

УДК 546.36 (268.45+268.52)

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ^{134}Cs В БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ МОРЯХ (1960–2020 гг.)

© 2021 г. Академик РАН Г. Г. Матишов^{1, 2}, Г. В. Ильин¹, И. С. Усягина^{1,*}

Поступило 08.02.2021 г.

После доработки 17.05.2021 г.

Принято к публикации 18.05.2021 г.

Дана оценка роли короткоживущего радионуклида ^{134}Cs в формировании радиоэкологического фона в морских бассейнах Арктики. Проанализированы материалы многолетних наблюдений ММБИ РАН по содержанию ^{134}Cs в морской среде и береговой зоне Западной Арктики, включая высокоширотные архипелаги. Показаны уровни его активности в почве, лишайниках, водорослях, рыбе, морской воде и донных отложениях. Исследуются географические особенности распространения ^{134}Cs в морской и прибрежной среде. Указаны очевидные и потенциальные источники поступления этого радионуклида в морские экосистемы полярных морей. Констатируются относительно редкая встречаемость ^{134}Cs в спектре радиоактивного загрязнения в настоящее время и его низкая удельная активность. Короткий период полураспада делает ^{134}Cs маркером недавних поступлений радиоактивных загрязнений, к примеру, с выбросами АЭС «Фукусима-1» и местных локальных источников. Местными действующими источниками могут быть объекты инфраструктуры атомного флота и ледники высокоширотных архипелагов. Обнаружение ^{134}Cs в некоторых пробах современных донных осадков внешнего шельфа и фьордов Шпицбергена обусловлено выносом ранее накопленных радионуклидов при таянии выводных ледников. Показан современный фон удельной активности ^{134}Cs в экосистемах морей арктического шельфа, превышение которого требует незамедлительных исследований и поиска его источников.

Ключевые слова: радиоактивность, морская среда, донные осадки, источники радиации

DOI: 10.31857/S2686739721090140

Короткоживущие радиоактивные элементы ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu в среде и биоте арктических морей имеют ограниченное распространение, регистрируются эпизодически и привязаны к определенным отрезкам истории атомных испытаний и инцидентов [1]. В Баренцевом и Карском морях у мест сброса радиоактивных отходов, на расстоянии 5–70 км в морских грунтах, макрофитах, моллюсках удельные активности радионуклидов, как правило, на один-два порядка выше, чем в аккумулярующих желобах морского шельфа.

Закономерно, что ^{137}Cs и ^{90}Sr , у которых период полураспада около 30 лет, распространены в Арктике повсеместно в постядерную эпоху. Напротив, ^{134}Cs с периодом полураспада около двух лет – крайне редкий элемент в морской и наземной среде. Его активности в морской воде малы и

при наблюдениях в 2012–2018 гг. чаще всего были ниже предела обнаружения ($<0.2 \text{ Бк/м}^3$). Это обстоятельство затрудняет определение источников и объемов его эмиссии.

Цель работы – исследовать роль короткоживущих радионуклидов в формировании общего радиоэкологического фона в среде и биоте арктических морей России, провести анализ географических особенностей распространения ^{134}Cs , показать источники этого редко встречающегося в морской и прибрежной среде изотопа. Задача исследования – выявить и показать местные и трансграничные миграции радиоактивного вещества, базируясь на результатах анализов образцов почвы, лишайников, водорослей, зообентоса, рыб, морской воды, донных отложений. Материал для изучения собран Мурманским морским биологическим институтом Российской академии наук (ММБИ РАН) в течение 30-летнего периода экспедиций на высокоширотные архипелаги Новой Земли, Земли Франца-Иосифа, Шпицбергена, в заливы и губы Кольского полуострова, в ключевые районы шельфа Баренцева, Белого, Карского морей (рис. 1).

