

DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-264-273
УДК 551.46(268.45)+574.4+546.027

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ФОРМИРОВАНИИ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА МОРСКОЙ СРЕДЫ В ПРИБРЕЖЬЕ МУРМАНА (БАРЕНЦЕВО МОРЕ)

Г. В. Ильин, И. С. Усягина

Мурманский морской биологический институт РАН (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 15 июля 2025 г.

Для цитирования

Ильин Г. В., Усягина И. С. Новые данные о формировании радиоэкологического статуса морской среды в прибрежье Мурмана (Баренцево море) // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 2. — С. 264—273. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-264-273.

Приведены результаты радиоэкологических исследований Мурманского побережья в 2021–2023 гг. Установлен современный уровень загрязнения морской среды радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr . Указаны главные причины его неравномерности. Местные источники создают повышенную концентрацию радиоизотопов в Варангер-фьорде, Мотовском и Кольском заливах. В водной массе содержание ^{137}Cs местами увеличивается до $3,8 \text{ Бк/м}^3$, а ^{90}Sr — до 7 Бк/м^3 при средних значениях $1,7$ и $3,0 \text{ Бк/м}^3$ соответственно. В донных осадках максимальное содержание ^{137}Cs достигает 6 Бк/кг , а ^{90}Sr — 4 Бк/кг при средних значениях для побережья $2,5$ и $1,7 \text{ Бк/кг}$ соответственно. Современный уровень загрязнения не носит характера инцидентов.

Ключевые слова: морская прибрежная зона, радионуклиды, источники радиации, донные отложения, океанографические условия, Кольский полуостров, Мурманский берег.

Введение

Современный этап промышленного освоения морской и прибрежной Арктики протекает при уже накопленной здесь радиационной опасности. Техногенные радионуклиды поступали в Баренцево море вследствие испытаний ядерного оружия на полигонах архипелага Новая Земля в 1955—1963 гг. и притока североатлантических вод, загрязненных сбросами радиохимических предприятий Великобритании и Франции, что привело к значительному увеличению содержания ^{137}Cs в воде в 1980-х годах [1—4]. Пик таких поступлений приходился на 1980-е годы и дополнялся позже глобальными атмосферными выпадениями в результате различного рода ядерных инцидентов, в том числе аварии на Чернобыльской АЭС. В настоящее время сбросы радиохимических предприятий многократно снижены, однако поступления радионуклидов продолжают в результате плановых и аварийных сбросов предприятий и энергетических установок, воздушных вы-

падений, связанных с глобальным перераспределением радиоактивных веществ, попавших в высокие слои атмосферы [2; 5].

Кроме того, в регионе действуют факторы отложенного риска. К ним можно отнести береговую инфраструктуру атомного флота, включающую хранилища радиоактивных отходов, технические базы обслуживания и ремонта. Более всего высок риск последствий утечки радиоизотопов из хранилищ ядерных отходов в губах Андреева, Оленья, Сайда, Гремиха (Йоканьский рейд). Риск загрязнения создается также в результате операций по эвакуации отработавшего ядерного топлива из хранилищ в губах Андреева и Гремиха на предприятия их переработки вглубь России.

В то же время прибрежная зона Кольского полуострова и Мурманского берега в частности отличается от открытых морских акваторий высокой социальной и хозяйственной востребованностью. Здесь размещены инфраструктура торговых и военных портов, промышленное производство. Развиты аквакультура, рыбодобывающая и перерабатывающая дея-

© Ильин Г. В., Усягина И. С., 2026

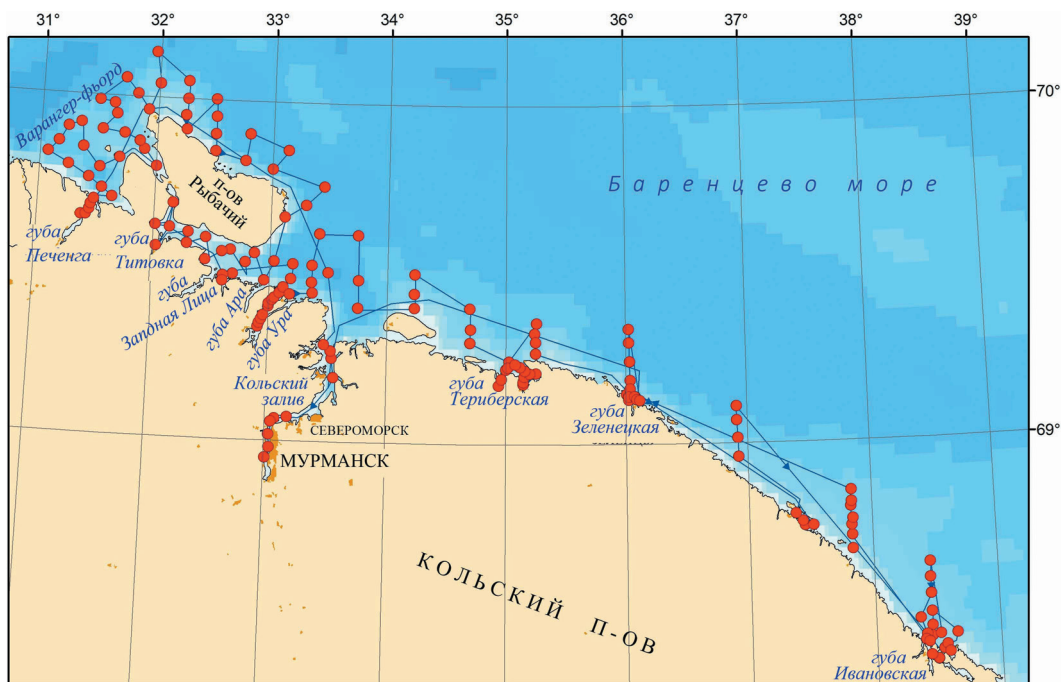


Рис. 1. Район океанографических и радиоэкологических исследований 2021–2023 гг. Для этой и последующих схем использованы батиметрические данные с привязкой к сетке для района Северного Ледовитого океана (IBCAO) из цифрового атласа GEBCO (версия 2.12)

Fig. 1. Oceanographic and radioecological research area of 2021–2023. Gridded bathymetric data for the Intercontinental Chamber of the Arctic Ocean (IBCAO) from the GEBCO digital atlas (version 2.12) were used for this and subsequent schemes

тельность. Чрезвычайно быстро развиваются туризм и акватуризм с центрами в населенных пунктах Терiberка, Дальние Зеленцы, на полуострове Рыбачий.

