

УДК 546.36 (268.45)
DOI: 10.7868/S25000640190302

ДИНАМИКА ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ЭКОСИСТЕМАХ МОРЕЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА НА РУБЕЖЕ XX–XXI ВЕКОВ. ЧАСТЬ 1. МОРСКАЯ ВОДА И БИОТА

© 2019 г. Академик Г.Г. Матишов^{1,2}, Г.В. Ильин¹,
И.С. Усягина¹, Е.Э. Кириллова²

Аннотация. На основе массива многолетних данных выполнен ретроспективный анализ динамики концентраций техногенных радионуклидов в воде и биоте Баренцева и Карского морей. Приведено содержание ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ^{239, 240}Pu в различных районах в разные временные периоды. Основу спектра техногенных радионуклидов в водах арктических морей составляют изотопы ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Охарактеризованы особенности формирования фона этих радионуклидов в Баренцево-Карском морском регионе. По данным исследований 2017–2018 гг. выявлено, что в свободных от инфраструктуры атомного флота губах Мурманского побережья (Ивановская, Териберская, Зеленецкая, Ярнышная, Порчница) и Кольского залива (губы Тоня, Белокаменная, районы мысов Ретинский, Мишуков, Абрам) концентрации ¹³⁷Cs соответствовали уровню загрязненности вод прибрежного течения Баренцева моря и варьировали от 1,3 до 2,5 Бк/м³. В восточной части Баренцева моря – в районе Центральной впадины, Западно-Новоземельского, Гусиног, Новоземельского желобов, Северо-Восточного плато – содержание ¹³⁷Cs в воде не превышало 1–2 Бк/м³. Концентрация ⁹⁰Sr в водах Баренцева моря составляла 0,4–3,7 Бк/м³. В Карском море наиболее загрязнены ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr поверхностные воды прибрежной зоны южной и юго-западной частей по сравнению с северной частью. Современный уровень загрязнения воды, баренцевоморских рыб, водорослей-макрофитов и донных беспозвоночных низкий. Наблюдается стабильное уменьшение концентраций техногенных изотопов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr по сравнению с периодом максимального загрязнения в 1960–1970-е гг. до минимально возможных в ядерную эпоху.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, Арктика, мониторинг, донные отложения, макрофиты, зообентос, ихтиофауна.

DYNAMICS OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE ECOSYSTEMS OF SEAS OF THE ARCTIC OCEAN AT THE TURN OF THE 21st CENTURY. PART 1. SEAWATER AND BIOTA

Academician RAS G.G. Matishov^{1,2}, G.V. Ilyin¹, I.S. Usyagina¹, E.E. Kirillova²

Abstract. A retrospective analysis of the dynamics of man-made radioactivity in water and biota of the Barents and Kara Seas has been carried out based on the long-term data array. The content of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, and ^{239, 240}Pu in various areas in different time periods is given. It has been indicated that the basis of technogenic radionuclides spectrum in waters of the arctic seas is composed of isotopes of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr. Specific features of background formation of these radionuclides in the Barents-Kara marine region have been characterised. According to research of 2017–2018 it is revealed that in Murmansk coast Bays free from the infrastructure of the Nuclear Navy (Ivanovskaya, Teriberskaya, Zelenetskaya, Yarnyshnaya, Porchnikha) and Kola Bay (Bays Tonya, Belokamennaya, areas of capes Retinsky, Mishukov, Abram) ¹³⁷Cs concentrations corresponded to

¹ Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: usyagina@mmbi.info

the contamination level of the coastal current waters in the Barents sea and ranged from 1.3 to 2.5 Bq/m³. In the Eastern part of the Barents Sea – in the Central area of the basin, West of the Novaya Zemlya, Goose, Novozemelsky trough, the North-Eastern plateau, the content of ¹³⁷Cs in the water did not exceed 1–2 Bq/m³. The concentration of ⁹⁰Sr in the Barents Sea was 0.4–3.7 Bq/m³. In the Kara Sea, surface waters of the coastal zone of the Southern and South-Western parts are most polluted with ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr compared to the Northern part. The current level of contamination of water, the Barents Sea fishes, algae-macrophytes, and bottom invertebrates is considered to be low. A stable decrease of concentrations of technogenic isotopes of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr to the minimum possible in the nuclear epoch is observed when compared to the period of maximum contamination in the 1960–1970s.

