

Научная статья
УДК 546.36 (268.45)
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.006

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЙ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В МОРСКОМ ПРИБРЕЖЬЕ МУРМАНА

Геннадий Васильевич Ильин, Ирина Сергеевна Усягина

*Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
ilyin@mmbi.info, usyagina@mmbi.info*

Аннотация

Рассмотрены закономерности формирования фона техногенной радиоактивности морской среды в прибрежной зоне Мурманска на примере основных дозообразующих изотопов. Актуальность темы определена важной ролью побережья Кольского полуострова, Мурманского берега в частности, в социальном и хозяйственном развитии Евро-Арктической зоны России. В работе использованы материалы радиоэкологических и океанографических исследований 1994–2021 гг. в открытых водах прибрежной зоны и в некоторых крупных губах Кольского побережья. Определен современный уровень фона удельной и объемной активности радиоизотопов ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в морской среде, включая зоны перевалки и маршруты эвакуации радиоактивных отходов в прибрежье Мурманска. Показана роль объектов атомной инфраструктуры и потоков атлантических вод в формировании радиоэкологического фона. Современное радиоизотопное загрязнение побережья дифференцировано, но в целом оценивается как низкофоновое, не вызывающее опасений за безопасность природопользования. Местные источники техногенной радиоактивности формируют область повышенной концентрации радиоизотопов в западной части Кольского побережья – Варангер-фьорде, Мотовском и Кольском заливах. В акватории, отдаленной от техногенных источников радиации, фон удельной и объемной активности радиоизотопов значительно снижен. Отмечены различия трендов в динамике концентраций ^{137}Cs , ^{90}Sr в водной массе и донных отложениях прибрежной зоны. Динамика ^{90}Sr в водной массе хорошо описывается двумя осцилляциями с периодом 4.5 и 3.58 года. Полученные материалы рассматриваются как элемент мониторинга и необходимая информация для развития морехозяйственной деятельности и комплексного управления прибрежными зонами.

Ключевые слова:

морская прибрежная зона, радионуклиды, источники радиации, донные осадки, океанографические условия

Original article

DYNAMICS OF ACCUMULATION OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN THE SEA COAST OF MURMANSK

Gennady V. Ilyin, Irina S. Usyagina

*Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian
ilyin@mmbi.info, usyagina@mmbi.info*

Abstract

The patterns of formation of the background of technogenic radioactivity of the marine environment in the coastal zone of Murmansk are studied using the example of the main dose-forming isotopes. The relevance of the study is determined by the important role of the coast of the Kola Peninsula and the Murmansk coast, in particular, in the social and economic development of the Euro-Arctic zone of Russia. The work uses materials from radioecological and oceanographic studies from 1994–2021 in the open waters of the coastal zone and in a number of large bays of the Kola coast. The study shows the current background level of specific and volumetric activity of radioisotopes ^{137}Cs , ^{90}Sr and $^{239,240}\text{Pu}$ in the marine environment, including transshipment zones and evacuation routes for radioactive waste off the coast of Murmansk. The role of nuclear infrastructure facilities and Atlantic water flows in the formation of the radioecological background is shown. Modern radioisotope pollution of the coastal area is differentiated, but is generally assessed as low-background, without causing concern for the safety of environmental management. Local sources of man-made radioactivity form an area of increased concentration of radioisotopes in the western part of the Kola coast – Varangerfjord, Motovsky and Kola bays. In the water area remote from man-made sources of radiation, the background of specific and volumetric activity of radioisotopes is significantly reduced. Differences in trends in the dynamics of concentrations of ^{137}Cs , ^{90}Sr in the water mass and bottom sediments of the coastal zone are noted. The dynamics of the ^{90}Sr in water is well described by 2 oscillations

in with a period of 4.5 and 3.58 years. The received materials are considered as an element of monitoring and necessary information for the development of marine management and integrated coastal zone management.

Keywords:

marine coastal zone, radionuclides, radiation sources, bottom sediments, oceanographic conditions

Введение

Поступление техногенных радиоизотопов в Баренцево море произошло в «ядерную эпоху». Основными источниками всего спектра искусственных радионуклидов стали испытания ядерного оружия на полигонах архипелага Новая Земля в 1955–1963 гг. а также их транзит с североатлантическими водами с сопредельных акваторий Ирландского, Северного и Норвежского морей (Матишов, Матишов, 2001; Aarkrog, 2003; Plutonium ..., 2010). Немногом позже, в 1960–1980-е гг., в арктических морях отмечали максимальные объемы воздушных выпадений искусственных радионуклидов, связанные с глобальным перераспределением радиоактивных веществ, попавших в высокие слои атмосферы в результате испытаний и разного рода ядерных инцидентов. Наиболее значимым из последних стала авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. По некоторым оценкам, вклад чернобыльских выбросов в загрязнение вод Баренцева и Карского морей в 1990-е гг. составлял 10–20 % от общего уровня радиоактивности (Вакуловский и др., 1985; Радиоактивное ..., 1991). Пик поступлений радионуклидов в Баренцево море пришелся на 1980-е гг. В настоящее время поступление многократно снижено, но не прекратилось окончательно и постоянно дополняется глобальными атмосферными выпадениями (Матишов и др., 2022). Кроме этого в регионе действуют факторы отложенного риска, к которым относятся захоронения радиоизлучающих отходов и береговая инфраструктура атомного флота, включая хранилища этих отходов, технические базы обслуживания и ремонта. В «ядерный» и «пост-ядерный» периоды в воде и донных отложениях моря наблюдали относительно широкий спектр радиоизотопов ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{129}I , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{60}Co , попавших в экосистему в результате систематических или эпизодических утечек радиоактивных материалов.