¹ Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, Мурманск, Россия

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: usjagina@mmbi.info

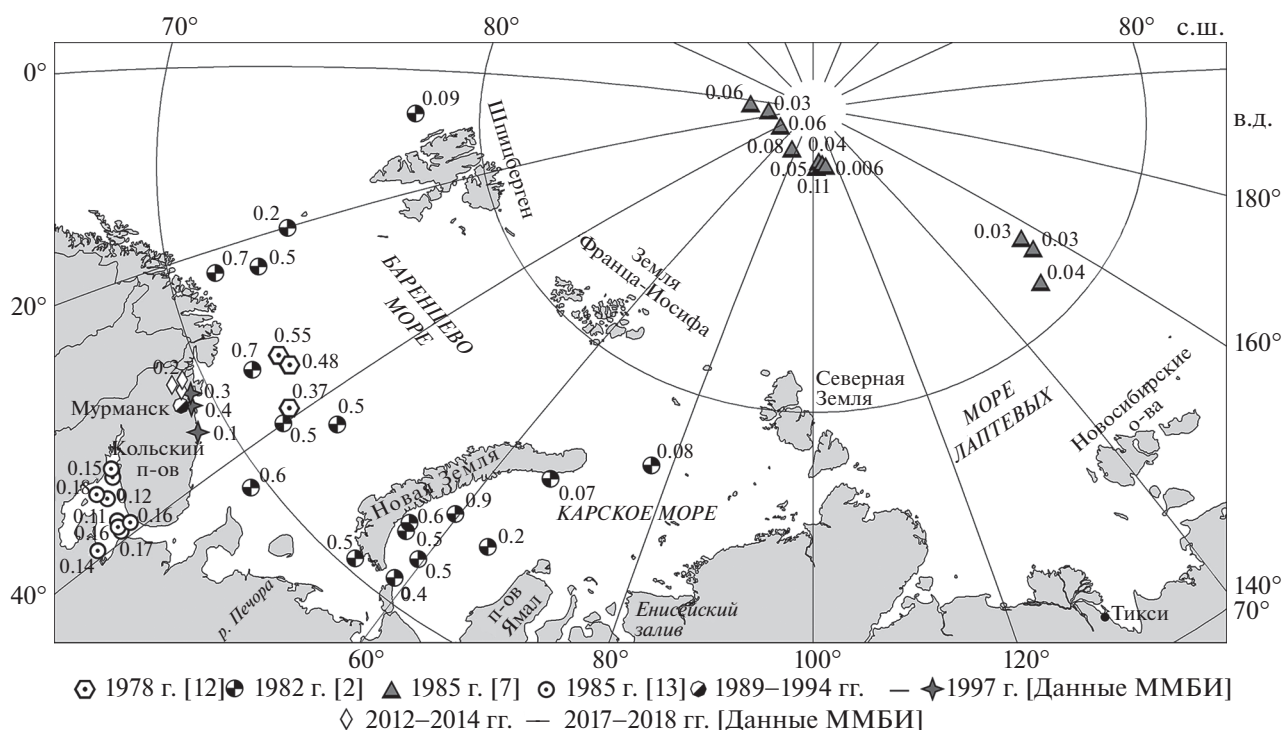


Рис. 1. Карта распределения объемной активности ^{134}Cs в водах арктического бассейна (Бк/м³), 1978–2018 гг.

Радиометрический анализ проб выполнен в лаборатории ММБИ РАН. Измерения проводили на спектрометрах гамма-излучения “InSpector-2000”, гамма- и рентгеновского излучения “b13237” (“Canberra”, США). Спектры проанализированы с помощью программного обеспечения Genie-2000.

Ядерные взрывы. Долгоживущие искусственные радионуклиды, такие как ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$ появились в Арктике после ядерных испытаний в воздушной и морской среде, сбросов радиоактивных отходов, переноса их морскими течениями и стоками сибирских рек. Максимум ядерных испытаний и радиоактивных выбросов на новоземельском атомном полигоне приходится на 1954–1958 и 1961–1962 гг. В губе Черной даже в 1991 г. в донных отложениях сохранялась на высоком уровне удельная активность $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs (1.148; 3000; 618 и 1450 Бк/кг сухого осадка соответственно) [1]. В водах Баренцева и Карского морей ^{134}Cs был обнаружен в небольших количествах с начала выбросов радиоактивного материала в атмосферу (в тропосферу и стратосферу) [1, 2].

После запрета в 1963 г. ядерных испытаний в атмосфере наметилась тенденция снижения загрязнения арктических морей.