Основными дозообразующими техногенными радионуклидами в морской экосистеме являются изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr , период полураспада которых составляет приблизительно 30 лет. Они хорошо растворяются в воде, высокотоксичны и легко встраиваются в метаболические процессы гидробионтов. Анализ содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr является одной из приоритетных задач при изучении радиоэкологической ситуации в Баренцевом море.

Современных публикаций, рассматривающих закономерности накопления и распределения радионуклидов в пространстве открытого прибрежья и отдельных губ вблизи объектов атомной инфраструктуры недостаточно [6–9], а множество потенциальных источников радиоактивного излучения на Кольском полуострове требует постоянного контроля состояния морской среды. Поэтому расширенное изучение этого района привлекает внимание в первую очередь разнообразием потенциальных источников радиоактивных веществ и неравномерностью их расположения.

В связи с этим наши исследования имели цель получить актуальные данные и составить концептуальную основу формирования радиоэкологического фона в воде и донных отложениях прибрежной зоны Мурманского берега, выяснить тенденции в динамике накопления радионуклидов.

Материалы и методы исследований

В работе использованы материалы радиоэкологических и океанографических исследований 2021–2023 гг. в открытых водах прибрежной зоны и в ряде крупных губ и заливов Кольского прибрежья. Пробы морской воды и донных отложений для исследования открытых вод прибрежной зоны отбирали в экспедиции научно-исследовательского судна «Дальние Зеленцы» Мурманского морского биологического института (ММБИ) РАН в июле 2021 г. Кроме того, были выполнены наблюдения за гидрологическими характеристиками вод и элементами гидрологического режима прибрежной области. Измерены температура и соленость воды, проведена идентификация водных масс. Радиоэкологические исследования литорали некоторых губ Мурманского прибрежья (Печенги, Ура, Терiberской, Зеленецкой) проводили в береговых экспедициях 2022–2023 гг. Район океанографических и радиоэкологических исследований, точки отбора проб воды и донных отложений показаны на рис. 1 и обзорных тематических картах-схемах. Для создания карт-схем были использованы батиметрические данные с привязкой к сетке для района Северного Ледовитого океана (IBCAO) из цифрового атласа GEBCO, версия 2.12 (открытый доступ).

При анализе вновь полученных материалов для полноты представлений о характере радиационного загрязнения привлечены данные предшествующих наблюдений 2017–2018 гг. о распределении

Таблица 1. Концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и донных отложениях прибрежной зоны Кольского полуострова

Table 1. Concentrations of ^{137}Cs and ^{90}Sr in water and bottom sediments of the coastal zone of the of the Kola Peninsula

Показатель	Активность радионуклидов			
	Вода, Бк/м ³		Донный осадок, Бк/кг	
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
Среднее значение	1,67	3,03	2,51	1,67
Минимум	0,71	0,27	0,60	0,52
Максимум	3,8	7,24	6,30	3,9
Ошибка среднего	0,15	0,32	0,61	0,19
Стандартное отклонение	0,46	1,70	2,03	1,03
Счет (n)	25	28	26	29

^{90}Sr и ^{137}Cs в воде и донных отложениях прибрежья, а также литературные данные [8].

Сбор и обработку материалов осуществляли общепринятыми в международной практике методами в соответствии со стандартными гидрометеорологическими наставлениями. Термохалинные характеристики водной массы были измерены в режиме профилирования STD-зондом «SEACATSBE 19 plus» (Sea-Bird Electronics, США). Соленость воды выражена в единицах практической солености (е. п. с.).

Пробы донных отложений отобраны с помощью дночерпателя Ван Вина. Чтобы обеспечить условия отбора современного осадка из дночерпательной пробы, отбирался верхний полужидкий слой 0—2 см [10]. Точки отбора проб показаны далее на картах-схемах распределения радионуклидов. До измерений пробы хранили в пластиковых контейнерах при температуре ниже 0°C. В ходе предварительной подготовки образцы были взвешены, высушены до постоянной массы при температуре ниже 105°C. Сухие отложения измельчали и просеивали через металлическое сито для удаления грубого обломочного материала. Удельную активность ^{137}Cs измеряли в геометрии «банка» (объем 0,1 л) непосредственно на гамма-спектрометрической установке.

Пробы поверхностной морской воды объемом 100 л для определений радиоизотопов цезия отбирали на океанографических станциях с помощью насоса в емкость сорбционной установки. Затем воду пропускали через сорбционную колонку с целлюлозным неорганическим сорбентом «анфеж», который высушивали перед проведением измерений при температуре ниже 105°C. Результаты выражены в Бк/м³.

Для определения объемной активности ^{90}Sr в пробу воды объемом 20 л добавляли карбонат кальция, который формировал осадок, содержащий катионы II группы, включая Sr^{2+} . Осадок подвергали очистке от посторонних радионуклидов кислотным выщелачиванием с последовательным многостадийным

осаждением для получения раствора, содержащего ^{90}Sr без примесей. Полученный раствор выдерживали в течение 14 суток до установления равновесия между ^{90}Sr и его дочерним радионуклидом ^{90}Y .

Измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в сорбенте «анфеж» и в образцах донных отложений проводили методом гамма-спектрометрии на установках InSpector-2000 и b13237 (Canberra, США). Градуировка спектрометров выполнена с помощью объемных мер специального назначения с наполнителями плотностью 0,2—1,65 г/см³. Обработку спектров, идентификацию радионуклидов, расчеты активности выполняли

с помощью программного обеспечения Genie-2000 (версия 3.3). Время измерения образцов составляло 12—24 ч. Диапазон измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в счетном образце составляет 0,1—1·10⁸ Бк. Суммарная стандартная неопределенность измерений составляет 5—35% и зависит от времени измерения. Нижний предел детектируемой активности ^{137}Cs при экспозиции 5 ч составляет 0,2 Бк/кг.

Следует отметить, что в гамма-спектрах проб донных отложений достоверно не были обнаружены следы других техногенных гамма-излучающих радиоизотопов — ^{60}Co , ^{154}Eu , ^{134}Cs , которые фиксировались при наблюдениях 1990-х годов [1; 2; 5; 11; 12].