Прибрежная зона Кольского полуострова в системе Баренцева моря и побережье Мурман, в частности, выделяются высокой социальной и хозяйственной освоенностью. Здесь чрезвычайно развита инфраструктура торговых и военных портов, промышленное производство, включая аквакультуру, рыбодобывающую и перерабатывающую деятельность, бурно развивающийся туризм и акватуризм с центрами в населенных пунктах Териберка, Дальние Зеленцы, на п-ове Рыбачий, с чем связана необходимость постоянного контроля состояния морской среды.

В то же время здесь расположено множество потенциальных источников техногенного радиоактивного излучения. Поэтому радиоэкологический статус прибрежной зоны зависит не только от поступающих сюда атлантических вод. Изменчивость фоновой характеристики побережья формируется также под влиянием местных объектов атомной инфраструктуры. К числу основных таких объектов можно отнести хранилища ядерных отходов в губах Андреева, Оленья, Сайда, Гремиха (Йоканьгский рейд). Дополнительный риск загрязнения создается обращением с ядерными отходами при их эвакуации из хранилищ в губах Андреева и Гремиха, операциях трансфера упаковок отработавшего ядерного топлива на перерабатывающие предприятия.

Основными дозообразующими техногенными радионуклидами в морской экосистеме к настоящему времени являются изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr . Они имеют повышенную растворимость в воде, высокую радиотоксичность и легко встраиваются в метаболические процессы. В спектре накопленных радионуклидов присутствуют также изотопы плутония, накопленные в донных осадках. В основном это изотопы $^{239,240}\text{Pu}$. Их концентрации практически не уменьшаются из-за длительности полураспада, и при современных исследованиях вопросы их накопления и перераспределения приобретают все большую значимость. Вместе с тем остро стоит необходимость постоянного контроля состояния морской среды. Основная цель работы – получить актуальные данные и составить концептуальную основу формирования радиоэкологического фона в воде и донных отложениях прибрежной зоны Мурман, выяснить тенденции в динамике накопления радионуклидов.

Материал и методы

В работе использованы материалы многолетних наблюдений ММБИ РАН за концентрацией ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и донных отложениях, полученные в судовых и береговых экспедициях, а также данные 2021 г. по удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в современном слое осадков (0–2 см).

Отбор проб воды и грунта выполняли стандартным оборудованием по современным методикам, принятым МАГАТЭ. Донные отложения отбирали дночерпателем ван-Вина, прямооточной трубкой ГОИН-1,5 и почвенным пробоотборником (d 10 см, на литоральных отмелях).

Для анализа объемной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде пробы отбирали с помощью насоса. Объем проб составлял соответственно 100 и 30 л. Для определения радиоизотопов цезия пробы поверхностной воды пропускали через сорбционную колонку с целлюлозным неорганическим сорбентом «анфеж», который затем высушивали. Измерения активности γ -излучающих радионуклидов в пробах выполнены на γ -спектрометре InSpector-2000 (Canberra, США) с детектором из чистого германия, а также на спектрометре γ - и рентгеновского излучения b13237 (Canberra, США). Расчеты выполнены с помощью базового программного обеспечения анализа спектров Genie-2000.

Определение удельной активности ^{90}Sr в пробах проведено радиохимическим методом с выделением дочернего продукта ^{90}Y – излучателя β -активности. Активность ^{90}Sr рассчитана по измерениям активности равновесного ^{90}Y в счетных образцах. Измерения β -активности образцов выполнены на установке LS-6500 (Beckman Instruments Inc., США).

Радиометрический анализ удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в пробах донного осадка осуществлен в лаборатории радиохимии Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Активность изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ определена на α -спектрометре Model 7401 (Canberra, США).

Совокупный анализ данных позволяет установить многолетнюю динамику и охарактеризовать современное радиационное состояние прибрежной зоны Мурманска, оценить относительный вклад глобальных, региональных и локальных источников в радиоактивное загрязнение побережья.

Результаты и обсуждение

Характеристика района. В работе в качестве ограничительного признака прибрежной зоны используется Прибрежный желоб, по нему ориентировано теплое Мурманское прибрежное течение, переносящее атлантические воды вдоль Мурманского берега Кольского полуострова. Поток этих вод на некоторых участках подходит близко к берегу по ответвлениям желоба и работает как источник радионуклидов из Северо-Европейского бассейна. На картах температуры и солёности хорошо прослеживаются флуктуации потока и заливы атлантических вод в прибрежную зону (рис. 1).

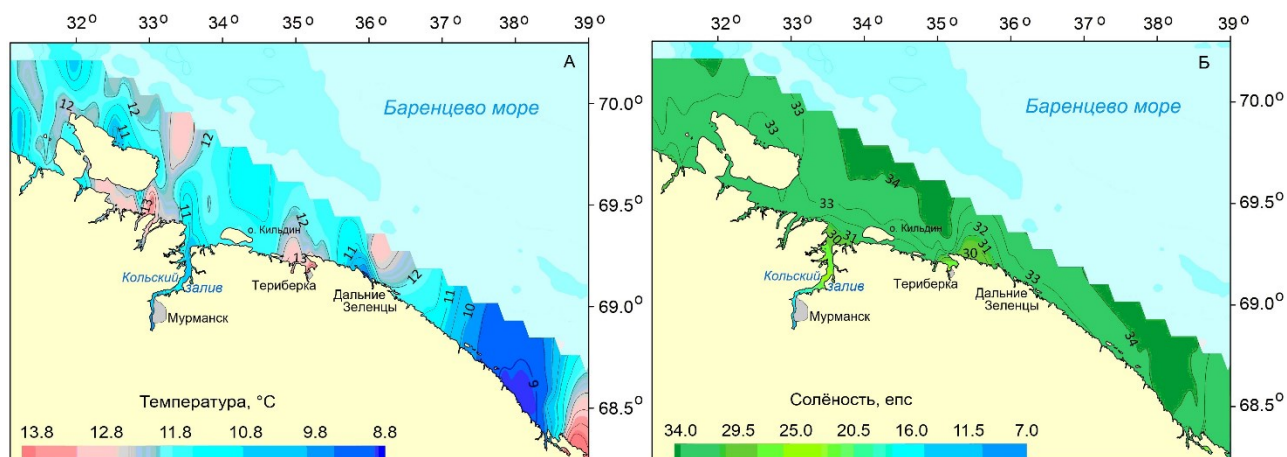


Рис. 1. Карта-схема распределения температуры (А) и солёности (Б) воды в прибрежной зоне Кольского полуострова, июль 2021 г.