Keywords: radioactive contamination, Arctic, monitoring, bottom sediments, macrophytes, zoobenthos, ichthyofauna.

*Памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова посвящается
In memory of Corresponding Member RAS D.G. Matishov*

ИСТОРИЯ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Среди опасных токсических веществ самыми губительными являются искусственные радиоизотопы. Вклад региональных источников радионуклидов и баланс радиоактивности морских экосистем Арктики в XXI веке достаточно изучен и представлен в литературе [1–12]. Однако уровень радиоактивного загрязнения и роль вторичных источников антропогенных изотопов в морях Северного Ледовитого океана в XXI веке вызывают вопросы и требуют отдельных исследований. В специальных обследованиях нуждаются локальные акватории, где потенциально возможно повышение концентрации изотопов ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ¹³¹I, ¹²⁹I, ⁹⁰Sr, ²³⁸Pu, ^{239, 240}Pu, ²⁴¹Am, ⁶⁰Co в результате систематических или эпизодических утечек радиоактивных материалов.

Эти исследования и полученные знания очень важны при развитии нефте- и газодобычи на шельфе, развертывании объектов атомной энергетики на арктическом побережье, а также при возникновении аварийных ситуаций на атомных энергетических установках. Складывающаяся стратегия освоения Арктики – развитие промышленного производства и транспортных маршрутов, – безусловно, предполагает изучение тенденций изменения экосистем под влиянием техногенной радиации и определение комплекса природоохранных мер по сохранению биоразнообразия северных морей. Ясно, что при отсутствии глобальных первичных источников радионуклидов происходящие сейчас процессы перераспределения, переноса, геохимической миграции, их естественного распада будут и далее определять течение радиоэкологической реабилитации морских экосистем.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ

Появление искусственных радионуклидов в среде и биоте Северного Ледовитого океана, на арктическом побережье прослеживается с первых ядерных испытаний в конце 1940-х гг. Для атомной эпохи были типичными сбросы и захоронения жидких и твердых техногенных радиоактивных отходов в северных морях и Арктике. Определенный фон в акватории Баренцево-Карского региона создавали курсирующие (в том числе аварийные) атомные подводные лодки и ледоколы, которые в совокупности были оснащены 180 ядерными реакторами [13].

Суммарная активность радиоактивных отходов, сброшенных в морскую среду Арктики, составила $160 \cdot 10^{15}$ Бк. Наиболее крупный источник загрязнения техногенными радионуклидами – комбинат «Селлафилд» – расположен на побережье Ирландского моря (Великобритания) [14]. Его сбросы попадают в систему североатлантических течений. С атлантическими водами в Баренцево море поступает 10–20 % сбрасываемого в «Селлафилде» ¹³⁷Cs и около 30 % ⁹⁰Sr (рис. 1). Шлейф западноевропейских выбросов пересекает Баренцево море и приблизительно через 6 лет достигает Центрального Полярного бассейна [13].

По оценкам экспертов, в результате эксплуатации ядерных установок за весь период атомной эпохи в Баренцево и Карское моря было сброшено $480 \cdot 10^{12}$ Бк жидких и $600 \cdot 10^{12}$ Бк твердых радиационных отходов. Кроме этого, в Карском море затоплено $85 \cdot 10^{15}$ Бк отработавшего ядерного топлива, что составляет 85 % от всех поступлений радиоактивных отходов в эти моря [15].

