова), данные представлены в виде коэффициента ранговой корреляции Спирмена

Fig. 3. Correlation matrix of the dataset for bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea. Since the sample distribution is not normal (according to the Kolmogorov-Smirnov test), the data are presented as Spearman's rank correlation coefficient

что это обусловлено увеличением фаз-носителей ²²⁶Ra и ²³²Th с увеличением глубины, то есть в основном доли мелкодисперсных фракций и органического вещества. Связь в парах «глубина – фракция < 45 мкм» и «глубина – органическое вещество» характеризуется наличием положительных умеренных корреляций на уровне $r = 0,43$ и $0,44$ соответственно. Однако для ⁴⁰K связи с глубиной моря не наблюдается, что, очевидно, указывает на неравномерное распределение калийсодержащих минералов по фракциям донных осадков [Grigoryev, Vladimirov, 2011]. То есть значимая активность ⁴⁰K может находиться как в глинистых фракциях, например, в составе иллита, так и в более крупнообломочных фракциях в составе, например, полевых шпатов и слюд.

Выявлены корреляционные связи техногенного ¹³⁷Cs с другими рассмотренными параметрами. Так, радиоцезий имеет положительную, близкую к умеренной связь с естественными радионуклидами ²²⁶Ra и ²³²Th ($r = 0,34$), что указывает на общность их геохимического поведения в донных осадках. Это, вероятно, связано с тем, что ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra и ²³²Th являются катионами, склонными к сорбции на глинистых минералах и органическом веществе [Singh, Um, 2023].

Подтверждением связи радиоцезия с этими параметрами является наличие умеренной корреляции в парах «¹³⁷Cs – фракция < 45 мкм» и «¹³⁷Cs – органическое вещество» с коэффициентами корреляции $r = 0,57$ и $0,46$. Связь ¹³⁷Cs с CO₃²⁻ характеризуется как слабая положительная ($r = 0,22$), что указывает на ограниченную сорбционную способность карбонатов по отношению к радиоцезию. Между ¹³⁷Cs и ⁴⁰K также наблюдается слабая положительная связь ($r = 0,20$), что, как говорилось выше, может быть связано с крайне неравномерным распределением ⁴⁰K по фракциям донных осадков. Обращает на себя внимание слабая положительная связь между радиоцезием и глубиной моря ($r = 0,12$). Так, с увеличением глубины, что логично, доля глинистых осадков увеличивается, поскольку глубоководные котловины выступают в качестве ловушек мелкодисперсных осадков [Лисицын, 1991]. Однако в нашем случае глубина моря выступает несущественным фактором распределения ¹³⁷Cs в поверхностном слое донных осадков. По всей видимости, локальные свойства донных осадков (увеличение доли глинистых фракций и органического вещества) в конкретной точке отбора в большей степени определяют накопление радиоцезия.

В целом такая взаимосвязь отмечается в ряде опубликованных работ [Staunton et al., 2002; Zhang et al., 2025].

Таким образом, можно заключить, что для адекватной оценки и прогноза миграции техногенных радионуклидов, таких как ^{137}Cs , в донных осадках арктического шельфа в первую очередь необходимо учитывать локальные литолого-геохимические условия (гранулометрический и минералогический состав, содержание органического вещества), которые могут существенно варьировать даже в пределах одного батиметрического района со схожими отметками глубин.

Оценка параметров радиологической безопасности

Для оценки параметров радиологической безопасности, связанных с естественными радионуклидами, которые присутствуют в отложениях, выполнен расчет различных индексов. В качестве таких индексов, которые часто используются для оценки радиологической безопасности материалов (почвы, донные осадки, горные породы), рассмотрены: 1) поглощенная доза гамма-излучения (D_R), 2) радиевый эквивалент активности (Ra_{eq}) и 3) индекс внешней опасности (H_{ex}) [UNSCEAR..., 2000].

Расчет поглощенной дозы гамма-излучения D_R выполнен согласно рекомендациям МАГАТЭ [UNSCEAR..., 2000]:

$$D_R = 0,462C_{Ra} + 0,604C_{Th} + 0,042C_K,$$

где D_R – мощность поглощенной дозы в нГр/ч, а C_{Ra} , C_{Th} и C_K – удельная активность ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в Бк/кг.

Радиевый эквивалент активности Ra_{eq} определялся в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [Exposure..., 1979]:

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1,43C_{Th} + 0,07C_K,$$

где Ra_{eq} – радиевый эквивалент активности, C_{Ra} , C_{Th} и C_K – удельная активность ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в Бк/кг.

Индекс внешней опасности H_{ex} , который характеризует опасность внешнего гамма-излучения, определялся согласно формуле из работы [IAEA..., 2013]:

$$Ra_{eq} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \leq 1,$$

где H_{ex} – индекс внешней опасности, C_{Ra} , C_{Th} и C_K – удельная активность ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в Бк/кг. Данный индекс применяется для ограничения дозы облучения в 1 мЗв/год [IAEA..., 2013].