Стоки и трансграничный перенос. Стоки западноевропейских и сибирских радиохимических заводов вызвали в 1970–1980 гг. рост загрязнения

вод Карского, Баренцева и Норвежского морей. Это повышение в основном определялось переносом стоков западноевропейских заводов “Селлафилд” и “Ла-Хаг” [3]. В Ирландском море вблизи мест сброса загрязненных отходов в 1960–1990 г. объемная активность ^{137}Cs в поверхностных водах достигала 200–210 Бк/м³. В донных отложениях моря в начале 1990 гг. также отмечалась высокая удельная активность техногенных радиоизотопов: ^{137}Cs — до 400 Бк/кг и ^{90}Sr — до 250 Бк/кг [4, 5]. Радиоактивный шлейф из Западной Европы пересекал шельф Баренцева моря и через 6 лет достигал Центрального Полярного бассейна. В результате объемная активность радиоцезия ^{137}Cs в водах этого бассейна увеличивалась до 10–20 Бк/м³ [6].

В отличие от мест проведения ядерных взрывов (район губы Черной), в зонах распространения отходов “Селлафилда” постоянно отмечалась активность ^{134}Cs . Так, осенью 1979 г. в районе Медвежинской банки в Баренцевом море объемная активность ^{134}Cs и ^{137}Cs в воде составляла 8–15 Бк/м³. Загрязнение также вызвано трансграничным переносом северо-атлантических вод, содержащих стоки заводов “Селлафилд” и “Ла Хаг” [7, 8]. Однако максимальный уровень загрязнения вод, поступающих в Баренцево море, отмечен в прибрежных струях Норвежского течения. В 1979 г. объемная активность ^{137}Cs в поверхностных водах и на глубине 100 м варьировала от

40 до 80 Бк/м³. В ответвлениях этого потока, в водах Мурманского прибрежного течения обнаруживался ¹³⁴Cs, его объемная активность не превышала 0.2–0.7 Бк/м³.

В качестве трассера трансграничного переноса в Арктический бассейн радиоактивных отходов британских радиохимических предприятий “Селлафильд” был выбран ¹³⁴Cs [7]. Этот радионуклид входил в состав заводских отходов и практически отсутствовал в атмосферных выпадениях вплоть до аварии на Чернобыльской АЭС. Атмосферные выпадения продуктов аварийного выброса привели к загрязнению ¹³⁴Cs морских арктических акваторий. В середине 80-х годов в водах Центрального Полярного бассейна (рис. 1) ¹³⁴Cs отмечался в очень малых количествах 0.03–0.11 Бк/м³. [2, 7]. Его объемная активность в поверхностных водах Баренцева, Карского и Гренландского морей составляла 0.07–0.7 Бк/м³.

Радиохимические комбинаты ПО “Маяк”, ФГУП “Горно-химический комбинат”, АО “Сибирский химический комбинат” и другие в 1950–1990 гг., сбрасывая отходы в Енисей и Обь, являлись источником техногенных радионуклидов в Карском море [1, 9]. Значительное радиационное загрязнение отмечалось в донных отложениях Енисейской и Обской губ.

В Новоземельском желобе под распресненным слоем залегают воды с объемной активностью ¹³⁴Cs от 0.1 до 0.7 Бк/м³ (рис. 1). Отношение объемных активностей ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs составляло 0.019–0.034. Очевидно, что происхождение ¹³⁴Cs здесь может быть связано не с западноевропейскими заводами, а с местными источниками [10]. Основные пути переноса радионуклидов были впервые показаны на карте “Уровни и основные направления переноса радионуклидов в Баренцевом и Карском морях” [11].

Выбросы при авариях на ядерных объектах. В результате аварийного выброса на Чернобыльской АЭС в северные моря с атмосферными выпадениями и речными потоками поступило огромное количество ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs и других радиоизотопов. Если до аварии на Чернобыльской АЭС в водах Балтики ¹³⁴Cs не обнаруживался, то в 1986 г. уровни объемной/удельной активности ¹³⁴Cs в воде и планктоне Финского залива достигла соответственно 5900 Бк/м³ и 1500 Бк/кг сухой массы соответственно [14, 15]. В донных отложениях Балтики удельная активность ¹³⁴Cs составила 100–400 Бк/кг. В 1986–1987 гг. в балтийской сельди и окунях накапливалось ¹³⁴Cs от 3 до 96 Бк/кг, а в треске в проливе Скагеррак – около 0.3 Бк/кг [15, 16].

В 1990-е годы объемная активность ¹³⁷Cs в водах Скагеррака составляла 50–100 Бк/м³ из-за по-

стоянного выхода в пролив [17]. В Баренцево-Карском бассейне чернобыльский шлейф формировался за счет морской трансграничной адвекции загрязненных балтийских вод и за счет смыва с водосборов северных рек.