Fig. 1. Schematic map of the distribution of temperature (А) and salinity (Б) of water in the coastal zone of the Kola Peninsula, July 2021

Берег Мурмана сложен главным образом скальными породами и относится к абразионному типу. Донные отложения прибрежной зоны разнообразны по текстуре и слабо изучены. По нашим фрагментарным наблюдениям, в современных осадках преобладает тонкодисперсная пелитовая фракция – более 40 %, которая и обеспечивает депонирование радионуклидов (Датирование ..., 2024). В бухтах нередки валунные и песчаные пляжи. Это обуславливает значительную долю песка и включения гравийного материала в донном осадке.

Современное радиоэкологическое состояние морской среды в прибрежной зоне. В водных массах и донных отложениях побережья формируется мозаичное поле изучаемых радионуклидов цезия, стронция и плутония. Характеристика современного фона техногенных радионуклидов поверхностного слоя воды и верхнего осадочного слоя в побережье Мурмана представлена в таблице и на рисунках 2–5.

Концентрация радионуклидов в воде и донных отложениях прибрежной зоны Кольского полуострова
The concentration of radionuclides in the water and bottom sediments of the coastal zone of the Kola Peninsula

Среда	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239,240}\text{Pu}$
Вода, Бк/м ³	$\frac{1.67 \pm 0.15}{0.71 - 3.80}$ (0.46)	$\frac{3.46 \pm 0.48}{0.46 - 7.24}$ (2.05)	–
Донный осадок, Бк/кг	$\frac{2.51 \pm 0.61}{0.60 - 6.30}$ (2.03)	$\frac{0.78 \pm 0.21}{0.20 - 2.10}$ (0.60)	$\frac{1.13 \pm 0.16}{0.29 - 3.10}$ (0.68)

ПРИМЕЧАНИЕ. Числитель – среднее значение $\pm$ ошибка среднего, знаменатель – минимальное и максимальное значения, в скобках приведено стандартное отклонение.

Из приведенных данных видно, что средние концентрации радионуклидов в воде и донных отложениях соответствуют таковым для морского бассейна в целом (Радиоэкологическое ..., 2020). Подтверждается, что общий фон радионуклидного загрязнения морской среды создается потоком вод из Норвежского моря и Северной Атлантики. В то же время в распределении ^{137}Cs и ^{90}Sr как в воде, так и в донных отложениях отмечены разномасштабные участки относительно повышенного содержания радиоизотопов, образование которых связано с влиянием атомной инфраструктуры. Такие участки наиболее выражены в западной части побережья – в заливах Мотовский, Кольский и Варангер-фьорд.

Формирование фона радионуклидов в прибрежной водной массе. Доказано поступление радионуклидов в Мотовский залив от хранилища в губе Андреева с 1982 г. (Объекты ..., 2017; Ильин, Усягина, 2019). Вымывание остаточного количества радионуклидов с загрязненной территории хранилища наблюдается и в настоящее время. Радионуклиды попадают в Мотовский залив с потоком речных вод через губу Западная Лица. Поток загрязненной воды поступает в залив в верхнем слое 40–50 м и смешивается с водами открытого моря. Концентрация ^{137}Cs в слабосоленой воде стокового течения варьирует выше 2.5 Бк/м³, но снижается по мере смешения на акватории залива малосоленых вод с морской водой Баренцева моря. По данным многолетних наблюдений (2014, 2018 и 2021 гг.), средняя объемная активность изотопов цезия и стронция в Мотовском заливе практически не изменяется и составляет 1.6 и 3.4 Бк/м³ соответственно. Такая же ситуация наблюдается в заливе Варангер-фьорд (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.

Значимым источником радионуклидов в побережье Мурмана в «пост-ядерную» эпоху стал сток Кольского залива. Уровень его радиоактивности формируется под влиянием инфраструктуры флота в губах Пала, Оленья, Сайда и предприятия «Атомфлот». Загрязнены как верхний, так и придонный слои воды (Радиоэкологическое ..., 2023). Концентрация радионуклидов изменчива из-за их неравномерной эмиссии. Однако в многолетнем плане объемная активность изотопов остается повышенной. Средняя многолетняя активность ^{137}Cs в верхнем слое воды северного колена залива составляет 3.8 Бк/м³, а ^{90}Sr – 8.7 Бк/м³.

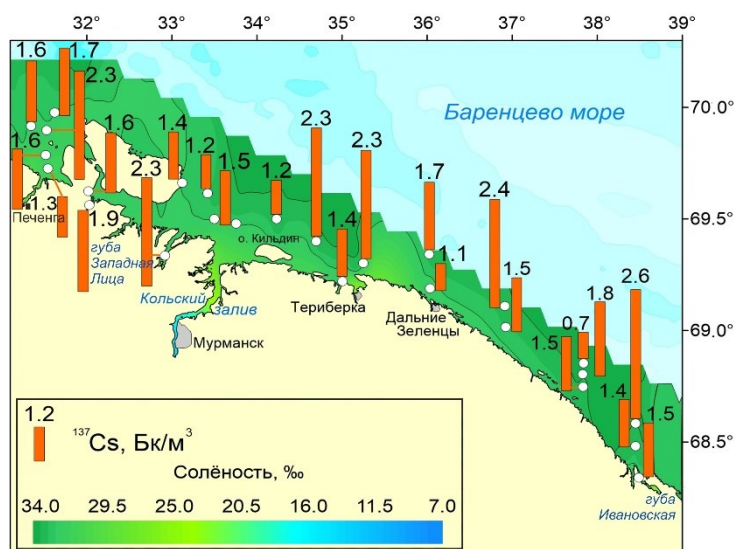


Рис. 2. Распределение изотопа ^{137}Cs в верхнем слое воды прибрежной зоны Мурманска в поле солёности, 2021 г.
Fig. 2. Distribution of the ^{137}Cs isotope in the upper water layer of the Murmansk coast in the salinity field, 2021