Данные расчета индексов радиологической безопасности представлены в табл. 2 в виде минимальных, максимальных и средних значений для донных осадков северо-восточной части Баренцева моря. Так, индекс D_R для донных осадков северо-восточной части Баренцева моря варьирует в диапазоне от 37,4 до 68,6 нГр/ч, среднее значение составляет 54,2 (табл. 2). Видно, что среднее значение D_R ниже среднемировых значений согласно [UNSCEAR..., 2000].

Значение радиевого эквивалента активности Ra_{eq} для донных осадков варьирует в пределах 71,4–137,6 Бк/кг при средней величине 107,0 Бк/кг (табл. 2). Как видно из представленных данных, индекс Ra_{eq} не превышает максимального значения 370 Бк/кг, установленного Агентством по ядерной энергетике [Exposure..., 1979].

Рассчитанное значение индекса H_{ex} в донных осадках изменяется от 0,20 до 0,39 при среднем значении 0,30 (табл. 2). Для всех изученных проб донных осадков индекс внешней опасности значительно ниже 1, что говорит о дозе облучения меньше допустимого предела 1 мЗв/год.

Таблица 2. Параметры расчетных индексов радиологической безопасности донных отложений северо-восточной части Баренцева моря

Table 2. Parameters of calculated radiological safety indices for bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea

Параметр Index	D_R , нГр/ч D_R , nGy/h	Ra_{eq} , Бк/кг Ra_{eq} , Bq/kg	H_{ex} , отн. ед. H_{ex} , rel. units
Минимум Minimum	37,4	71,4	0,20
Максимум Maximum	68,6	137,6	0,39
Среднее Average	54,2	107,0	0,30
Среднемировое значение World average value [36] ??	59	370	< 1

Таким образом, на основании представленных расчетных данных по оценке индексов радиационной безопасности можно отметить, что радиозоологические риски от естественных радионуклидов, содержащихся в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря, в настоящее время являются низкими и не представляют угрозы для биоты.

Выводы

Текущий уровень техногенного загрязнения донных отложений северо-восточной части Баренцева моря, оцененный по активности ^{137}Cs , характеризуется как крайне низкий. Это свидетельствует о продолжающемся снижении глобального поступления техногенных радионуклидов в арктическую морскую среду. Отсутствие короткоживущих изотопов (^{134}Cs , ^{60}Co) подтверждает отсутствие современных источников поступления в изученном районе.

Активность природных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K находится в пределах региональных фоновых значений. Относительно высокие значения активности ^{40}K (до 790 Бк/кг) связаны с терригенным материалом, поступающим с побережья Новой Земли, что подтверждается геохимическими данными. Корреляционный анализ показал, что накопление естественных радионуклидов (^{226}Ra и ^{232}Th) тесно связано с содержанием тонкодисперсных фракций (< 45 мкм) и органического вещества в осадках.

В отличие от них накопление ^{40}K не имеет выраженной связи с гранулометрическим составом, что указывает на неравномерное распределение его минералов-носителей по фракциям.

Для техногенного ^{137}Cs характерны сходные с естественными радионуклидами геохимические механизмы накопления: ключевую роль играют локальные условия седиментации и сорбции, тогда как глубина моря не является значимым фактором для его распределения в поверхностном слое осадков. Рассчитанные индексы радиологической безопасности (D_R , Ra_{eq} , H_{ex}) не превышают установленных нормативных пределов, что свидетельствует об отсутствии радиационной угрозы для морских экосистем на современном этапе.

Таким образом, полученные сведения дополняют актуальную базу данных о радиозоологическом состоянии морской среды Арктики. Показано, что морские донные осадки выступают важным архивом естественных и техногенных радионуклидов, делая их приоритетным объектом для последующего мониторинга в контексте потенциальных рисков, связанных с климатическими изменениями и техногенным воздействием. Выявленные закономерности накопления радионуклидов определяют необходимость продолжения системного мониторинга радиозоологического состояния акватории Баренцева моря, учитывая ее уязвимость перед климатическими и антропогенными изменениями в Арктике.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Appendix 1

Координаты точек отбора проб, глубина моря и удельная активность радионуклидов в донных отложениях северо-восточной части Баренцева моря

Sampling point coordinates, depth and radionuclide specific activity in bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea

Шифр пробы Sample code	Координаты Coordinates		Глубина моря, м Sea depth, m	Удельная активность радионуклидов (± погрешность измерения), Бк/кг Radionuclide specific activities (± measurement error), Bq/kg			
	N	E		^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Ст-3	75.36667	54.76667	223	$2,5 \pm 0,5$	$20,3 \pm 2,2$	$28 \pm 2,5$	650 ± 59
Ст-4	75.55000	54.16667	115	$1,3 \pm 0,4$	$17,7 \pm 1,9$	$21 \pm 2,3$	530 ± 48
Ст-5	75.73333	53.56667	130	$< 0,3$	$15,8 \pm 2,5$	$22 \pm 3,1$	660 ± 86
Ст-6	75.93333	52.95000	120	$< 0,5$	$15,1 \pm 1,7$	$21 \pm 2,3$	660 ± 59
Ст-7	76.13333	52.33333	168	$< 0,3$	$12,7 \pm 1,8$	$16,6 \pm 1,7$	610 ± 49
Ст-8	76.26667	51.85000	281	$< 0,4$	$13 \pm 1,4$	$18,6 \pm 1,7$	530 ± 37
Ст-9	76.40000	51.45000	338	$1,3 \pm 0,4$	$21,8 \pm 2,2$	$33 \pm 3,3$	720 ± 65
Ст-10	76.66667	50.58333	349	$2,6 \pm 0,6$	$30 \pm 2,7$	$37 \pm 3,7$	710 ± 57
Ст-11	76.93333	49.61667	329	$1,4 \pm 0,4$	$28,2 \pm 2,5$	$37,1 \pm 3,0$	670 ± 54
Ст-12	77.20000	48.70333	263	$2,1 \pm 0,4$	$23,7 \pm 2,4$	$36 \pm 3,2$	730 ± 66
Ст-13	77.46667	47.76667	239	$1,7 \pm 0,4$	$24,2 \pm 2,4$	$35 \pm 3,9$	720 ± 65