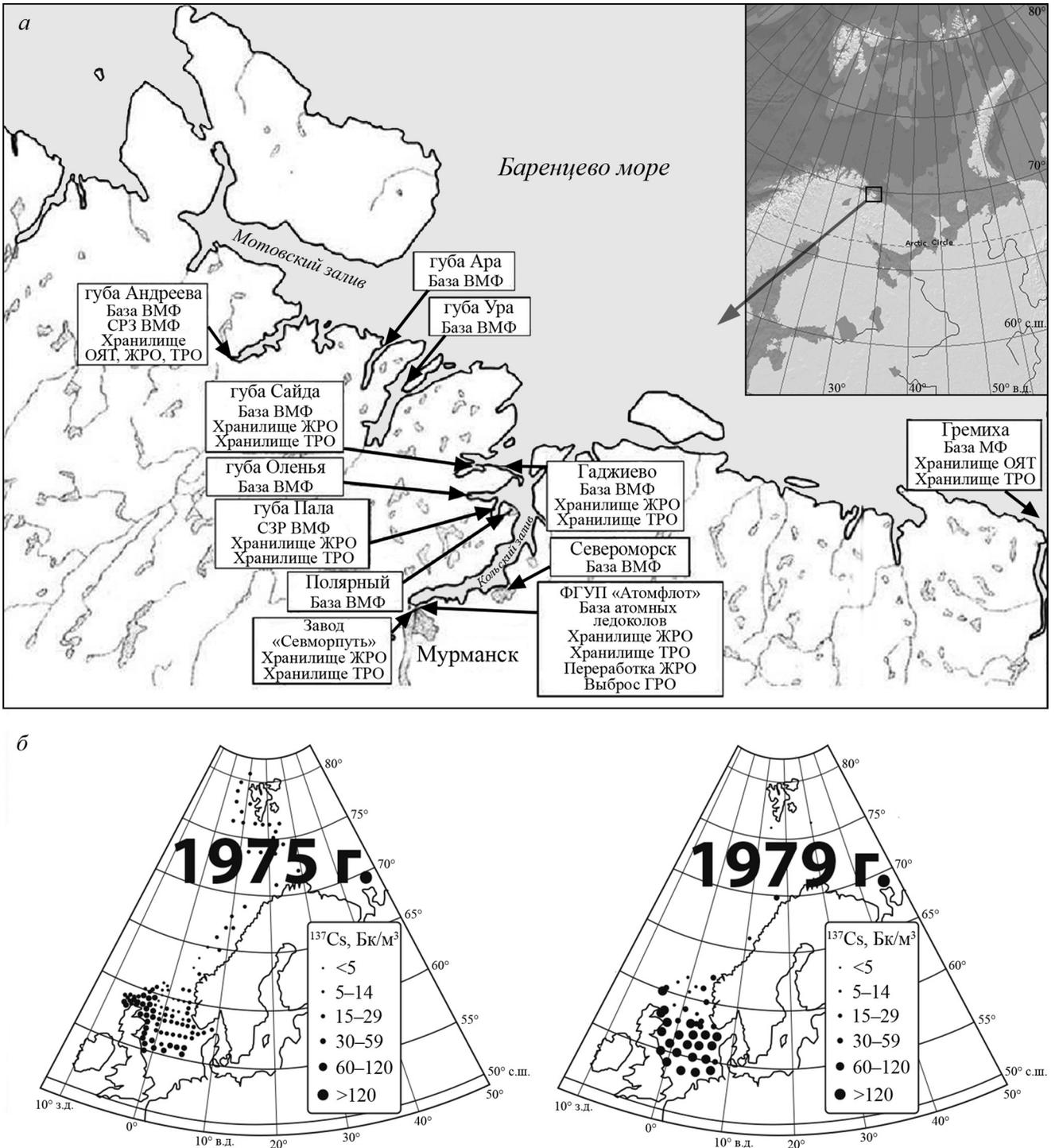


Рис. 1. Региональные и локальные источники радиоактивного загрязнения: *а* – береговая инфраструктура атомного флота; *б* – загрязненные воды североευропейских морей.

Fig. 1. Regional and local sources of radioactive contamination: *a* – coastal infrastructure of the nuclear fleet; *b* – contaminated waters of the North European Seas.