Солёность и концентрация ^{137}Cs в воде Кольского и Мотовского заливов достоверно взаимно коррелируют. В Мотовском заливе между солёностью 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 обусловлено расположением источников радионуклидов и способами их переноса. В Мотовском заливе хранилище радиоактивных отходов расположено вблизи устья реки, и загрязнители переносятся пресными водами. В Кольском заливе объекты инфраструктуры расположены в губах с морской водой, и распространение радиоизотопов обеспечивается потоками солёных вод.

В зоне открытого побережья, восточнее Кольского полуострова, также отмечено несколько участков повышенной объёмной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в удалённых от техногенных источников районах. Анализ расположения этих участков в поле температуры и солёности показывает, что приток радионуклидов обеспечивается ответвлениями солёных атлантических вод Мурманского прибрежного течения, ориентированными рельефом дна. Наиболее глубоко эти потоки внедряются в прибрежную зону в районах губ Терiberская, Зеленецкая, Ивановская и далее вдоль Мурманского побережья.

Формирование фона радионуклидов в донных отложениях побережья. Интервал изменчивости величин удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в донных отложениях близок (таблица) к значениям наших предыдущих исследований (Объекты ..., 2017; Динамика ..., 2019; Концентрация ..., 2020). В западных участках прибрежной зоны также установлено долговременное влияние местных источников.

Распределение «пятен» повышенной активности определяется не только близостью объектов атомной инфраструктуры непосредственно в губах Варангер-фьорда, Мотовского и Кольского заливов. Так, 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, что обеспечивает повышенное накопление радиоизотопов в осадке (Митяев и др., 2018; Ильин, Усягина 2019; Радиоэкологическое ..., 2023). Глубиной опосредована связь накоплений техногенных радионуклидов со структурой донных отложений. Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в среднем составляет 4.6 и 0.6 Бк/кг сухого осадка соответственно.

В Кольском заливе высокий порог в рельефе дна его устьевой части ослабляет вымывание осажённого материала из ковша. Поэтому концентрация радионуклидов его средней и северной части повышена, и в целом донные отложения в нем более загрязнены, чем в Мотовском заливе.

В открытых районах побережья накопление ^{137}Cs существенно снижается – до 0.2–0.5 Бк/кг с удалением на восток от устьевых областей Кольского и Мотовского заливов (рис. 3). Выделяются локальные участки относительно повышенной удельной активности ^{137}Cs (2–3.7 Бк/кг), соответствующие ответвлениям прибрежного желоба и вихрям теплого Мурманского прибрежного течения. Удельная активность ^{90}Sr на таких участках увеличивается в отдельных точках до 2.5–4.5 Бк/кг. Максимальная активность $^{239,240}\text{Pu}$, также как ^{137}Cs и ^{90}Sr , отмечена в западных участках прибрежной зоны.

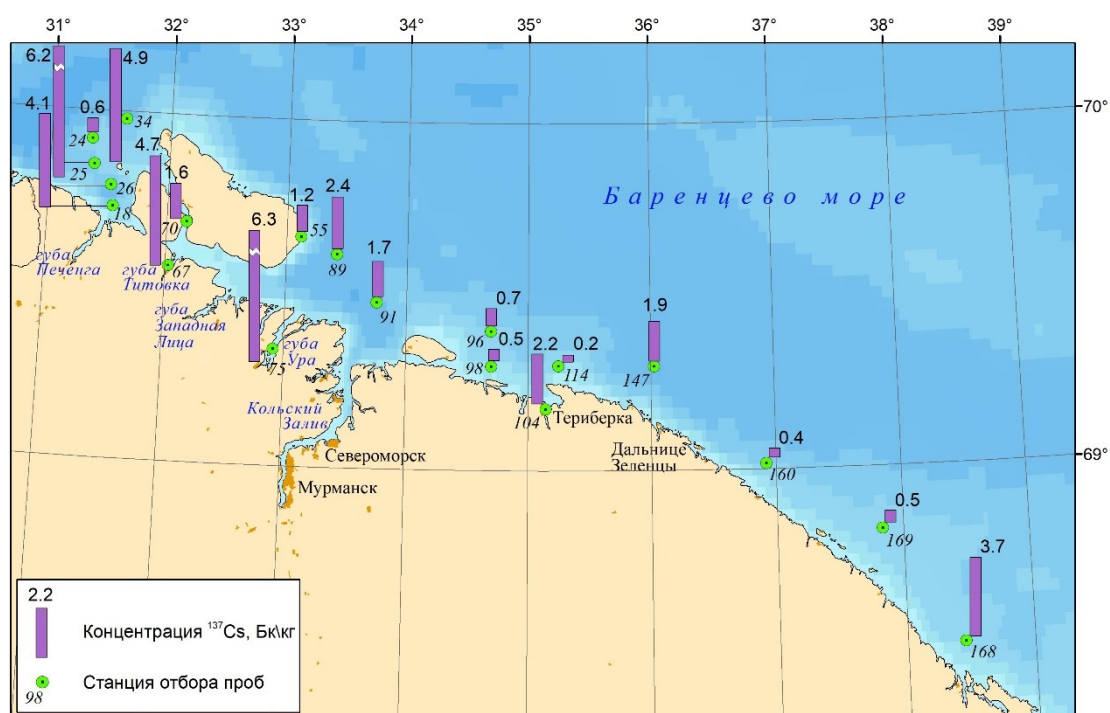


Рис. 3. Удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях прибрежной зоны Мурманска, 2021 г.