Окончание прил. 1
Appendix 1 (continued)

Шифр пробы Sample code	Координаты Coordinates		Глубина моря, м Sea depth, m	Удельная активность радионуклидов (± погрешность измерения), Бк/кг Radionuclide specific activities (± measurement error), Bq/kg			
	N	E		¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Ст-14	77.68333	46.95667	233	2,1 ± 0,5	25,5 ± 2,3	35 ± 3,5	730 ± 66
Ст-15	77.90000	46.13333	269	1,7 ± 0,5	25,1 ± 2,5	33 ± 3,6	710 ± 64
Ст-16	78.16667	45.16667	297	2,8 ± 0,5	28,6 ± 2,9	39 ± 4,3	680 ± 61
Ст-17	78.43000	44.06000	231	2,3 ± 0,5	25,5 ± 2,6	40 ± 4,0	680 ± 61
Ст-18	78.69167	43.00333	255	< 0,5	22,5 ± 2,0	27,1 ± 2,4	680 ± 54
Ст-19	78.96667	41.95500	449	1,0 ± 0,6	29,3 ± 2,9	39 ± 3,1	750 ± 60
Ст-20	79.00000	42.94000	360	2,2 ± 0,7	24,3 ± 2,2	32,1 ± 2,6	670 ± 54
Ст-21	79.08000	43.79000	238	1,3 ± 0,5	18,9 ± 1,7	23,8 ± 2,1	570 ± 46
Ст-22	79.15000	44.49000	189	< 0,2	13,5 ± 1,6	20,3 ± 2,0	520 ± 42
Ст-23	79.22667	45.41667	88	< 0,4	14 ± 2,2	20 ± 3,2	570 ± 80
Ст-24	79.30833	46.47167	79	< 0,2	10,3 ± 1,4	15,8 ± 1,7	550 ± 50
Ст-25	79.39667	47.42500	265	1,1 ± 0,3	20,7 ± 2,3	29 ± 3,2	710 ± 64
Ст-26	79.49500	48.58000	310	3,0 ± 0,7	23,1 ± 2,3	31 ± 3,1	670 ± 60
Ст-27	79.60000	49.70667	278	3,3 ± 0,6	23,9 ± 2,4	32 ± 3,5	600 ± 54
Ст2-1	78.90200	53.70581	294	1,6 ± 0,8	22,9 ± 2,5	31 ± 2,8	650 ± 52
Ст2-2	78.69333	54.39333	250	1,7 ± 0,4	21,9 ± 2,2	29 ± 3,2	650 ± 59
Ст2-3	78.47393	55.11579	236	2,2 ± 0,5	26,5 ± 2,9	37 ± 3,7	680 ± 61
Ст2-4	78.25946	55.79301	169	1,1 ± 0,7	15,5 ± 1,9	23,4 ± 2,1	610 ± 49
Ст2-5	78.06035	56.38600	176	1,4 ± 0,4	18,3 ± 1,8	24,6 ± 2,7	610 ± 55
Ст2-6	77.92327	56.87098	274	1,3 ± 0,5	20,7 ± 2,1	28,9 ± 2,3	650 ± 52
Ст2-7	77.77667	57.28667	340	< 0,4	14,8 ± 1,9	24,6 ± 2,2	550 ± 44
Ст2-8	77.55833	57.91333	140	< 0,5	13,5 ± 1,8	18,7 ± 1,9	670 ± 54
Ст2-9	77.35000	58.53333	207	< 0,69	13,1 ± 1,4	20,8 ± 2,1	790 ± 71
Ст2-10	77.10289	59.28353	210	1,8 ± 0,5	21,8 ± 2,0	28,4 ± 2,8	680 ± 54
Ст2-11	76.89498	59.88595	252	2,6 ± 0,5	19,5 ± 2,1	29 ± 3,2	690 ± 62
Ст2-12	76.68333	60.50000	270	1,5 ± 0,4	15,6 ± 1,7	22,5 ± 2,3	570 ± 51
Ст2-13	76.53755	60.95939	84	1,8 ± 0,4	21,5 ± 2,2	30,9 ± 2,8	720 ± 65
Ст2-14	76.38622	61.31089	76	1,6 ± 0,5	25,4 ± 2,3	36 ± 3,2	780 ± 70