Региональные источники радиоактивного загрязнения на Крайнем Севере связаны с атомными объектами и полигонами в прибрежной зоне и бассейнах сибирских рек. К ним относятся красноярские радиохимические комбинаты «Маяк» и «Томск-7»,

ядерный полигон в губе Черная и радиоактивные могильники в заливах Абросимова, Степового, Цивольки на Новой Земле. В Белом море фон формируют утечки с завода атомных подводных лодок в Северодвинске и его испытательного полигона в

Кандалакшском заливе [2]. Однако основные радиационно опасные объекты сконцентрированы в губах Кольского и Мотовского заливов, Иоканьгского пролива, в частности в таких пунктах, как Мурманск, Полярный, губы Сайда, Гаджиево, Оленья, Пала, Западная Лица, Ура и Ара. В зависимости от специализации объектов в них хранились отработавшее ядерное топливо, газообразные, твердые и жидкие радиоактивные вещества [13; 16].

В арктических морях в 1960-е гг. и в 1986 г. отмечали максимальные объемы атмосферных выпадений искусственных радионуклидов. После испытаний ядерного оружия в районе Новой Земли концентрация ^{137}Cs в лишайниках на побережье Кольского полуострова достигала нескольких тысяч беккерелей на килограмм. Для сравнения: после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. на юге Германии была обнаружена удельная активность ^{137}Cs в ягеле до 70000 Бк/кг.

В 1990-е гг. на Кольском полуострове лишайники накапливали до 700 Бк/кг ^{137}Cs и до 20 Бк/кг короткоживущего ^{134}Cs . Вклад чернобыльских выбросов в загрязнение вод Баренцева и Карского морей в 1990-е гг. составлял 10–20 % [5; 10; 16].

В 1980–2000-е гг. появилось множество публикаций, посвященных исследованию уровней и путей миграций изотопов ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{60}Co в морях Заполярья [2; 7–9; 11]. В конце XX века динамика активности нуклидов в Баренцево-Карском регионе имела тенденцию снижения до минимальных значений, возможных в ядерную эпоху. В целом уровень радиации отражал объем глобальных выпадений ^{137}Cs , ^{90}Sr в окружающие акватории Северной Атлантики, Норвежского моря, в бассейны североευропейских и сибирских рек.

В первом десятилетии XXI века количество публикаций на эту тему заметно сократилось. Спад интереса был обусловлен общим снижением радиационного фона в арктических морях после прекращения крупномасштабных ядерных испытаний. Вместе с тем крупнейший после чернобыльской аварии и новоземельских ядерных испытаний выброс, произошедший в результате взрыва на японской АЭС «Фукусима-1», привел к значительной эмиссии искусственных радионуклидов в атмосферу и в морскую среду. Общее количество ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , сброшенных в океан из второго энергоблока в период 1–6 апреля 2011 г., составило $4,7 \cdot 10^{15}$ Бк (из них $9,4 \cdot 10^{14}$ Бк приходится на ^{137}Cs), и около $20 \cdot 10^{13}$ Бк сброшено 10–11 мая из третьего энергоблока. Имели место и другие эпизоды сброса ра-

дионуклидов общей активностью $4,2 \cdot 10^{10}$ Бк [7]. В марте – ноябре 2011 г. Мурманский морской биологический институт (ММБИ) выполнил комплексную съемку вод мурманского побережья (рис. 2). Изотопы, по которым можно было бы надежно идентифицировать след аварийных выбросов АЭС «Фукусима-1», в исследованных пробах отсутствовали. Лишь в одном образце ламинарии (близ мыса Мишуков в Кольском заливе) были выявлены следовые количества ^{134}Cs , ^{152}Eu , что связано с влиянием местных источников [7].

Следовательно, целесообразность регулярных полнообъемных наблюдений за радиационной обстановкой в Северном Ледовитом океане сохраняется, необходимо продолжать систематические радиоэкологические исследования в регионе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В период 1990–2001 гг. ММБИ развернул и в настоящее время продолжает систематические исследования закономерностей накопления искусственных радионуклидов в морях Северного Ледовитого океана. Работы были сфокусированы на загрязнении экосистем шельфа и заливов арктического побережья, включая высокоширотные архипелаги. Экспедиции в Баренцево, Белое, Карское моря, а также в море Лаптевых осуществляли на научно-исследовательском судне «Дальние Зеленцы», атомных ледоколах «Ямал», «50 лет Победы» и других. В прибрежной зоне Кольского полуострова, Шпицбергена, Новой Земли, Земли Франца-Иосифа работы проводили на маломерных судах. Регулярно выполняется радиоокеанологический мониторинг вдоль «Кольского меридиана», $33^{\circ}30'$ в.д. – от Кольского залива до 78° с.ш. (рис. 2).