Fig. 3. Specific activity of ^{137}Cs in bottom sediments of the coastal zone of the Murman in 2021

Используя сходство в общей тенденции распределения этих изотопов с запада на восток, на примере ^{137}Cs , данных о котором гораздо больше, мы с высокой долей вероятности можем выделить основные закономерности формирования фона концентраций плутония в прибрежье. Можно утверждать, что образование максимумов активности $^{239,240}\text{Pu}$ также связано с влиянием атомной инфраструктуры в губах прибрежья (Ильин и др., 2015; Объекты ..., 2017). Точечных источников в Мотовском заливе несколько. Это сток из губ Андреева (Западная Лица) с хранилищем ядерных отходов, а также из губ Ара и Ура с инфраструктурой флота.

Распределение «пятен» повышенной активности $^{239,240}\text{Pu}$, как и ^{137}Cs , в центральных частях заливов соответствует депрессиям донного рельефа, в которых происходит накопление тонкодисперсного осадочного материала. Однако корреляционной связи удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$ с глубиной установить не удалось из-за недостатка данных.

В открытых районах побережья накопление ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ существенно снижается с удалением на восток от устьевых областей Кольского и Мотовского заливов, уровень накопления уже хорошо соответствует фону плутония в почвах России (0.8 Бк/кг) и осадках открытых районов моря (0.95 Бк/кг) (Новые ..., 2011; Лукашенко, Эдомская, 2021). Здесь также выделяются локальные участки относительного роста удельной активности цезия и плутония, связанные не только с транзитом радионуклидов с водами Мурманского течения, но и с накоплением тонкодисперсных отложений в ответвлениях желоба.

Динамика радиоактивного загрязнения воды прибрежной зоны. Запрещение испытаний ядерного оружия в 1963 г. и нормирование сброса отходов европейскими радиохимическими заводами в конце 1980-х гг. снизило концентрацию ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и донных отложениях Баренцева моря в целом. Однако полного вымывания радионуклидов из экосистемы не происходит, и последние 15–20 лет их концентрация в воде и донных осадках сохраняется на относительно низком, но стабильном уровне. Нами проанализированы данные многолетних радиоэкологических наблюдений ММБИ РАН в прибрежной зоне Мурмана. Использованы материалы эпизодических наблюдений с 1994 по 2005 гг. и данные регулярных наблюдений с 2005 по 2021 гг. (рисунки 4, 5). Исследовано радиоэкологическое состояние воды и поверхностного слоя донных осадков (0–3 см) в различных участках побережья.

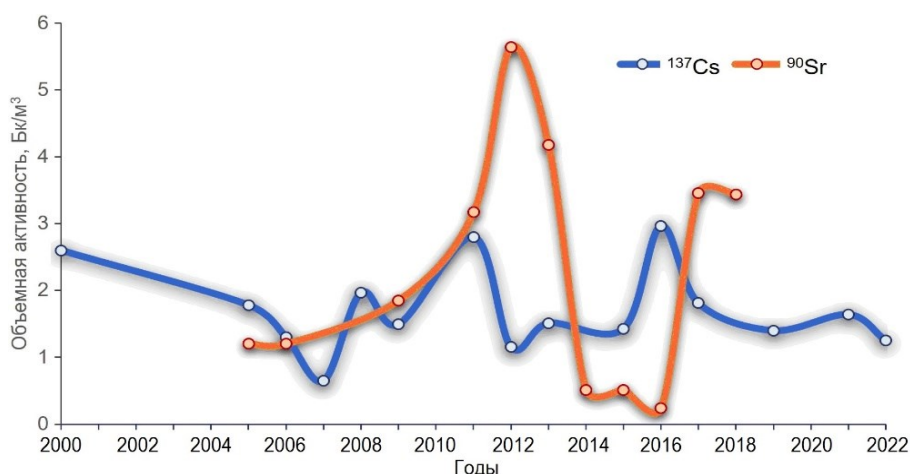


Рис. 4. Динамика среднегодовых значений активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде прибрежной зоны Мурмана
Fig. 4. Dynamics of the average annual values of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity in the waters of the Murmansk coastal zone

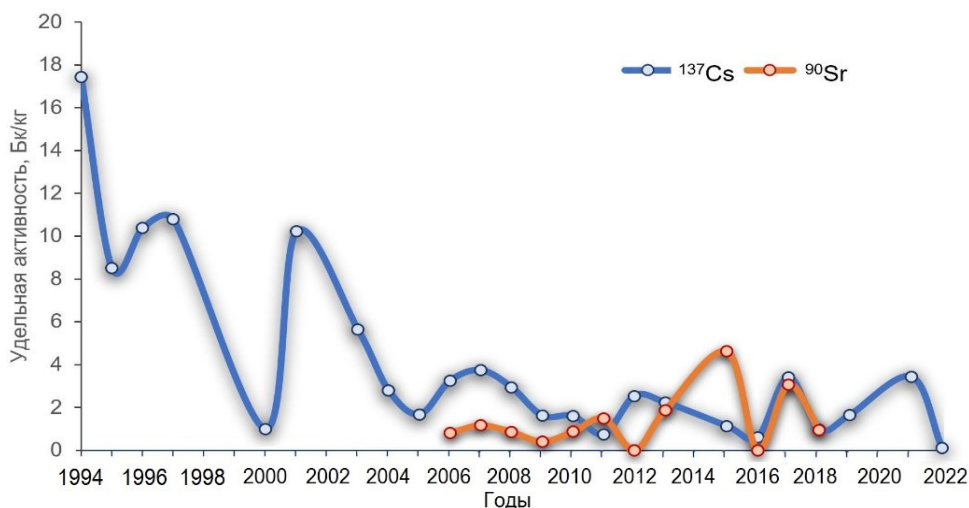


Рис. 5. Динамика среднегодовых значений активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в донных отложениях прибрежной зоны Мурмана
Fig. 5. Dynamics of the average annual values of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity in bottom sediments of the Murmansk coastal zone