Удельную активность ^{90}Sr в счетных образцах после радиохимического концентрирования в пробах воды и донных отложений определяли по измеренной активности ^{90}Y на сцинтилляционной установке LS 6500 (Beckman Coulter, Inc., США). Доверительную погрешность измерения объемной активности определяемых радионуклидов в пробе рассчитывали с учетом неисключенных остатков систематической и случайной погрешности измерения. Диапазон измерений удельной активности ^{90}Sr в измеряемых образцах составляет 1—1000 Бк/кг. Доверительная погрешность на границах диапазона — ±30—10%, нижний предел детектируемой активности — 1 Бк/кг.

Результаты радиометрического анализа активности ^{137}Cs и ^{90}Sr

Результаты радиометрического анализа поверхностного слоя воды и верхнего осадочного слоя в прибрежье Мурмана, детализация данных в точках отбора проб представлены в табл. 1 и на картах-схемах далее по тексту. Для анализа закономерностей распределения ^{90}Sr были привлечены материалы более ранних исследований 2017—2018 гг. из-за ограниченности данных 2021—2023 гг.

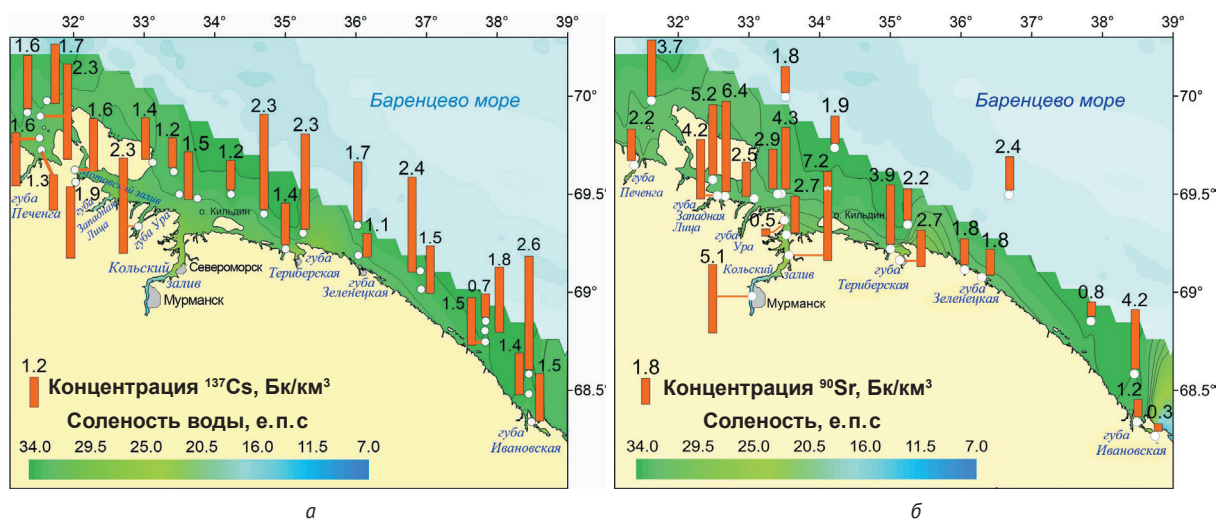


Рис. 2. Распределение объемной активности ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б) в верхнем слое воды Мурманского прибрежья в поле солёности. По материалам 2021–2023 гг.
 Fig. 2. Distribution of the volumetric activity ^{137}Cs (a) and ^{90}Sr (б) in the upper water layer of the Murmansk coast in the salinity field. Based on materials from 2021–2023

Можно констатировать, что средние концентрации радионуклидов в воде и донных отложениях соответствуют таковым для Баренцева моря [8; 11; 12]. Таким образом, подтверждается, что основной фон радионуклидного загрязнения морской среды создает поток вод из Норвежского моря и Северной Атлантики [1]. В прибрежной зоне, как и в морском бассейне в целом, радиоактивные вещества распространяются струями трансграничных течений и смешиваются с местными водами материкового стока. Важную, даже основную роль в перемешивании вод, диссипации и перераспределении поступающих в прибрежье радиоактивных загрязнителей играют гидрофронты, образующиеся при взаимодействии потоков [5; 7; 8]. Атлантические потоки и береговые воды формируют целую систему таких гидрофронтов и вихревых течений, как это отражено на картах температуры и солёности воды (рис. 2а, 2б).

В то же время в распределении ^{137}Cs и ^{90}Sr как в воде, так и в донных отложениях отмечены участки относительно повышенного содержания радионуклидов, образование которых связано с влиянием атомной инфраструктуры. Такие участки наиболее выражены в западной части прибрежья — в заливах Мотовский, Кольский, Варангер-фьорд. Для лучшей наглядности общих закономерностей фона радионуклидов на рис. 2 распределение удельной активности ^{137}Cs по наблюдениям 2021 г. показано в поле солёности воды.

Океанографические условия в районе исследований

Морская прибрежная зона идентифицируется как зона взаимодействия моря и суши. В контексте наших исследований ширина прибрежной зоны ограничивается Прибрежным желобом. Вдоль желоба ориентировано теплое Мурманское прибрежное течение, переносящее атлантические воды вдоль

побережья полуострова и определяющее влияние атлантических и норвежских прибрежных вод на экологические условия в изучаемом районе [13–15]. Глубина исследованной прибрежной зоны варьируется в интервале 130–230 м. На отдельных станциях в губах исследования выходят на относительно мелководные участки менее 100 м глубиной и в литоральную зону.

Поток атлантических вод эпизодически подходит близко к берегу и, взаимодействуя с береговым стоком, образует систему вихрей и гидрофронтов, хорошо выраженных как в поле температуры воды, так и в поле солёности [13; 15]. Возникающие таким образом гидродинамические барьерные зоны определяют неравномерность распространения радионуклидов и режим осадконакопления в локальных участках прибрежья. Характерная для лета гидрологическая ситуация в прибрежье Мурмана на примере распределения солёности показана на рис. 2. Воды Мурманского прибрежного течения у берегов Кольского полуострова всегда выделяются высокой солёностью, свойственной атлантическим водам. Однако температура поверхностного слоя в летний период неравномерна и зависит от степени атмосферного прогрева, особенно на относительно мелководных участках [13].

Донные отложения разнообразны по литотипу и слабо изучены [10; 16]. По нашим фрагментарным наблюдениям, в открытой части прибрежья современные донные осадки сложены в основном мелкодисперсным материалом [17]. Доля разнозернистых песков и алевритов существенна (до 35%), однако в осадке преобладает пелитовая фракция — выше 40%. В бухтах валунные отмели и песчаные пляжи чередуются со скальными откосами. Это обуславливает значительную долю песка и неравномерные включения гравийного материала в донном осадке.