В начале 1990-х годов в донных отложениях Печорской губы удельная активность ¹³⁴Cs колебалась от 0.4 до 1.13 Бк/кг, а в Чешской губе составляла 0.6 Бк/кг. Вероятно, происхождение ¹³⁴Cs связано с глобальными выпадениями в бассейне рек.

На побережье Кольского полуострова и островах юго-востока Баренцева моря удельная активность ¹³⁴Cs в лишайниках была выше, чем на островах высокоширотных архипелагов, изменялась от 0 до 32 Бк/кг сухой массы. В 1991 г. на южных островах архипелага Земля Франца-Иосифа на севере Новой Земли удельная активность ¹³⁴Cs в лишайниках изменялась от 0.5 до 20.6 Бк/кг [1]. На островах отмечаются различия уровня загрязнения: на о. Гукера – до 20.6 Бк/кг, о. Скатт-Келти – 2.4 Бк/кг, о. Мейбелл – 0.5 Бк/кг (рис. 2).

В 2015 г. ¹³⁴Cs был обнаружен в донных отложениях во фьордах и на шельфе Западного Шпицбергена. Ледники Шпицбергена рассматриваются как зоны ледовой аккумуляции атмосферных выпадений, в том числе аэрозоль, возникших при аварии на АЭС “Фукусима-1”. Также радионуклид зарегистрирован на юге шпицбергенского шельфа в донных отложениях Зюйдкапского желоба, где его удельная активность ¹³⁴Cs составляла от 0.7 до 1.8 Бк/кг. В центральных частях моря, на станциях трансбаренцевоморского разреза вдоль “Кольского меридиана” (33°30′ в.д.) этот радионуклид не был обнаружен с начала 2000-х годов.

Местные источники. Эмиссия радионуклидов с баз атомных флотов охватывает конец XX и начало XXI века, когда шло стремительное развитие атомного подводного и надводного флотов, заводской, складской и ремонтной баз в губах Кольского и Мотовского заливов. В губе Западная Лица, где находится база атомных подводных лодок, в губе Андреева – хранилище отработанного ядерного топлива, имели место аварии с неконтролируемыми выбросами радиоактивных веществ на акваторию и в атмосферу [17]. Произшедшая в 1982 г. аварийная утечка радиоактивных отходов из хранилища вызвала локальное поступление техногенных радионуклидов в губу Андреева и частичный выход загрязнений в губу Западная Лица и Мотовский залив.

С 1989 г. источником загрязнений являлась установка по очистке жидких радиоактивных отходов, расположенная на территории РТП “Атомфлот” (ныне ФГУП “Атомфлот”, г. Мурманск). В среднем за период с 1989 по 1994 г., когда применялась данная технология, объем ¹³⁷Cs и



Рис. 2. Карта распределения удельной активности ^{134}Cs в лишайниках прибрежных наземных экосистем Баренцево-Карского региона (Бк/кг сухой массы), 1978–2018 гг.

^{90}Sr , поступающего с предприятия, составил 1.6×10^7 и 7.6×10^7 Бк/год соответственно. Суммарная активность ^{134}Cs во всем объеме жидких радиоактивных отходов оценивалась от 3.3×10^6 до 62.8×10^6 Бк [1]. Максимальный сброс радионуклидов в Кольский залив был зафиксирован в 1992 г.

В 1988 г. в донных осадках Кольского залива близ атомных баз были отмечены высокие уровни удельной активности ^{60}Co – 74 Бк/кг в губе Пала, и 28 Бк/кг – в губе Екатерининская гавань. В некоторых пробах были определены ^{134}Cs , ^{125}Sb , ^{154}Eu . Наиболее вероятно, короткоживущий ^{134}Cs на дне залива имеет местное происхождение [1, 9].

В отобранных в 1996–1997 гг. во внешней части губы Западная Лица мелкопесчаных и алевритовых осадках присутствовали ^{137}Cs (от 0.7 до 50 Бк/кг), ^{60}Cs (от 0.5 до 4.0 Бк/кг) и $^{239,240}\text{Pu}$ (около 2 Бк/кг). На этой же акватории в поверхностных морских водах объемная активность

^{137}Cs и ^{134}Cs составляла 4.9 и 0.2 Бк/м³. В 2013 г. удельная активность ^{134}Cs в донных отложениях не превышала 0.2 Бк/кг.

В Кандалакшском заливе средняя объемная активность ^{134}Cs в верхних и глубинных слоях водоема составляла 0.14–0.17 Бк/м³. В донных осадках радионуклид встречался эпизодически, по-видимому, под воздействием местных источников в Северодвинске.