С начала 2000 гг. 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 радионуклидов в прибрежье в течение последних 20 лет. В целом нисходящий тренд активности ^{137}Cs и ^{90}Sr осложняется короткопериодной осцилляцией их осредненных концентраций. В водной среде графически отображаются 2 восходящие и 2 нисходящие фазы осцилляции (рис. 4). При этом фазы осцилляции ^{90}Sr запаздывают относительно осцилляций ^{137}Cs . Фазы близки по продолжительности, но не совпадают полностью. В донных отложениях такие различия также наблюдаются, однако они сглажены, по-видимому, вследствие низкой концентрации радионуклидов.

Цикличность в динамике концентраций, касающихся водной среды, может быть связана с таковой в поступлении североатлантических вод в прибрежную зону с течениями. Сдвиг фаз и другие различия в значительной степени обусловлены, вероятно, различиями геохимического поведения ^{137}Cs и ^{90}Sr в водной среде, а также процессами седиментации осадочного материала из водной толщи. Соединения стронция менее активно сорбируются взвесью и дольше остаются в водной среде по сравнению с цезием.

В связи с этим нами выполнен гармонический анализ ряда концентрации ^{90}Sr в водной массе прибрежья (Гордеева, 2017; Малинин, 2020). Выявлены две основные гармоники с периодами 4.5 и 3.58 года. Эти гармоники весьма удовлетворительно описывают наблюдаемую изменчивость, их вклад обеспечивает, соответственно, 45 и 42 % изменчивости ряда средних концентраций. Однако спектр наблюдаемых амплитуд осложняется дополнительными гармоническими и негармоническими осцилляциями, вызванными комплексом второстепенных дополнительных факторов. Причиной существенных расхождений расчетных рядов (13 %) может оказаться также небольшая длина исходного ряда данных (исходной выборки). Это допускает большое количество незначимых и менее выраженных гармоник в спектре динамических колебаний. Дополнительно разнородность распределения ^{90}Sr на участках морского дна усугубляют неравномерности рельефа и гранулометрической структуры донных осадений. Следует указать, что более высокая удельная активность отмечена во впадинах донного рельефа западной части моря, где более всего концентрируются тонкодисперсные отложения (Митяев и др., 2018; Динамика ..., 2019).

Заключение

Высокие уровни радиоактивного загрязнения районов прибрежья Кольского полуострова были выявлены в 1990-х гг. В прибрежье Мурмана главными источниками радиоизотопного загрязнения являлись объекты атомной инфраструктуры флота в губе Печенга, заливах Кольский и Мотовский, в проливе Йоканьгский рейд. В настоящее время радиоизотопное загрязнение морской прибрежной среды дифференцировано, но повсюду оценивается как низкофоновое, не вызывающее опасений за безопасность природопользования. В Кольском 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 Мурманского прибрежья – это сток из губы Андреева (Западная Лица) и суммарный сток из Кольского залива. Несмотря на повышенный фон ^{137}Cs и ^{90}Sr на этих участках, короткоживущие радионуклиды при исследованиях здесь не были обнаружены. Это свидетельствует, по-видимому, об остаточных следах эмиссии радионуклидов, не имеющей характера инцидентов.

В акватории, удаленной от техногенных источников радиации, фон удельной и объемной активности радиоизотопов значительно снижен. В то же время полученные данные подтверждают результаты более ранних наблюдений, свидетельствующих о влиянии притока радионуклидов в прибрежную зону с вихрями атлантических вод прибрежного течения.

Полученные данные могут быть приняты для решения фундаментальных научных задач и удовлетворения социальных запросов населения Мурманской области, а также могут рассматриваться как элемент мониторинга и необходимая информация для развития морехозяйственной деятельности.

Работа выполнена по теме «Структурно-динамические трансформации морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ государственной регистрации 124013000709-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН, а также при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-17-00243).