Обсуждение результатов

Формирование фона радионуклидов в прибрежной водной массе

Из местных источников радиации актуальным представляется пресноводный сток в Мотовский залив от хранилища в губе Андреева (в акватории губы Западная Лица). Вымывание остаточного количества радионуклидов с загрязненной территории хранилища после имевшей место в 1982 г. аварии наблюдается и в настоящее время [8]. Радионуклиды попадают в Мотовский залив с потоком речных вод через губу Западная Лица. Было установлено, что основной поток загрязненной воды поступает в залив в верхнем слое 40—50 м и смешивается с водами залива. Концентрация ^{137}Cs в слабосоленой воде стокового течения варьируется, но в целом удерживается выше 2,5 Бк/м³. Далее в Мотовском заливе разбавление концентрации происходит по мере смешения малосоленых вод с морской водой Баренцева моря. По данным многолетних наблюдений 2014, 2018 и 2021 гг. средняя объемная активность изотопов в Мотовском заливе практически не изменялась и составляла: ^{137}Cs — 1,6 Бк/м³, ^{90}Sr — 3,4 Бк/м³. По наблюдениям 2021 г. объемная активность ^{137}Cs в водах Мотовского залива составила 1,6—1,9 Бк/м³. Такая же ситуация наблюдалась в заливе Варангер-фьорд (см. рис. 2). Более высокая активность ^{137}Cs на акватории этих заливов отмечена в губах с размещенной там инфраструктурой атомного флота, например, в губах Ура, Ара, Печенга.

Еще одним источником радионуклидов в морском побережье является сток Кольского залива. Загрязненность стока определяется суммарным влиянием инфраструктуры флота в губах Пала, Оленья, Сайда и предприятия «Атомфлот». Загрязнены как верхний, так и в придонный слои воды. Сосредоточение значительной части стоков в устьевом районе Кольского залива обеспечивает здесь более высокое содержание цезия и стронция, чем в Мотовском заливе. Концентрация радионуклидов изменчива из-за их неравномерной эмиссии, динамики вод и обмена с донными отложениями. Однако в многолетнем плане (2011—2021 гг.) объемная активность изотопов остается повышенной. Средняя многолетняя активность ^{137}Cs в верхнем слое воды составляет 3,8 Бк/м³, ^{90}Sr — 8,7 Бк/м³. В придонных горизонтах активность ^{137}Cs составляет 2,8 Бк/м³, ^{90}Sr — 9,8 Бк/м³. Для всего Кольского залива в целом средняя объемная активность изотопа ^{90}Sr в воде составляет 4,5 Бк/м³ [8].

Соленость и концентрация ^{137}Cs в воде Кольского и Мотовского заливов достоверно коррелируют. Однако в Мотовском заливе между соленостью и концентрацией ^{137}Cs установлена обратная корреляционная связь ($r = -0,58$ при $P = 0,95$, $n = 12$). В Кольском заливе корреляция положительна ($r = 0,62$ при $P = 0,95$, $n = 10$). Такое различие определено расположением источников радионуклидов. В Мотовском заливе источник (хранилище радио-

активных отходов) расположен вблизи устья реки. В Кольском заливе объекты инфраструктуры находятся в губах с морской водой. В отличие от Мотовского залива распространение радионуклидов обеспечивается здесь потоками осолоненных вод. Плюс суммарного стока радионуклидов из этих заливов в прибрежной зоне распространяется в зависимости от ситуационных течений.

В зоне открытого побережья, в удаленных от техногенных источников районах, также отмечено несколько участков, где объемная активность ^{137}Cs повышена (см. рис. 2а). Анализ расположения этих участков в поле температуры и солености показывает, что приток радионуклидов эпизодически происходит из открытых районов моря с вихрями соленых атлантических вод. Потоки Мурманского прибрежного течения, ориентированные рельефом дна, наиболее глубоко внедряются в прибрежную зону в районах губ Териберская, Зеленецкая, Ивановская и других вдоль Мурманского побережья.

С учетом свободного водообмена прибрежной зоны Мурманска с открытым морем для сравнительных оценок средняя многолетняя активность радионуклидов в последнем десятилетии в баренцевоморском бассейне ($1,6 \pm 0,7$ Бк/м³ ^{137}Cs , $2,8 \pm 0,3$ Бк/м³ ^{90}Sr) может рассматриваться как фоновое значение [11; 12]. Таким образом, под воздействием местных источников радиоактивных веществ в западной части побережья формируются локальные участки более высокой активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в водной массе. В восточной части участки их повышенного содержания формируются при затоке вод Мурманского прибрежного течения.

Формирование фона радионуклидов в донных отложениях побережья

Интервал изменчивости величин удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в донных отложениях указан в табл. 1. Полученные нами данные близки к значениям предыдущих исследований [6; 12; 18]. В западных участках прибрежной зоны аналогично распределению радионуклидов в водной среде выражено долговременное влияние местных источников. С учетом ориентировочной скорости осадконакопления в побережье около 0,2 см/год [10] взятый в точках отбора слой осадка 0—2 см сформировался в течение последних 10—20 лет. Но в осадках Варангер-фьорда, Мотовского и Кольского заливов «пятнистость» в распределении активности радионуклидов вызвана не только близостью объектов атомной инфраструктуры. Например, хаотично расположенные в центральных частях заливов точки высокой концентрации ^{137}Cs соответствуют понижениям донного рельефа. Депрессивные участки дна обуславливают снос и накопление в отложениях тонкодисперсного осадочного материала — пелитов, алевроито-пелитов, на что уже указывалось в [7; 8; 16]. Глубиной опосредована связь накоплений техногенных радионуклидов со структурой донных отложений. По нашим многолетним наблюдениям,