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Appendix 2

Координаты точек отбора проб, гранулометрический состав, физико-химические параметры в донных отложениях северо-восточной части Баренцева моря

Sampling point coordinates, grain size composition, physicochemical parameters in bottom sediments of the north-eastern part of the Barents Sea

Шифр пробы Sample code	Координаты Coordinates		Гранулометрический состав, % Grain size composition, %									Физико-химические параметры, % Physicochemical parameters, %		
	N	E	>10 мм >10 mm	4	2-4 мм 2-4 mm	1-2 мм 1-2 mm	0,5-1 мм 0.5-1 mm	250 мкм 250 μm	100 мкм 100 μm	45 мкм 45 μm	<45 мкм <45 μm	Зольность Ash content	ОВ* OM*	CO ₃ ²⁻
Ст-3	75.36667	54.76667	0	0	0	0	4,7	17,8	25,6	11,8	40,0	91,64	5,91	1,30
Ст-4	75.55000	54.16667	3,8	4,1	3,8	2,3	2,3	15,5	38,0	12,2	17,8	92,92	5,83	1,90
Ст-5	75.73333	53.56667	0,9	0,2	0,3	0,3	1,3	11,7	57,6	15,2	12,4	94,31	4,63	1,97
Ст-6	75.93333	52.95000	0	0	0,2	0,5	0,2	4,3	60,4	25,5	8,9	95,98	3,26	1,49
Ст-7	76.13333	52.33333	11,9	2,6	2,1	1,4	1,2	8,8	63,2	7,1	1,7	97,83	1,71	0,82
Ст-8	76.26667	51.85000	12,3	3,7	5,4	2,9	3,0	10,2	59,6	2,1	0,9	97,75	1,72	0,72
Ст-9	76.40000	51.45000	0	0	0	0	2,8	16,7	39,6	20,2	20,7	90,61	7,17	2,17
Ст-10	76.66667	50.58333	0	0	0	0	0	25,0	34,3	14,7	26,0	85,17	11,49	4,81
Ст-11	76.93333	49.61667	0	0	0	0	0	24,7	33,0	18,9	23,3	84,83	11,59	4,56
Ст-12	77.20000	48.70333	0	0	0	0	8,3	18,8	25,5	19,6	27,7	84,35	12,34	6,37

Окончание прил. 2
Appendix 2 (continued)

Шифр пробы Sample code	Координаты Coordinates		Гранулометрический состав, % Grain size composition, %										Физико-химические параметры, % Physicochemical parameters, %		
	N	E	>10 мм >10 mm	4	2–4 мм 2–4 mm	1–2 мм 1–2 mm	0,5–1 мм 0.5–1 mm	250 мкм 250 µm	100 мкм 100 µm	45 мкм 45 µm	<45 мкм <45 µm	Зольность Ash content	ОВ* OM*	CO ₃ ²⁻	
Ст-13	77.46667	47.76667	0	0	0	0	0	13,8	32,6	20,3	33,2	87,56	9,56	3,64	
Ст-14	77.68333	46.95667	0	0	0	0	5,5	19,5	29,1	17,1	28,8	87,75	9,45	3,14	
Ст-15	77.90000	46.13333	0	0	0	0	4,3	19,1	31,6	18,2	26,8	85,96	10,06	2,79	
Ст-16	78.16667	45.16667	0	0	0	0	3,3	22,2	30,0	16,1	28,3	84,79	12,20	4,03	
Ст-17	78.43000	44.06000	0	0	0	0	0	11,2	32,8	19,0	37,1	87,74	8,54	2,32	
Ст-18	78.69167	43.00333	0	0	0	0	1,2	9,4	31,4	31,1	26,9	91,17	6,42	1,95	
Ст-19	78.96667	41.95500	0	0	0	0	6,0	23,7	31,8	13,8	24,7	86,41	10,21	3,09	
Ст-20	79.00000	42.94000	0	0	0	0	1,0	10,1	32,9	30,3	25,7	89,90	7,48	2,47	
Ст-21	79.08000	43.79000	0	0	0	0,8	1,1	10,4	44,8	23,7	19,2	92,11	6,02	2,13	
Ст-22	79.15000	44.49000	0	0	0	0	0	12,4	65,3	11,7	10,5	94,19	3,57	0,85	
Ст-23	79.22667	45.41667	0	0	0,3	1,0	2,4	19,9	52,1	12,0	12,4	96,77	2,66	0,70	
Ст-24	79.30833	46.47167	0	0	0,1	0,3	0,3	12,9	79,6	4,7	2,1	97,87	1,69	0,84	
Ст-25	79.39667	47.42500	0	0	0	0	3,1	13,8	29,0	21,7	32,4	90,18	7,83	2,68	
Ст-26	79.49500	48.58000	0	0	0	0	1,9	16,7	32,6	20,5	28,4	87,47	9,13	2,76	
Ст-27	79.60000	49.70667	0	0	0	0	2,1	18,6	31,7	16,6	31,0	86,81	9,67	2,50	
Ст2-1	78.90200	53.70581	0	0	0	0	0,4	9,7	36,8	29,9	23,2	88,34	8,50	3,37	
Ст2-2	78.69333	54.39333	2,8	0,4	0,4	0,5	2,5	16,0	39,4	20,4	17,7	89,99	6,96	1,88	
Ст2-3	78.47393	55.11579	0	0	0,2	0,4	5,8	20,2	28,1	16,1	29,1	86,41	8,89	2,77	
Ст2-4	78.25946	55.79301	0	0	0,5	0,9	0,8	8,6	63,5	13,7	12,2	91,28	4,58	1,55	
Ст2-5	78.06035	56.38600	0	0	0,3	0,3	0,6	11,4	49,9	19,3	18,3	88,54	5,84	1,85	
Ст2-6	77.92327	56.87098	0	0	0	0	0,7	5,9	44,9	28,2	20,3	92,75	5,19	1,67	
Ст2-7	77.77667	57.28667	18,5	4,1	2,9	2,0	3,8	16,5	36,4	8,1	7,7	94,68	3,67	1,30	
Ст2-8	77.55833	57.91333	4,1	1,6	0,8	1,2	1,8	13,5	69,0	6,6	1,3	96,41	3,12	1,05	
Ст2-9	77.35000	58.53333	0	0	0	0	0,5	2,6	81,5	10,4	5,1	94,13	4,45	2,55	
Ст2-10	77.10289	59.28353	0	0	0	0	0,5	11,9	27,4	30,6	29,6	90,27	7,65	2,46	
Ст2-11	76.89498	59.88595	0	0	0	0	1,7	20,7	31,9	14,3	31,4	85,77	11,40	3,66	
Ст2-12	76.68333	60.50000	2,4	0,4	1,1	1,3	1,9	11,5	52,9	14,7	13,7	92,54	6,05	1,76	
Ст2-13	76.53755	60.95939	14,1	16,9	3,8	3,0	4,7	18,2	14,5	7,7	17,1	88,13	9,81	4,47	
Ст2-14	76.38622	61.31089	7,0	6,3	5,5	2,7	10,5	23,3	20,6	8,8	15,3	88,12	10,26	4,48	