Сбор проб воды и грунта, образцов биоты выполняли с помощью стандартного оборудования в соответствии с современными методиками, принятыми МАГАТЭ. Координаты мест сбора проб были определены с помощью навигационной системы GPS. Для анализа были отобраны пробы морской воды, льда, донных отложений, водоросли-макрофиты, бентосные беспозвоночные, рыба в различных геоморфологических районах шельфа, заливов, губ до глубин 120–300 м. Обследованы многочисленные заливы Кольского полуострова, Новой Земли, Енисейская, Обская, Печорская губы и др.

Сбор проб донных отложений и зообентоса осуществляли при помощи дночерпателей Ван-Вина, «Океан-50», коробчатого дночерпателя, драги,

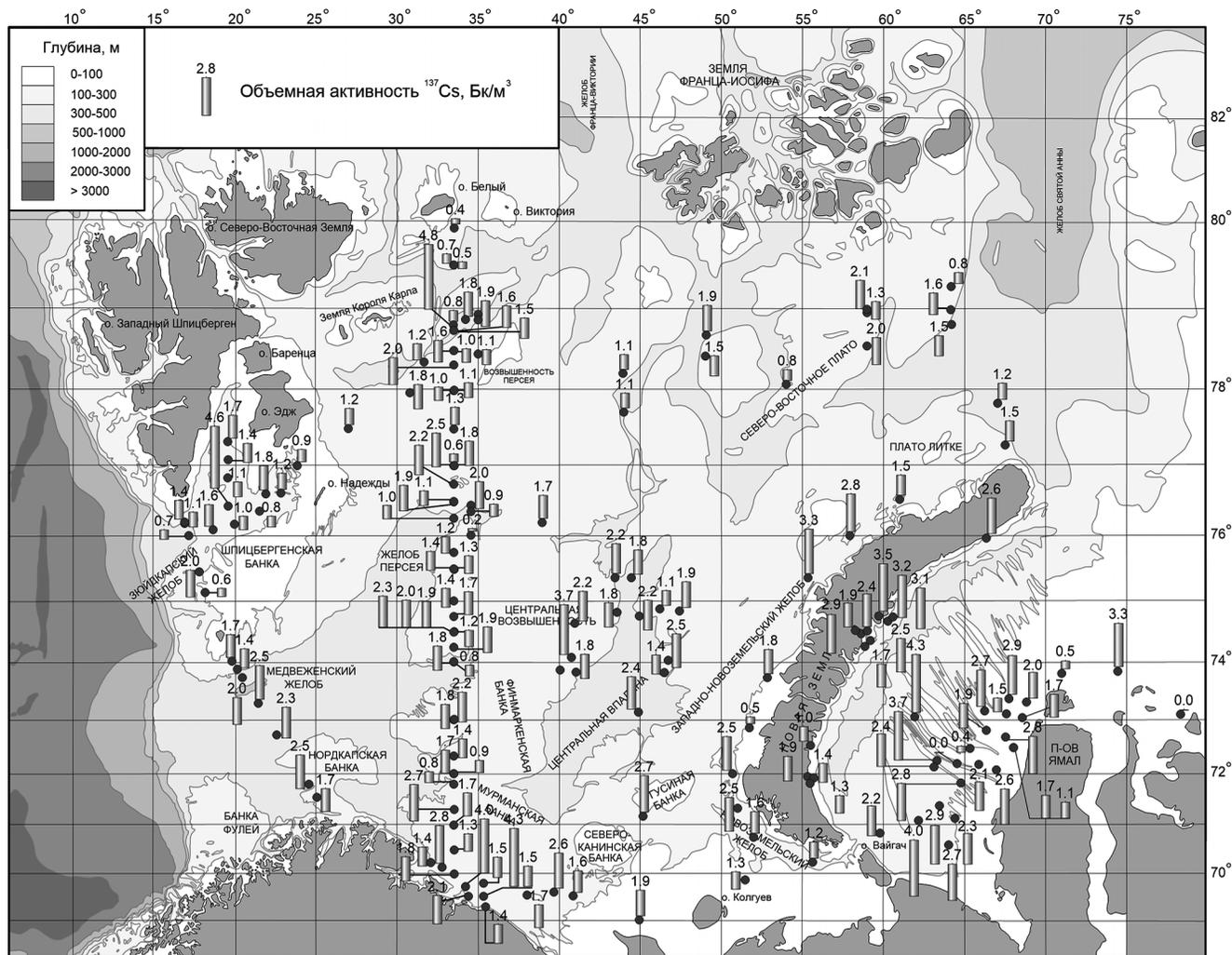


Рис. 2. Концентрация ^{137}Cs (Бк/м³) в поверхностном слое вод Баренцева и Карского морей (2011–2017 гг.).

Fig. 2. Concentration of ^{137}Cs (Bq/m³) in the surface layer of the Barents and Kara Seas (2011–2017).

гравитационной трубки «Gemini» и прямоточной трубки длиной 4 м. Для взятия пробы из осадка пластиковым стаканом диаметром 104 мм вырезали поверхностный слой 0–2 см. Колонку грунта разрезали на слои по 10 мм. В ряде случаев первые 10 см осадка разрезали на слои толщиной 2 см, а далее по 5 см. В ледовых условиях высоких широт Полярного бассейна, в районе Северного полюса пробы морской воды объемом 100 л отбирали в разводьях с борта атомхода «50 лет Победы» (рис. 2).

Отбор проб водорослей (*Laminaria saccharina*, *Alaria* sp., *Fucus vesiculosus*, *Fucus inflatus*, *Ascophyllum nodosum* и др.) производили в Белом и Баренцевом, Печорском и Карском морях (рис. 3). Многие образцы макрофитов собраны в губах, находящихся вблизи мест базирования инфраструктуры атомного флота. Сборы зообентоса сортировали по видам, и для анализа брали наи-

более массовые организмы (рис. 3): представителей Annelida, Bryozoa, Gastropoda, Echinodermata, Decapoda, Amphipoda, Ophiuroidea, Asteroidea и др. [2; 7; 12].