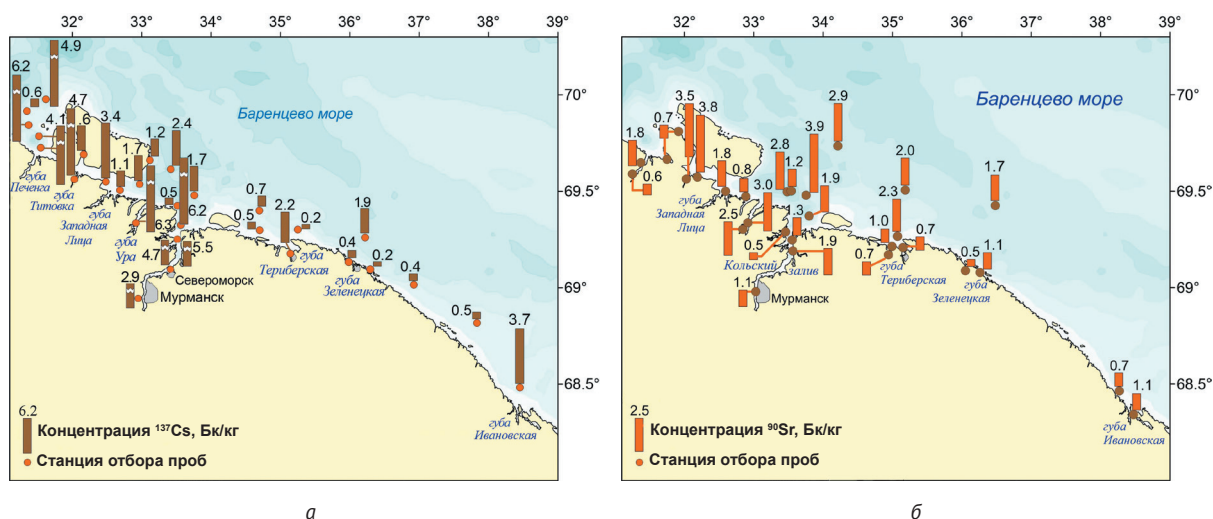


Рис. 3. Распределение удельной активности изотопов ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б) в верхнем слое донного осадка прибрежной зоны, 2021–2023 гг.
 Fig. 3. Distribution of specific activity of isotopes ^{137}Cs (a) and ^{90}Sr (б) in the upper layer of the bottom sediment of the coastal zone, 2021–2023

в Мотовском заливе установлена слабая корреляция между удельной активностью ^{137}Cs и глубиной ($r = 0,6$ при $P = 0,95$, $n = 22$) [6—8, 10]. Среднее содержание ^{137}Cs в многолетней динамике варьирует от 2,5 до 2 Бк/кг, а средняя концентрация ^{90}Sr практически не изменяется, составляя около 0,9 Бк/кг сухого осадка.

В Кольском заливе высокий порог в рельефе дна его устьевой части ослабляет вымывание осадочного на дно материала из ковша залива. В соответствии с этим концентрация радионуклидов повышена в донных осадках его средней и северной частей. В итоге донные отложения в нем более загрязнены, чем в Мотовском заливе. Однако в целом уровень загрязнения осадков изотопами ^{137}Cs и ^{90}Sr низкий. Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в среднем составляет 4,6 и 0,6 Бк/кг сухого осадка соответственно.

В открытых районах прибрежья концентрация ^{137}Cs существенно снижается до 0,2—0,5 Бк/кг с удалением на восток от устьевых областей Кольского и Мотовского заливов. Локальные участки относительно повышенной удельной активности радиоизотопов соответствуют ответвлениям прибрежного желоба и вихрям теплого Мурманского прибрежного течения (рис. 3а, 3б). Удельная активность ^{90}Sr на таких участках также увеличивается местами до 2,0—2,5 Бк/кг.

Средняя многолетняя активность в осадках Баренцева моря характеризуется величинами $1,7 \pm 0,4$ Бк/кг по ^{137}Cs и $1,2 \pm 0,3$ Бк/кг по ^{90}Sr [11; 12; 18]. Средняя удельная активность ^{137}Cs ($2,5 \pm 0,6$ Бк/кг) и ^{90}Sr ($1,7 \pm 0,2$ Бк/кг) (см. табл. 1) в прибрежье в период наблюдений оказывается более высокой за счет их накопления в западной части прибрежной зоны. В восточной части пятна повышенного содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr эпизодически формируются на участках притока вод Мурманского прибрежного течения.

Динамика радиоактивного загрязнения воды прибрежной зоны

Последние 20—25 лет концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и донных осадках сохраняется на относительно низком, но стабильном уровне. Для ретроспективного анализа динамики концентраций этих элементов в среде прибрежной зоны были использованы данные многолетних радиоэкологических наблюдений ММБИ в прибрежной зоне Мурмана с 1994 г. (данные по ^{137}Cs) и 2005 г. (данные по ^{90}Sr) (рис. 4 и 5). Исследовано радиоэкологическое состояние воды на разных горизонтах и поверхностного слоя донных осадков (0—3 см) в различных участках прибрежья. Также был выполнен гармонический анализ флуктуаций наиболее динамично изменяющейся концентрации ^{90}Sr в водной массе [19].

После 2000-х годов темп снижения объемной активности замедлился, а концентрация приблизилась к современным значениям, обусловленным миграцией ^{137}Cs и ^{90}Sr в глобальном и региональном обороте, включая слабые локальные источники в регионе. Отмечена неравномерность поступления радионуклида в прибрежье в течение последних 20 лет. В целом нисходящий тренд активности ^{137}Cs и ^{90}Sr осложняется короткопериодными осцилляциями их средних концентраций. В водной среде графически отображаются две восходящие и две нисходящие фазы осцилляции (см. рис. 4). При этом фазы осцилляции ^{90}Sr запаздывают относительно осцилляции ^{137}Cs , хотя и близки по продолжительности. В донных отложениях такие различия также наблюдаются, однако они сглажены, по-видимому, вследствие низкой концентрации радионуклидов.