Примечание. *Органическое вещество, определенное по потерям при прокаливании (%).

Note. *Organic matter determined by loss on ignition (%).

Литература

Башмакова Е. П., Ульченко М. В. Развитие Северного морского пути и инфраструктуры арктической транспортной системы // Региональные проблемы преобразования экономики. 2019. № 12(110). С. 1–8. doi: 10.26726/1812-7096-2019-12-88-96

Величкин В. И., Воробьева Т. А., Евсеев А. В., Мирошников А. Ю. Радиоэкологическая ситуация и радиогеохимическое районирование северо-западных территорий России // Доклады Академии наук. 2013. Т. 453, № 3. С. 314–318. doi: 10.7868/S0869565213330220

Дибнер В. Д., Крылов А. Я. Абсолютный возраст терригенных компонентов верхнетриасовых юрских отложений Земли Франца-Иосифа и данные об источниках сноса их терригенного материала // Доклады АН СССР. 1970. Т. 191, № 6. С. 1361–1364.

Кобылянский В. В., Казеннов А. Ю., Кикнадзе О. Е. Подводные захоронения радиоактивных отходов в Арктике. Какова реальная угроза? // Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана: Сб. мат-лов 2-й Всерос. научн.-технич. конф. Новосибирск, 2012. С. 27–45.

Лисицын А. П. Процессы терригенной седиментации в морях и океанах. М.: Наука, 1991. 270 с.

Матишов Г. Г., Касаткина Н. Е., Усягина И. С. Техногенная радиоактивность вод центрального полярного бассейна и смежных акваторий Арктики // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485, № 1. С. 93–98. doi: 10.31857/S0869-5652485193-98

Мирошников А. Ю. Покровный ледник Северного острова (архипелаг Новая Земля) – новый источник радиоактивности в Арктике // Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген: Мат-лы конф. М., 2018. С. 1–5.