Список литературы

1. Вакуловский С. М., Никитин А. И., Чумичев В. Б. О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западноевропейских радиохимических заводов // Атомная энергия. 1985. Т. 58, вып. 6. С. 445–449.
2. Гордеева С. М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». СПб.: Изд. РГГМУ, 2017. 68 с. URL: http://elibrshu.ru/files_books/pdf/img-503135449.pdf
3. Датирование современной осадочной толщи краевых бассейнов Восточного Мурмана (Кольский полуостров) на примере губ Ярнышная и Зеленецкая / Н. И. Мещеряков, И. С. Усягина, Г. В. Ильин, Н. С. Иванова // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14, № 3. С. 393–405. doi:10.25283/2223-4594-2024-3-393-405
4. Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков. Часть 2. Донные отложения / Г. Г. Матишов, Г. В. Ильин, И. С. Усягина, Е. Э. Кириллова // Наука Юга России. 2019. Т. 15, № 4. С. 24–35. doi:10.7868/S25001640190404
5. Ильин Г. В., Усягина И. С. Радиоэкологические исследования в Мурманском прибрежье Баренцева моря как часть мониторинга среды при обращении с радиоактивными отходами // Атомная энергия. 2019. Т. 126, вып. 5. С. 285–289. URL: https://elibr.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t126-5_2019/p287/
6. Ильин Г. В., Усягина И. С., Касаткина Н. Е. Радиоэкологическое состояние морской и наземной среды в районе губы Андреева // Атомная энергия. 2015. Т. 118, вып. 3. С. 168–174. URL: https://elibr.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t118-3_2015/p170/
7. Концентрация искусственных радиоизотопов в биоте арктического шельфа в современных условиях (2013–2018 гг.) / Г. Г. Матишов, Г. В. Ильин, И. С. Усягина, Д. А. Валуйская, Е. Э. Кириллова // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 494, № 1. С. 67–71. doi:10.31857/S2686739720090133
8. Лукашенко С. Н., Эдомская М. А. Плутоний в окружающей среде: источники, механизмы распространения, концентрации // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61, № 4. С. 394–424. doi:10.31857/S086980312104007X
9. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд. РГГМУ, 2020. 408 с. URL: http://elibrshu.ru/files_books/pdf/img-417184359.pdf
10. Матишов Г. Г., Усягина И. С., Ильин Г. В. Реконструкция поступления и миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr в экосистеме Баренцева моря // Вестн. РФФИ. 2022. Т. 2, № 114. С. 119–135. doi:10.22204/2410-4639-2022-114-02-119-135
11. Матишов Д. Г., Матишов Г. Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. 417 с.
12. Митяев М. В., Герасимова М. В., Павлова Л. Г. Современные донные отложения Мотовского залива (Баренцево море) // Тр. Кольского науч. центра. 2018. Т. 4, № 9. Сер. Океанология. Вып. 5. С. 118–130. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018-9-4-118-130
13. Новые данные о концентрации изотопов плутония в отложениях Баренцева моря / Г. Г. Матишов, Н. Е. Касаткина, А. П. Леппанен, Д. Г. Матишов, Д. Солатие // Докл. РАН. 2011. Т. 440, № 5. С. 696–700. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17058002_37241647.pdf
14. Объекты инфраструктуры атомного флота как источник радиоактивного загрязнения Баренцева моря (на примере хранилища отходов в губе Андреева) / Г. В. Ильин, Н. Е. Касаткина, Д. В. Моисеев, И. С. Усягина // Атомная энергия. 2017. Т. 122, вып. 2. С. 108–114. URL: https://elibr.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t122-2_2017/p108/
15. Радиоактивное загрязнение Северного Ледовитого океана по результатам наблюдений в 1985–1987 гг. / А. И. Никитин, И. Ю. Катрич, А. И. Кабанов, В. Б. Чумичев, В. М. Смагин // Атомная энергия. 1991. Т. 71, вып. 2. С. 169–172.
16. Радиоэкологическое состояние среды морских экосистем Арктики в условиях современного природопользования / Г. В. Ильин, И. С. Усягина, Н. Е. Касаткина, Д. А. Валуйская // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2020. Т. 5, № 11. Сер. Океанология. Вып. 7. С. 260–274. doi:10.37614/2307-5252.2020.11.4.013

17. Радиоэкологическое состояние прибрежной зоны Кольского полуострова (по данным наблюдений в 2013–2020 годах) / Г. Г. Матишов, Г. В. Ильин, И. С. Усягина, Д. В. Моисеев, Д. А. Валуйская // Метеорология и гидрология. 2023. № 4. С. 99–110. doi:10.52002/01-2906-2023-4-99-110
18. Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean // Deep Sea Res. II. 2003. Vol. 50, № 17/21. P. 2597–2606. doi:10.1016/S0967-0645(03)00137-1
19. Plutonium isotopes as tracers for ocean processes: A review / P. Lindahl, S. H. Lee, P. Worsfold, M. Keith-Roach // J. Mar. Environ. Res. 2010. Vol. 69(2). P. 73–84. doi:10.1016/j.marenvres.2009.08.002

References

1. Vakulovskiy S. M., Nikitin A. I., Chumichev V. B. O zagryaznenii arkticheskikh morey radioaktivnymi otkhodami zapadnoevropeyskikh radiokhimicheskikh zavodov [On the contamination of the Arctic seas with radioactive waste from Western European radiochemical plants]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 1985, Vol. 58, Iss. 6, pp. 445–449 (in Russ.).
2. Gordeeva S. M. *Praktikum po distsipline «Statisticheskie metody obrabotki i analiza gidrometeorologicheskoy informatsii»* [A workshop on the discipline «Statistical methods of processing and analyzing hydrometeorological information»]. Saint Petersburg, Publ. RGGMU, 2017, 68 p. (In Russ.). Available at: http://elibrshu.ru/files_books/pdf/img-503135449.pdf
3. Meshcheryakov N. I., Usyagina I. S., Il'in G. V., Ivanova N. S. Datirovanie sovremennoy osadochnoy tolshchi kraevykh basseynov Vostochnogo Murmana (Kol'skiy poluoostrov) na primere gub Yarnyshnaya i Zelenetskaya [Dating of the recent sedimentary strata of the marginal basins of Eastern Murman (Kola Peninsula) using the example of Yarnyshnaya and Zelenetskaya bays]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy], 2024, Vol. 14, No. 3, pp. 393–405 (In Russ.). doi:10.25283/2223-4594-2024-3-393-405
4. Matishov G. G., Il'in G. V., Usyagina I. S., Kirillova E. E. Dinamika iskusstvennykh radionuklidov v ekosistemakh morey Severnogo Ledovitogo okeana na rubezhe XX–XXI vekov. Chast' 2. Donnye otlozheniya [Dynamics of artificial radionuclides in the ecosystems of the seas of the Arctic Ocean at the turn of the 21st century. Part 2. Bottom sediments]. *Nauka Yuga Rossii* [Science in the South of Russia], 2019, Vol. 15, No. 4, pp. 24–35 (In Russ.). doi:10.7868/S25001640190404
5. Il'in G. V., Usyagina I. S. Radioekologicheskie issledovaniya v Murmanskoy pribrezh'e Barentseva morya kak chast' monitoringa sredi pri obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami [Radioecological studies in the Murmansk littoral of the Barents Sea as part of environmental monitoring in radwaste management]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2019, Vol. 126, Iss. 5, pp. 285–289 (In Russ.). doi:10.1007/s10512-019-00558-6
6. Il'in G. V., Usyagina I. S., Kasatkina N. E. Radioekologicheskoe sostoyanie morskoy i nazemnoy sredi v rayone guby Andreeva [Radioecological state of marine and land environments in the region Andreeva Bay]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2015, Vol. 118, Iss. 3, pp. 168–174 (in Russ.). Available at: https://elibrbiblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t118-3_2015/p170/
7. Matishov G. G., Il'in G. V., Usyagina I. S., Valuyskaya D. A., Kirillova E. E. Kontsentratsiya iskusstvennykh radioizotopov v biote arkticheskogo shel'fa v sovremennykh usloviyakh (2013–2018 gg.) [Current levels of artificial radioisotopes in biota from the Arctic continental shelf (2013–2018)]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle* [Doklady RAS. Earth Sciences], 2020, Vol. 494, No. 1, pp. 67–71 (In Russ.). doi:10.31857/S2686739720090133
8. Lukashenko S. N., Edomskeya M. A. Plutoniyy v okruzhayushchey srede: istochniki, mekhanizmy rasprostraneniya, kontsentratsii [Plutonium in the environment: sources, distribution mechanisms, concentrations]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. [Radiation Biology. Radioecology], 2021, Vol. 61, No. 4, pp. 394–424 (In Russ.). doi:10.31857/S086980312104007X

9. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii* [Statistical methods for analyzing hydrometeorological information], Saint Petersburg, Publ. RGGMU, 2020, 408 p. (In Russ.). Available at: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-417184359.pdf
10. Matishov G. G., Usyagina I. S., Il'in G. V. Rekonstruktsiya postupleniya i migratsii ^{137}Cs i ^{90}Sr v ekosisteme Barentseva morya [Reconstruction of the Arrival and Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Ecosystem of the Barents Sea]. *Vestnik Rossiyskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy* [Bulletin Russian Foundation for Basic Research], 2022, Vol. 2, No. 114, pp. 119–135 (In Russ.). doi:10.22204/2410-4639-2022-114-02-119-135
11. Matishov D. G., Matishov G. G. *Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya* [Radiation ecological oceanology]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2001, 417 p. (In Russ.).
12. Mityaev M. V., Gerasimova M. V., Pavlova L. G. Sovremennye donnye otlozheniya Motovskogo zaliva (Barentsevo more) [Modern bottom sediments of the Motovsky Bay (Barents Sea)]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, Seriya: Okeanologiya, vypusk 5* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Oceanology, iss. 5], 2018, Vol. 4, No. 9, pp. 118–130 (In Russ.). doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018-9-4-118-130
13. Matishov G. G., Kasatkina N. E., Leppanen A. P., Matishov D. G., Solatie D. Novye dannye o kontsentratsii izotopov plutoniya v otlozheniyakh Barentseva morya [New data on the concentration of plutonium isotopes in the sediments of the Barents Sea]. *Doklady Akademii Nauk* [Doklady RAS], 2011. Vol. 440, No. 5, pp. 696–700 (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17058002_37241647.pdf
14. Il'in G. V., Kasatkina N. E., Moiseev D. V., Usyagina I. S. Ob"ekty infrastruktury atomnogo flota kak istochnik radioaktivnogo zagryazneniya Barentseva morya (na primere khranilishcha otkhodov v gube Andreeva) [Infrastructure objects of the nuclear fleet as sources of radioactive contamination of the Barents Sea (using the example of a waste storage facility in Andreeva Bay)]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2017, Vol. 122, Iss. 2, pp. 108–114 (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t122-2_2017/p108/
15. Nikitin A. I., Katrich I. Yu., Kabanov A. I., Chumichev V. B., Smagin V. M. Radioaktivnoe zagryaznenie Severnogo Ledovitogo okeana po rezul'tatam nablyudeniya v 1985–1987 gg. [Radioactive contamination of the Arctic Ocean, based on observations in 1985–1987]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 1991, Vol. 71, Iss. 2, pp. 169–172 (In Russ.).
16. Il'in G. V., Usyagina I. S., Kasatkina N. E., Valuyskaya D. A. Radioekologicheskoe sostoyanie sredy morskikh ekosistem Arktiki v usloviyakh sovremennogo prirodopol'zovaniya [Radioecological status of arctic marine ecosystems and current ocean and coastal management]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, Seriya: Okeanologiya, vypusk 7* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Oceanology, iss. 7], 2020, Vol. 5, No. 11, pp. 260–274 (In Russ.). doi:10.37614/2307-5252.2020.11.4.013
17. Matishov G. G., Il'in G. V., Usyagina I. S., Moiseev D. V., Valuyskaya D. A. Radioekologicheskoe sostoyanie pribrezhnoy zony Kol'skogo poluostrova (po dannym nablyudeniya v 2013–2020 godakh) [Radioecological condition of the Kola Peninsula coastal zone according to observations in 2013–2020]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2023, No. 4, pp. 99–110 (In Russ.). doi:10.3103/S106837392304009X
18. Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean. *Deep Sea Res. II*, 2003, Vol. 50, No. 17/21, pp. 2597–2606. doi:10.1016/S0967-0645(03)00137-1
19. 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(2), pp. 73–84. doi:10.1016/j.marenvres.2009.08.002

Информация об авторах

Геннадий Васильевич Ильин – кандидат географических наук, главный научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-5707-9114>

Ирина Сергеевна Усягина – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-5984-6479>

Information about the authors

Gennady V. Ilyin – PhD (Geography), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5707-9114>

Irina S. Usyagina – PhD (Geography), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5984-6479>

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 23.06.2025.
The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 23.06.2025.