Захоронения радиоактивных материалов в заливах Новой Земли – Абросимова, Степового, Цивольки, рассматривались как локальные источники загрязнения.

В почвах Кольского полуострова в 2010–2018 гг. при 20 опробованиях удельная активность ^{134}Cs оказалась ниже минимально детектируемой (<0.2 Бк/кг). Лишь в одном случае на востоке региона, у пос. Каневка, в 2018 г. удельная активность ^{134}Cs составила 1.2 Бк/кг. Вероятно, этот ра-

дионуклид был занесен местными воздушными потоками от источников в Северодвинске.

Таким образом, при хронологическом анализе данных о встречаемости ^{134}Cs в воде, донных отложениях, биоте, почве, с учетом местоположения, складываются общие представления о его роли в загрязнении Арктики в разные годы. Короткоживущий радионуклид образуется исключительно в процессе цепной реакции в атомных реакторах и при испытании ядерного оружия. Он редко присутствует в глобальном источнике загрязнения при рециркуляции радиоактивных аэрозолей. Его содержание в компонентах арктических морских экосистем незначительно и не оказывает значительного влияния на общий радиоэкологический фон в морских бассейнах. Короткий период полураспада определяет роль ^{134}Cs в мониторинге и исследованиях среды в качестве маркерного элемента недавних поступлений радиоактивных загрязнителей.

В арктических морях сохраняется общая тенденция к снижению техногенного радиационного загрязнения. Однако продолжают существовать источники искусственной радиации, в том числе техногенного радионуклида ^{134}Cs : ледники, воздушный перенос и выбросы местных объектов атомной энергетики. Кроме инфраструктуры атомного флота к местным источникам могут быть причислены ледники высокоширотных архипелагов. Ледники Шпицбергена рассматриваются как зоны ледовой аккумуляции атмосферных выпадений, в том числе аэрозолей, распространявшихся после аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС “Фукусима-1”. К примеру, эпизоды современной регистрации ^{134}Cs в донных осадках внешнего шельфа и фьордов Шпицбергена могли быть обусловлены выносом радионуклидов на участках разгрузки выводных ледников архипелага, как это показано в работе [20]. В соответствии с этим при обнаружении на побережье или в морской среде Баренцево-Карского региона ^{134}Cs необходимы незамедлительные исследования и поиск источников загрязнения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Мурманского морского биологического института Российской академии наук и при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-05-60249 “Радиоактивное загрязнение и вторичные источники антропогенных изотопов в морях Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2001. 417 с.

2. 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.
3. Kautsky N. Distribution and Content of Cs-137 + Cs-134 and Sr-90 in the Water of the North Sea during the Years 1982–1984 // Deutsche Hydrograph. Ztschr. Hamburg. 1986. V. 39. P. 139–159.
4. Hunt G., Kershaw P.L. Remobilization of Artificial Radionuclides from the Sediments of the Irish Sea // J. Radial. Prot. 1990. V. 10. № 2. P. 147–151.
5. Kershaw P.J. A Review of Radioactivity in the Irish Sea: A Report Prepared for the Marine Pollution Monitoring Management Group. 1992. 12 p.
6. Nies H., Harms I.H., Bahe C., Karcher M.J., Dethleff D., Kuhlmann G., Oberhuber J.O., Backhaus E., Kleine E., Loewe P., Matishov D., Stepanov A., Vasiliev O.F. Anthropogenic Radioactivity in the Nordic Seas and the Arctic Ocean – Results of a Joint Project // German J. Hydrography. 1998. V. 50. № 4. P. 313–343.
7. Никитин А.И., Катрич И.Ю., Кабанов А.И., Чумичев В.Б., Смагин В.М. Радиоактивное загрязнение Северного Ледовитого океана по результатам наблюдений в 1985–1987 гг. // Атомная энергия. 1991. Т. 71. Вып. 2. С. 169–172.
8. Kautsky N. Radioactive Substance, Pollution of the North Sea – an Assessment Leds. Berlin: Springer-Verlag. 1988. P. 390–399.
9. Rissanen K., Matishov G., Matishov D. Radioactivity Level in Barents, Petshora, Kara, Laptev and White Seas // Environmental Radioactivity in the Arctic / Ed. P. Strand, A. Cooke. Osteras. 1995. P. 208–214.
10. Foynt L., Nikitin A. The Joint Norwegian-Russian Expedition to the Dumpsites for Radioactive Waste in the open Kara Sea, Tsvolki Fjord and the Stepovogo Fjord. Sept.–Octob. 1993: Report from the Expedition on Board r/v “V. Buinitskiy”, with Some Preliminary Results. 1993. 29 p.
11. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Назимов В.В. Уровни и основные направления переноса радионуклидов в Баренцевом и Карском морях. Карта. Масштаб 1:4704075. Рованиеми, Финляндия. 1994.
12. Vakulovsky S., Nikitin A., Chumichev V., Malyshev S. Radioactive Contamination of the Barents and Kara Seas. International Meeting on Assessment of Actual and Potential Consequences of Dumping of Radioactive Waste into Arctic Seas: Working material. Oslo, 1–5 February 1993–Reproduced by the IAEA Vienna–Austria–1993.
13. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. Загрязнение Белого моря радиоактивными отходами западноевропейских стран // Атомная энергия. 1988. Т. 65. Вып. 1. С. 66–67.
14. Ius E., Sjoblom K.-L., Ikäheimonen T. K. Monitoring of Radionuclides in the Baltic Sea in 1989–1990 // STUK-A. 1993. V. 103. P. 35.
15. Ius E., Ikäheimonen T.K. Finnish Studies on Radioactivity in the Baltic Sea in 1987. Finnish centre for radiation and nuclear safety: Supplement 8 to Annual Report 1987 (STUK-A74). 1989. 17 p.