Цикличность в динамике концентраций изотопов в водной среде может быть связана с цикличностью поступлений североатлантических вод в прибрежную зону с течениями. Сдвиг фаз и другие различия в значительной степени связаны, по-видимому,

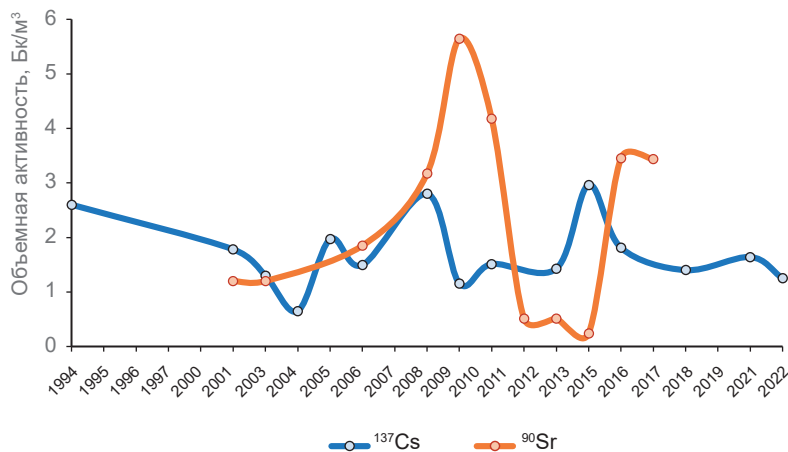


Рис. 4. Динамика среднегодовых значений активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде прибрежной зоны Мурманска
Fig. 4. Dynamics of the average annual values of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity in the waters of the Murmansk coastal zone

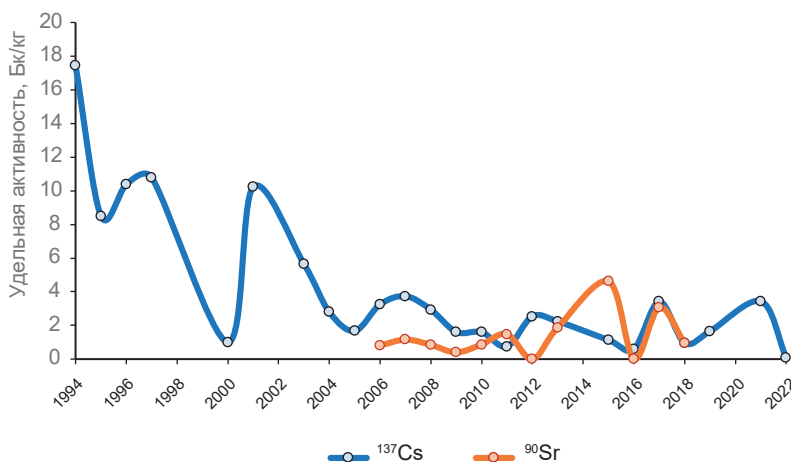


Рис. 5. Динамика среднегодовых значений активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в донных отложениях прибрежной зоны Мурманска
Fig. 5. Dynamics of the average annual values of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity in bottom sediments of the Murmansk coastal zone

с различиями геохимического поведения ^{137}Cs и ^{90}Sr в водной среде, а также с процессами седиментации осадочного материала из водной толщи. Соединения стронция менее активно сорбируются взвесью и дольше остаются в водной среде по сравнению с цезием.

Гармонический анализ ряда концентраций ^{90}Sr в водной массе позволяет выделить две основные гармоники с периодами 4,5 и 3,58 лет. Эти гармоники удовлетворительно описывают наблюдаемую изменчивость, их вклад обеспечивает соответственно 45% и 42% изменчивости концентраций. Однако следует указать, что спектр наблюдаемых амплитуд осложняется дополнительными осцилляциями, вызванными комплексом второстепенных факторов. К таким факторам относятся флуктуации материкового стока и ветровой нагрузки, влияние которых также вызывает разнородность распределения ^{90}Sr в водной массе прибрежья.

Заключение

Высокие уровни радиоактивного загрязнения районов прибрежья Кольского полуострова радионуклидами, главным образом ^{137}Cs и ^{90}Sr ,

были выявлены в 1990-х годах [1; 2; 11; 12; 20]. К настоящему времени произошло значительное снижение концентрации этих изотопов. По вновь полученным в 2021—2023 гг. данным, радиоэкологическое состояние морской прибрежной среды повсюду характеризуется низким уровнем содержания указанных радионуклидов, не представляющим опасности для природопользования. В то же время радиоизотопное загрязнение прибрежья происходит неравномерно, а распределение концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr дифференцировано в результате антропогенного воздействия и гидрологического режима вод прибрежья. При средней концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде 1,7 и 3,0 Бк/м³ соответственно содержание ^{137}Cs местами увеличивается до 3,8 Бк/м³, а ^{90}Sr — до 7 Бк/м³. В донных осадках максимальное содержание ^{137}Cs достигает 6 Бк/кг, а ^{90}Sr — 4 Бк/кг при средних значениях для прибрежья 2,5 и 1,7 Бк/кг.

В Мурманском прибрежье по-прежнему действуют локальные, относительно слабые источники техногенной радиоактивности, связанные с инфраструктурой флота. В Варангер-фьорде таким источником является сток из губы Печенга. На участке Мотовского залива это сток из губ Андреева, Ара, Ура. В Кольском заливе интегрируется сток нескольких источников и затем распространяется в прибрежье течениями. Несмотря на повышенную концентрацию ^{137}Cs и ^{90}Sr в этих участках, короткоживущие радионуклиды при исследованиях здесь не были обнаружены. Это свидетельствует, по-видимому, об остаточных следах загрязнения объектов и эмиссии радионуклидов, не имеющей характера инцидентов.

В акватории, удаленной от техногенных источников радиации, показатели удельной и объемной активности радиоизотопов значительно снижены. В то же время полученные данные подтверждают результаты предшествующих наблюдений, свидетельствующие

о притоке радионуклидов в прибрежную зону с вихрями атлантических вод прибрежного течения.

Таким образом, получены данные для решения фундаментальных научных задач и удовлетворения социальных запросов населения Мурманской области и продвижения Евро-Арктического сотрудничества. Представленные материалы могут рассматриваться как элемент мониторинга и необходимая информация для развития морехозяйственной деятельности и комплексного управления прибрежными зонами.

Финансирование

Сбор экспедиционных и архивных материалов и обработка представленных в статье материалов произведены в рамках тематики госзадания ММБИ РАН (номер государственной регистрации 124013000709-9). Обобщение данных многолетнего радиоэкологического мониторинга выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-17-00243-П «Радиационная океанология и геоэкология прибрежного шельфа Баренцева и Белого морей. Биокосные взаимодействия в системе: донные отложения — вода — макроводоросли — микроорганизмы, их роль в ремедиации морской прибрежной экосистемы при радиационном и химическом загрязнении в условиях Арктики».