- Назаров В. И., Григорьев Г. А., Краснов О. С., Медведева Л. В. Экономическая оценка углеводородной сырьевой базы арктического шельфа России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2021. № 1. С. 1–22. doi: 10.17353/2070-5379/9_2021
- Никитин Д. С., Хуторской М. Д., Иванов Д. А., Горских П. П. Глубинное строение и нефтегазоносность северо-восточной части Баренцевоморского шельфа. М.: ГЕОС, 2020. 147 с.
- Пилясов А. Н., Котов А. В. Российская Арктика-2035: полимасштабный прогноз // Экономика региона. 2024. № 2. С. 1–15. doi: 10.17059/ekon.reg.2024-2-3
- Саркисов А. А., Сивинцев Ю. В., Высоцкий В. Л., Никитин В. С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиоэкологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей. М.: ИБРАЭ РАН, 2015. 320 с.
- Сивинцев Ю. В. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
- Сыч Ю. Г., Дубинко Л. В. Радиоэкологическая обстановка на архипелаге Новая Земля // Арктика. Экология и экономика. 2012. Т. 1, № 5. С. 48–59.
- Трапезников А. В. Миграция радионуклидов в пресноводных экосистемах. Екатеринбург: Уральский ун-т, 2007. 250 с.
- AMAP Assessment 2015: Radioactivity in the Arctic. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2016. 89 p.
- Dowdall M., Lepland A. Elevated levels of radium-226 and radium-228 in marine sediments of the Norwegian Trench ("Norskerenna") and Skagerak // Mar. Pollut. Bull. 2012. No. 64. P. 2069–2076.
- Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Report by an NEA Group of Experts. Paris: OECD Publ., 1979. 34 p.
- Evaluation of guidelines for exposures to technologically enhanced naturally occurring radioactive materials committee on evaluation of EPA guidelines for exposure to naturally occurring radioactive material. Washington (DC): National Academies Press; 1999. 294 p.
- Grigoryev A., Vladimirov M. The basic patterns of the distribution, migration and accumulation of radionuclides in the bottom sediment of the Baltic Sea // Baltic Region. 2011. Vol. 1. P. 54–60. doi: 10.5922/2079-8555-2011-1-7
- Gwynn J. P., Dowdall M., Lind B. The radiological environment of Svalbard. Strålevern Rapport 2004:2. Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority, 2004.
- Gwynn J. P., Hatje V., Casacuberta N. The effect of climate change on sources of radionuclides to the marine environment // Commun. Earth Environ. 2024. Vol. 5. Art. 135. doi: 10.1038/s43247-024-01241-w
- IAEA. Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides. Safety standards series. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013. 117 p.
- IAEA. Radioactivity in the Arctic seas. Vienna: IAEA, 1999. 75 p.
- Ilin G. V., Kasatkina N. E., Moiseev D. V., Usyagina I. S. Infrastructure objects of the nuclear fleet as sources of radioactive contamination of the Barents Sea: waste repository in Guba Andreeva // Atomic Energy. 2017. Vol. 2. P. 131–137. doi: 10.1007/s10512-017-0247-7
- Kwiatkowski L., Torres O., Bopp L., Aumont O., Chamberlain M., Christian J. R., Dunne J. P., Gehlen M., Ilyina T., John J. G., Lenton A., Li H., Lovenduski N. S., Orr J. C., Palmieri J., Santana-Falcón Y., Schwinger J., Séférian R., Stock C. A., Tagliabue A., Takano Y., Tjiputra J., Toyama K., Tsujino H. Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections // Biogeosci. 2020. Vol. 17. P. 3439–3470. doi: 10.5194/bg-17-3439-2020
- Lokas E., Mietelski J. W., Ketterer M. E., Kleszcz K., Wachniew P., Michalska S., Miecznik M. Sources and vertical distribution of ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in peat profiles from southwestern Spitsbergen // Appl. Geochem. 2013. Vol. 28. P. 100–108. doi: 10.1016/j.apgeochem.2012.10.027
- Matishov D. G., Matishov G. G. Radioecology in Northern European Seas. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 335 p.
- Matishov G. G., Matishov D. G., Usyagina I. S., Kasatkina N. E. Long-term dynamics of radioactive contamination in the Barents-Kara region (1960–2013) // Doklady Earth Sciences. 2014. Vol. 458, no. 4. P. 473–479.
- Matishov G. G., Matishov D. G., Usyagina I. S., Kasatkina N. E., Pavelskaya E. V. Assessment of ^{137}Cs and ^{90}Sr fluxes in the Barents Sea // Doklady Earth Sciences. 2011. Vol. 439, no. 2. P. 1190–1195.
- Miroshnikov A. Yu., Laverov N. P., Chernov R. A., Kudikov A. V., Ysacheva A. A., Semenov I. N., Aliev R. A., Asadulin E. E., Gavrilov M. V. Radioecological investigations on the Northern Novaya Zemlya Archipelago // Oceanology. 2017. Vol. 1. P. 204–214. doi: 10.1134/S000143701701009X
- Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier, 2014. 51 p.
- Saniewski M., Borszcz T. ^{90}Sr and ^{137}Cs in Arctic echinoderms // Mar. Pollut. Bull. 2017. Vol. 124, iss. 1. P. 563–568. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.07.068
- Singh B. K., Um W. Application of clay materials for sorption of radionuclides from waste solutions // Minerals. 2023. Vol. 13. Art. 239. doi: 10.3390/min13020239
- Skancke J., Nordam T. Long-term fate of Ra-226 originating from offshore produced water discharges. Trondheim: SINTEF, 2016. 23 p.
- Staunton S., Dumat C., Zsolnay A. Possible role of organic matter in radiocaesium adsorption in soils // J. Environ. Radioact. 2002. Vol. 58, no. 2–3. P. 163–173. doi: 10.1016/S0265-931X(01)00064-9
- UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations, 2000. (Report to the General Assembly with Annexes).
- Valentine P. Sediment classification and the characterization, identification, and mapping of geologic substrates for the glaciated Gulf of Maine seabed and other terrains, providing a physical framework for ecological research and seabed management: U.S. Geological

Survey Scientific Investigations Report 2019–5073. 2019. 37 p. doi: 10.3133/sir20195073

Yakovlev E., Puchkov A. Assessment of current natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the bottom sediments from the Barents Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2020. Vol. 160. Art. 111571. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111571

Zaborska A. Sources of ^{137}Cs to an Arctic fjord (Hornsund, Svalbard) // *J. Environ. Radioact.* 2017. Vol. 180. P. 19–26. doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.021

Zhang F., Huang D., Liu J., Zhong Q., Chen G., Du J., Zhang J., Yu T. Spatiotemporal variation and transport of ^{137}Cs in the Beibu Gulf // *Mar. Pollut. Bull.* 2025. Vol. 212. Art. 117505. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.117505

References

AMAP Assessment 2015: Radioactivity in the Arctic. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme; 2016. 89 p.