16. *Sickel M.A., Selnas T.D., Christensen G.C., Strand P.* Radioactivity in the Marine Environment // Rep. from the National surveillance program Strallvern Rapport. 1995. P. 23–24.
17. *Nilsen T., Kudrik I., Nikitin A.* The Russian Northern Fleet; Sources of Radioactive Contamination // Bello-na rapport. 1996.V. 2. P. 94–102.
18. *Rissanen K., Matishov G., Matishov D., Ikäheimonen T., Tarja K.* Radionuclide Concentrations in Sediments, Soil and Plant Samples from the Archipelago of Franz Joseph Land, an Area Affected by the Chernobyl Fall-out // The Science of the Total Environment. 1996. P. 325–327.
19. *Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Щипа Е., Риссанен К.* Радионуклиды в экосистеме региона Баренцева и Карского морей. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 1994. С. 52.
20. *Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Валуйская Д.А., Дерябин А.А.* Результаты морских радио-экологических исследований фьордов Западного Шпицбергена // Доклады академии наук. 2018. Т. 480. № 3. С. 353–358.

MAIN SOURCES OF ^{134}Cs IN THE BARENTS AND KARA SEAS (1960–2020)

Academician of the RAS **G. G. Matishov^{a,b}**, **G. V. Ilyin^a**, and **I. S. Usyagina^{a,#}**

^a *Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation*

^b *Federal Research Center Southern Science Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation*

[#] *E-mail: usyagina@mmbi.info*

This paper assesses the role of the short-lived ^{134}Cs radionuclide in the formation of the radioecological background in the marine environment of the Arctic. The paper analyzes the data collected during long-term observations of MMBI RAS on levels of the ^{134}Cs radioisotope in the marine and coastal environments of the Barents and Kara Seas including high-latitude archipelagos; soils, lichens, algae, fish, seawater, and bottom sediments. The paper also examines the geography of the ^{134}Cs distribution in marine and coastal environments and identifies acting and potential sources of transport of this radioisotope into marine ecosystems of arctic seas. ^{134}Cs is rarely included among radioactive contaminants nowadays and its specific radioactivity is insignificant. Its short half-life makes it a marker of the contamination happened recently, such as emissions from the Fukushima-1 nuclear power plant and local sources in the studied region. The possible local sources in the Barents and Kara Seas are nuclear-powered fleet facilities and glaciers of high-latitude archipelagos. Findings of ^{134}Cs in some samples of modern bottom sediments from fjords of the Svalbard Archipelago and its outer continental shelf suggest ^{134}Cs transport with melt water from Svalbard glaciers. The paper adduces data on the modern background of the ^{134}Cs specific radioactivity in the Barents and Kara Seas. In case an increase of this background levels is detected, an immediate search for the sources of ^{134}Cs entry into the environment must be undertaken.

Keywords: radioactivity, marine environment, bottom sediments, radiation sources