Литература/References

1. Матишов Д. Г., Матишов Г. Г. Радиационная экологическая океанология. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. — 417 с.
Matishov D. G., Matishov G. G. Radiation ecological oceanology. Apatity, Publ. KSC RAS, 2001, 417 p. (In Russian).
2. Сивинцев Ю. В., Вакуловский С. М., Васильев А. П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Белая книга 2000. — М.: ИздАТ, 2005. — 624 с.
Sivintsev Yu. V., Vakulovskii S. M., Vasil'ev A. P., Vysotskii L. V., Gubin A. T., Danilyan V. A., Kobzev V. I., Kryshev I. I., Lovkovskii S. A., Mazokin V. A., Nikitin A. I., Petrov O. I., Pologikh B. G., Skorkin Yu. I. Anthropogenic Radionuclides in Russian Seas. Radioactive Wastes Removing into Arctic and Far Eastern Seas: Radioecological Afterwards. White Book 2000. Moscow, Publ. IzdAT, 2005, 417 p. (In Russian).
3. Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean. *Deep Sea Research II*, 2003, vol. 50, no. 17/21, pp. 2597—2606. DOI: 10.1016/S0967-0645(03)00137-1.
4. Lindahl P., Lee S. H., Worsfold P., Keith-Roach M. Plutonium isotopes as tracers for ocean processes: A review. *J. Mar. Environ. Res.*, 2010, vol. 69, no. 2, pp. 73—84. DOI: 10.1016/j.marenvres.2009.08.002.
5. Матишов Г. Г., Усягина И. С., Ильин Г. В. Реконструкция поступления и миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr в экосистеме Баренцева моря // Вестн. Рос. фонда фундамент. исслед. — 2022. — № 2 (114). — С. 119—135. — DOI: 10.22204/2410-4639-2022-114-02-119-135.
6. Ильин Г. В., Касаткина Н. Е., Моисеев Д. В., Усягина И. С. Объекты инфраструктуры атомного флота как источник радиоактивного загрязнения Баренцева моря (на примере хранилища отходов в губе Андреева) // Атом. энергия. — 2017. — Т. 122, № 2. — С. 108—114. — URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t122-2_2017/p108/.
7. Ильин Г. В., Усягина И. С. Радиоэкологические исследования в Мурманском прибрежье Баренцева моря как часть мониторинга среды при обращении с радиоактивными отходами // Атом. энергия. — 2019. — Т. 126, № 5. — С. 285—289. — URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t126-5_2019/p287/.
8. Матишов Г. Г., Ильин Г. В., Усягина И. С. и др. Радиоэкологическое состояние прибрежной зоны Кольского полуострова (по данным наблюдений в 2013—2020 годах) // Метеорология и гидрология. — 2023. — Т. 4. — С. 99—110. — DOI: 10.52002/01-2906-2023-4-99-110.
9. Матишов Г. Г., Ильин Г. В., Усягина И. С., Моисеев Д. В., Валуйская Д. А. Радиоэкологическое состояние прибрежной зоны Кольского полуострова (по данным наблюдений в 2013—2020 годах) // Метеорология и гидрология. — 2023. — Т. 4, № 4, pp. 363—371. DOI: 10.3103/S106837392304009X.
10. Meshcheryakov N. I., Usyagina I. S., Ilyin G. V., Ivanova N. S. Dating of the recent sedimentary strata of the marginal basins of eastern Murman (Kola Peninsula) using the example of Yarnyshnaya and Zelenetskaya Bays. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 393—405. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-393-405.
11. Ilyin 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. 122, no. 2, pp. 131—137. DOI: 10.1007/s10512-017-0247-7.
12. Ilyin G. V., Usyagina I. S. Radioecological Studies in the Murmansk Littoral of the Barents Sea as Part of Environmental Monitoring in Radwaste Management. *Atomic Energy*, 2019, vol. 126, no. 5, pp. 326—331. DOI: 10.1007/s10512-019-00558-6.
13. Yakovlev E. Yu., Puchkov A. V., Druzhinin S. V. Evaluation of current natural and anthropogenic radionuclide activity in coastal area bottom sediments of the Barents Sea (North of the Kola Peninsula). *Marine Pollution Bull.*, 2023, vol. 189, art. 114809. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114809>.

pp. 393—405. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-393-405. (In Russian).

11. Ильин Г. В., Усягина И. С., Касаткина Н. Е., Валуysкая Д. А. Радиоэкологическое состояние среды морских экосистем Арктики в условиях современного природопользования // Тр. Кольского науч. центра. Океанология. Вып. 7. — 2020. — № 4/2020 (11). — С. 260—274. — DOI: 10.37614/2307-5252.2020.11.4.013.

Ilyin G. V., Usyagina I. S., Kasatkina N. E., Valuyskaya D. A. Radioecological status of arctic marine ecosystems and current ocean and coastal management. Transactions of the Kola Scientific Centre. Oceanology. Iss. 7. 2020, no. 4/2020 (11), pp. 260—274. (In Russian).

12. Матишов Г. Г., Ильин Г. В., Усягина И. С., Кириллова Е. Э. Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX—XXI веков. — Ч. 2: Донные отложения // Наука Юга России. — 2019. — Т. 15, № 4. — С. 24—35. — DOI: 10.7868/S25001640190404.

Matishov G. G., Ilyin G. V., Usyagina I. S., Kirillova E. E. Dynamics of artificial radionuclides in the ecosystems of the seas of the Arctic Ocean at the turn of the 21st century. Pt. 2. Bottom sediments. Science in the South of Russia, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 24—35. DOI: 10.7868/S25001640190404. (In Russian).

13. Кондрацова О. Ф. Термика и соленость прибрежных вод Восточного Мурмана // Закономерности скоплений и миграций промысловых рыб в прибрежной зоне Мурмана. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1958. — С. 7—35.

Kondratsova O. F. Thermology and salinity of the coastal waters of East Murmansk. Patterns of aggregations and migrations of commercial fish in the coastal zone of Murmansk. Moscow-Saint Petersburg, Publ. USSR Academy of Sciences, 1958, pp. 7—35. (In Russian).

14. Петров В. С., Забрусков Г. В., Забрускова М. М. Термохалинная структура фронтальной зоны у побережья Восточного Мурмана // Комплекс. океанол. исслед. Баренцева и Белого морей. — Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1987. — С. 26—31.

Petrov V. S., Zabruskov G. V., Zabruskova M. M. Thermo-haline structure of the frontal zone off the coast of East Murmansk. Complex oceanological studies of the Barents and White Seas. Apatity, Publ. CF Academy of Sciences of the USSR, 1987, pp. 26—31. (In Russian).

15. Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г. и др. Воды Баренцева моря: Структура, циркуляция, изменчивость. — Мурманск: ПИНРО, 2016. — 260 с.

Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G., Korsakov A. L., Antsiferov M. Yu. The Barents Sea Water: structure, circulation, variability. Murmansk, Publ. PINRO, 2016, 260 p.

16. Митяев М. В., Герасимова М. В., Павлова Л. Г. Современные донные отложения Мотовского залива (Баренцево море) // Тр. Кольского науч. центра. Океанология. Вып. 5. — 2018. — № 4/2018 (9). — С. 118—130. — DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018-9-4-118-130.

Mityaev M. V., Gerasimova M. V., Pavlova L. G. Modern bottom sediments of the Motovsky Bay (Barents Sea). Transactions of the Kola Scientific Centre. Oceanology. Ser. 5, 2018, no. 4/2018 (9), pp. 118—130. (In Russian).

17. Безруков П. Л., Лисицын А. П. Классификация осадков современных морских водоемов // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. — 1960. — Т. 32. — С. 3—14. Bezrukov P. L., Lisitsyn A. P. Classification of sediments of modern marine water bodies. Proceedings of the Institute of Oceanology of the USSR Academy of Sciences, 1960, vol. 32, pp. 3—14. (In Russian).

18. Матишов Г. Г., Ильин Г. В. ⁹⁰Стронций в морской воде и донных отложениях баренцевоморского шельфа (2000—2019 гг.) // Докл. Рос. акад. наук. Науки о Земле. — 2022. — Т. 505, № 2. — С. 185—191. — DOI: 10.31857/S2686739722080114.

Matishov G. G., Ilyin G. V. Strontium-90 in Seawater and Bottom Sediments of the Barents Sea Shelf (2000—2019). Doklady Earth Sciences, 2022, vol. 505, no. 2, pp. 565—571. DOI: 10.31857/S1028334X22080116.

19. Гордеева С. М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». — СПб.: Изд-во РГГМУ, 2017. — 68 с. — URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-503135449.pdf.

Gordeeva S. M. Workshop on the discipline “Statistical methods of processing and analysis of hydrometeorological information”. Saint Petersburg, Publ. RGGMU, 2017, 68 p. Available at: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-503135449.pdf. (In Russian).

20. Матишов Г. Г., Ильин Г. В., Усягина И. С. Основные источники ¹³⁴Cs в Баренцевом и Карском морях (1960—2020 гг.) // Докл. Рос. акад. наук. Науки о Земле. — 2021. — Т. 500, № 1. — С. 64—69. — DOI: 10.31857/S2686739721090140.

Matishov G. G., Ilyin G. V., Usyagina I. S. Main Sources of ¹³⁴Cs in the Barents and Kara Seas (1960—2020). Doklady Earth Sciences, 2021, vol. 500, no. 1, pp. 761—765. DOI: 10.1134/S1028334X21090142.

Информация об авторах

Ильин Геннадий Васильевич, кандидат географических наук, заведующий лабораторией океанографии и радиоэкологии, Мурманский морской биологический институт РАН (183010, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: ilyin@mmbi.info.

Усягина Ирина Сергеевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория океанографии и радиоэкологии, Мурманский морской биологический институт РАН (183010, Россия, Мурманск, Владимирская ул., д. 17), e-mail: usyagina@mmbi.info.

NEW DATA ON THE RADIO-ECOLOGICAL STATUS FORMATION OF THE MARINE ENVIRONMENT IN THE MURMANSK COAST ZONE (THE BARENTS SEA)

Ilyin, G. V., Usyagina, I. S.

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (Murmansk, Russian Federation)

The article was received on June 15, 2025

For citing

Ilyin G. V., Usyagina I. S. New data on the radio-ecological status formation of the marine environment in the Murmansk coast (the Barents Sea). *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 2, pp. 264—273. DOI: 10.25283/2223-4594-16-2-264-273. (In Russian).

Abstract

The article presents the results of radioecological and oceanographic studies in 2021–2023 in the open waters of the coastal zone and large bays of the Murmansk coast. The researchers have defined the current background levels of specific and volumetric activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr radioisotopes in the marine environment, including infrastructure sites and routes for the evacuation of radioactive waste. A high level of radioactive contamination of the Murmansk coastal areas was detected in the 90s of the last century. Currently, a significant decrease in their concentration has been observed. According to the newly obtained data, radioisotope contamination of the coastal marine environment is differentiated, but is generally assessed as low, raising no concerns for the safety of natural resource management. The authors outline the impact of nuclear infrastructure facilities and Atlantic water flows in shaping an uneven background of man-made radioactivity in the marine environment. Local sources of radioactivity associated with the fleet infrastructure create a zone of relatively elevated radioisotope concentrations in the western part of the Murmansk coast. In the waters of Varangerfjord, Motovsky and Kola Bays, the ^{137}Cs levels locally increase to 3.8 Bq/m^3 , and the ^{90}Sr levels reach 7 Bq/m^3 with average values of 1.7 and 3.0 Bq/m^3 , correspondently. In bottom sediments, the maximum ^{137}Cs level reaches 6 Bq/kg , and ^{90}Sr levels reach 4 Bq/kg , with coastal averages of 2.5 and 1.7 Bq/kg , correspondently. However, short-lived radionuclides have not been detected here. Apparently, residual traces of contamination are being washed out, resulting in non-incident radionuclide releases.

Keywords: coastal sea zone, radionuclides, radiation sources, bottom sediments, oceanographic conditions, Kola Peninsula, Murmansk coast.

Funding

The collection of expedition and archival materials and the processing of the materials presented in the article were carried out within the framework of the State Assignment of the Moscow Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences (State registration no. 124013000709-9). The synthesis of long-term radioecological monitoring data was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-17-00243-P “Radiation oceanology and geocology of the coastal shelf of the Barents and White Seas. Biocidal interactions in the system: sediments — water — macroalgae — microorganisms, their role in remediation of the marine coastal ecosystem under radiation and chemical pollution in the Arctic”.

Information about the authors

Ilyin, Gennady Vasilyevich, PhD of Geography, Head of the Laboratory of Oceanography and Radioecology, Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183010), e-mail: ilyin@mmbi.info.

Usyagina, Irina Sergeevna, PhD of Geography, Senior Researcher, Laboratory of Oceanography and Radioecology, Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183010).

© Ilyin G. V., Usyagina I. S., 2026