Bashmakova E. P., Ul'chenko M. V. Development of the Northern Sea Route and infrastructure of the Arctic transport system. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki = Regional Problems of Economic Transformation*. 2019;12(110):1–8. (In Russ.). doi: 10.26726/1812-7096-2019-12-88-96

Dibner V. D., Krylov A. Ya. Absolute age of terrigenous components of the Upper Triassic–Jurassic deposits of Franz Josef Land and data on sources of terrigenous material. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceed. of the USSR Academy of Sciences*. 1970;191(6): 1361–1364. (In Russ.)

Dowdall M., Lepland A. Elevated levels of radium-226 and radium-228 in marine sediments of the Norwegian Trench (“Norskerenna”) and Skagerak. *Mar. Pollut. Bull.* 2012;64:2069–2076.

Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Report by an NEA Group of Experts. Paris: OECD Publ.; 1979. 34 p.

Evaluation of guidelines for exposures to technologically enhanced naturally occurring radioactive materials committee on evaluation of EPA guidelines for exposure to naturally occurring radioactive material. Washington (DC): National Academies Press; 1999. 294 p.

Grigoryev A., Vladimirov M. The basic patterns of the distribution, migration and accumulation of radionuclides in the bottom sediment of the Baltic Sea. *Baltic Region*. 2011;1:54–60. doi: 10.5922/2079-8555-2011-1-7

Gwynn J. P., Dowdall M., Lind B. The radiological environment of Svalbard. Strålevern Rapport 2004:2. Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority; 2004.

Gwynn J. P., Hatje V., Casacuberta N. The effect of climate change on sources of radionuclides to the marine environment. *Commun. Earth Environ.* 2024;5:135. doi: 10.1038/s43247-024-01241-w

IAEA. Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides. Safety standards series. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 117 p.

IAEA. Radioactivity in the Arctic seas. Vienna: IAEA; 1999. 75 p.

Ilin G. V., Kasatkina N. E., Moiseev D. V., Usyagina I. S. Infrastructure objects of the nuclear fleet as sources of radioactive contamination of the Barents Sea: waste repository in Guba Andreeva. *Atomic Energy*. 2017;2:131–137. doi: 10.1007/s10512-017-0247-7

Kobylyanskii V. V., Kazennov A. Yu., Kiknadze O. E. Underwater disposal of radioactive waste in the Arctic. What is the real threat? *Nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie issledovaniy i osvoeniya shel'fa Severnogo Ledovitogo okeana: Sb. mat-lov 2-i Vseros. nauchn.-tekhnich. konf. = Scientific and technical support for research and development of the Arctic Ocean shelf: Proceed. 2nd All-Russ. scientific and technical conf.* Novosibirsk; 2012. P. 27–45. (In Russ.)

Kwiatkowski L., Torres O., Bopp L., Aumont O., Chamberlain M., Christian J. R., Dunne J. P., Gehlen M., Ilyina T., John J. G., Lenton A., Li H., Lovenduski N. S., Orr J. C., Palmieri J., Santana-Falcón Y., Schwinger J., Séférian R., Stock C. A., Tagliabue A., Takano Y., Tjiputra J., Toyama K., Tsujino H. Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. *Biogeosci.* 2020;17:3439–3470. doi: 10.5194/bg-17-3439-2020

Lisitsyn A. P. Processes of terrigenous sedimentation in seas and oceans. Moscow: Nauka; 1991. 270 p. (In Russ.)

Lokas E., Mielinski J. W., Ketterer M. E., Kleszcz K., Wachniew P., Michalska S., Miecznik M. Sources and vertical distribution of ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in peat profiles from southwestern Spitsbergen. *Appl. Geochem.* 2013;28:100–108. doi: 10.1016/j.apgeochem.2012.10.027

Matishov G. G., Kasatkina N. E., Usyagina I. S. Technogenic radioactivity of waters of the central Arctic basin and adjacent water areas. *Doklady Earth Sciences*. 2019; 485(1):288–292. doi: 10.1134/S1028334X19030073

Matishov D. G., Matishov G. G. Radioecology in Northern European Seas. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2004. 335 p.

Matishov G. G., Matishov D. G., Usyagina I. S., Kasatkina N. E. Long-term dynamics of radioactive contamination in the Barents-Kara region (1960–2013). *Doklady Earth Sciences*. 2014;458(4):473–479.

Matishov G. G., Matishov D. G., Usyagina I. S., Kasatkina N. E., Pavelskaya E. V. Assessment of ^{137}Cs and ^{90}Sr fluxes in the Barents Sea. *Doklady Earth Sciences*. 2011;439(2):1190–1195.