Для измерения концентрации γ -излучающих радионуклидов использовали полупроводниковые γ -спектрометры с германиевыми детекторами высокого разрешения (фирма «Canberra», США). Предварительную обработку проб для определения ^{90}Sr проводили радиохимическим методом. Удельную активность ^{90}Sr рассчитывали по дочернему ^{90}Y , измеренному на β -радиометре LS-6500 фирмы «Beckman Coulter» в соответствии с аттестованными методиками.

Анализ собственной информации ММБИ за 1988–2018 гг. и литературных данных дает возможность охарактеризовать и прояснить закономерности нахождения искусственных радионуклидов в

морской воде, донных отложениях, макрофитах, зообентосе, промысловых рыбах и их взаимосвязь с элементами экосистемы.

ДИНАМИКА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО БАССЕЙНОВ

В 1950–90-е гг. загрязнение в основном определялось объемами стоков с западноевропейских заводов «Селлафилд» и «Ла-Хаг» [1; 2; 16], а также с сибирских радиохимических заводов. Происхождение части радиоактивных изотопов в арктических морях было связано с испытанием атомных устройств в атмосфере, а впоследствии – с выбросами при чернобыльской аварии. По мере сокращения сбросов отходов радиохимическими предприятиями уровень загрязнения моря снижался.

Несмотря на множество атмосферных и подводных ядерных испытаний, проведенных разными странами во второй половине XX века, концентрации искусственных радионуклидов в водной среде Баренцева и Карского морей в 1960 гг. не были высокими [1–6; 12–14; 16]. В 1970–80-е гг. в Баренцевом море значительно повысилось содержание ^{137}Cs в воде. В 1981–1985 гг. воды прибрежной ветви Нордкапского течения содержали от 40 до 90 Бк/м³ радиоцезия. В это же время в поверхностных водах Северного Ледовитого океана концентрация ^{137}Cs составляла 10–30 Бк/м³, а в поверхностных водах Карского моря – от 3 до 27 Бк/м³, в некоторых районах до 40 Бк/м³ [4; 6; 11; 17].