Miroshnikov A. Yu. Cover glacier of the North Island (Novaya Zemlya Archipelago) – a new source of radioactivity in the Arctic. *Itogi ehkspeditsionnykh issledovaniy v 2018 godu v Mirovom okeane, vnutrennikh vodakh i na arkhipelage Shpitsbergen: Mat-ly konf. = Results of field research in 2018 in the World Ocean, inland waters, and on the Spitsbergen Archipelago: Proceed. conf.* Moscow; 2018. P. 1–5. (In Russ.)

Miroshnikov A. Yu., Laverov N. P., Chernov R. A., Kudikov A. V., Ysacheva A. A., Semenov I. N., Aliev R. A., Asadulin E. E., Gavrilov M. V. Radioecological investigations on the Northern Novaya Zemlya Archipelago. *Oceanology*. 2017;1:204–214. doi: 10.1134/S000143701701009X

Nazarov V. I., Grigor'ev G. A., Krasnov O. S., Medvedeva L. V. Economic assessment of the petroleum resource resources bearing Russian Arctic shelf. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Oil and Gas Geology: Theory and Practice*. 2021;1:1–22. (In Russ.). doi: 10.17353/2070-5379/9_2021

Nikitin D. S., Khutorskoy M. D., Ivanov D. A., Gorsikh P. P. Deep structure and oil and gas potential of the Barents Sea shelf north-eastern part. Moscow: GEOS; 2020. 147 P. (In Russ.)

Pilyasov A. N., Kotov A. V. Russian Arctic-2035: multi-scale forecast. *Ekonomika regiona = Regional Economy*. 2024;2:1–15. (In Russ.). doi: 10.17059/ekon.reg.2024-2-3

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier; 2014. 51 p.

Saniewski M., Borszcz T. ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in Arctic echinoderms. *Mar. Pollut. Bull.* 2017;124(1):563–568. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.07.068

Sarkisov A. A., Sivintsev Yu. V., Vysotskii V. L., Nikitin V. S. *The atomic legacy of the Cold War at the bottom of the Arctic. Radioecological and technical and economic problems of radiation rehabilitation of the seas*. Moscow: IBRAE RAN; 2015. 320 p. (In Russ.)

Singh B. K., Um W. Application of clay materials for sorption of radionuclides from waste solutions. *Minerals*. 2023;13(239). doi: 10.3390/min13020239

Sivintsev Yu. V. et al. Technogenic radionuclides in the seas surrounding Russia. Moscow: IzdAT; 2005. 624 p. (In Russ.)

Skancke J., Nordam T. Long-term fate of Ra-226 originating from offshore produced water discharges. Trondheim: SINTEF; 2016. 23 p.

Staunton S., Dumat C., Zsolnay A. Possible role of organic matter in radiocaesium adsorption in soils.

J. Environ. Radioact. 2002;58(2-3):163–173. doi: 10.1016/S0265-931X(01)00064-9

Sych Yu. G., Dubinko L. V. Radioecological situation on the Novaya Zemlya archipelago. *Arktika. Ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2012;1(5): 48–59. (In Russ.)

Trapeznikov A. V. *Radionuclide migration in freshwater ecosystems*. Yekaterinburg: Ural'skii un-t; 2007. 250 p. (In Russ.)

UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations; 2000. (Report to the General Assembly with Annexes).

Valentine P. Sediment classification and the characterization, identification, and mapping of geologic substrates for the glaciated Gulf of Maine seabed and other terrains, providing a physical framework for ecological research and seabed management: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2019–5073. 2019. 37 P. doi: 10.3133/sir20195073

Velichkin V. I., Miroshnikov A. Y., Vorobyova T. A., Evseev A. V. Radioecological environment and radio-geochemical regionalization of Northwestern Russia. *Doklady Earth Sciences*. 2013;453(1):1154–1157. doi: 10.1134/S1028334X13110226

Yakovlev E., Puchkov A. Assessment of current natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the bottom sediments from the Barents Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 2020;160:111571. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111571

Zaborska A. Sources of ¹³⁷Cs to an Arctic fjord (Hornsund, Svalbard). *J. Environ. Radioact.* 2017;180: 19–26. doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.021

Zhang F., Huang D., Liu J., Zhong Q., Chen G., Du J., Zhang J., Yu T. Spatiotemporal variation and transport of ¹³⁷Cs in the Beibu Gulf. *Mar. Pollut. Bull.* 2025; 212:117505. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.117505

Поступила в редакцию / received: 22.04.2026; принята к публикации / accepted: 15.07.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Яковлев Евгений Юрьевич

канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией экологической радиологии

e-mail: yakov24lev99@mail.ru

Пучков Андрей Викторович

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической радиологии

e-mail: andrey.puchkov.fcicarctic@internet.ru

Липкина Ангелина Евгеньевна

магистрант кафедры геоэкологии

e-mail: lina.lipkina.01@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Yakovlev, Evgeny

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Laboratory

Puchkov, Andrey

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Lipkina, Angelina

Master's Student