В Баренцевом море причиной высокого загрязнения акватории в этот период были сбросы в Ирландское море радиоактивных отходов комбинатом по переработке ядерного топлива «Селлафилд». Океаническими течениями отходы приносило в Баренцево море через 4–5 лет. Повышенное содержание ^{137}Cs (20–37 Бк/м³) отмечалось в водах Кольского, Мотовского заливов, в восточной части моря. В Карском море преобладало влияние сбросов радиоактивных отходов с западносибирских заводов [4, 11].

К концу 1990-х гг. в морях Северного Ледовитого океана концентрация ^{137}Cs в поверхностных водах снизилась во всей акватории и в зависимости от района варьировала от 2 до 15 Бк/м³. И этот же фон соответствовал загрязненности поверхностных вод Норвежского течения вблизи мыса Нордкап у границ с Кольским полуостровом (4–15 Бк/м³). Источниками радиоактивности были выбросы с «Селлафилда» и загрязненные после аварии на Черно-

быльской АЭС воды Балтийского моря. На границе между Баренцевым и Карским морями вблизи мыса Желания (архипелаг Новая Земля) к 1995 г. в верхнем слое воды уровень ^{137}Cs колебался от 2 до 6–8 Бк/м³. В открытом море поверхностные и придонные слои воды не имели значительных отличий в загрязнении по вертикальному профилю [18]. В этот период выявлен высокий уровень загрязнения искусственными радионуклидами губы Черной (архипелаг Новая Земля), на акватории которой проводились испытания ядерного оружия [2].

Содержание ^{137}Cs в водах губ Кольского залива менялось от 3 до 9 Бк/м³. В распресненных водах Карского моря вблизи устьев рек Обь и Енисей содержание ^{137}Cs было невысоким (3–6 Бк/м³). В отдельных случаях, в частности рядом с местами захоронения радиоактивных отходов, концентрации ^{137}Cs в придонных водах повышалась до 12–31 Бк/м³ за счет эмиссии.

Содержание ^{137}Cs в водных массах арктических морей в период 2005–2007 гг. варьировало в узком диапазоне – от 1–2 до 3,6 Бк/м³. По сравнению с концом 1970-х гг. эта величина была снижена почти на порядок. Повышенные концентрации радионуклида были зафиксированы в прибрежной части Баренцева моря, где проходит прибрежное Мурманское течение.

В 2010–2013 гг. активность ^{137}Cs в водных массах составляла 0,4–2,8 Бк/м³. В южных районах Баренцева моря от полуострова Рыбачий до острова Вайгач в губах и заливах активность ^{137}Cs была выше, чем в центральной части и на севере. Это, вероятно, связано с поступлением радионуклидов в прибрежье с речным стоком [8; 12]. Содержание ^{137}Cs в верхнем горизонте воды Карского моря в этот период было низким – 0,5–2 Бк/м³. В подавляющем количестве проб воды была отмечена крайне низкая активность ^{137}Cs .

В период атмосферных испытаний ядерного оружия во второй половине XX века для вод Баренцева и Карского морей, Центральной Арктики характерным явлением было присутствие ^{90}Sr . Воды в открытых частях западноарктических морей содержали ^{90}Sr в интервале 18–25 Бк/м³ [1–5; 7–9]. В прибрежье Кольского полуострова и Западной Сибири концентрация ^{90}Sr доходила до 50–85 Бк/м³. Уровень загрязнения в прибрежье повышался за счет изотопов, смытых с бассейнов рек. Пространственные изменения концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs сходны, так как определялись общими источниками этих радионуклидов.

В 1990-е гг. объемная активность ^{90}Sr варьировала от 1 до 7 Бк/м³. В начале 2000-х гг. его концентрация продолжала снижаться. По данным за 2007 г., в юго-восточном секторе Баренцева моря, где атлантическая водная масса значительно трансформирована, концентрация ^{90}Sr составляла менее 1 Бк/м³. Он поступал из Норвежского моря по системе течений Гольфстрима. В водах вдоль побережья Новой Земли его содержание варьировало от 1,2 до 3,8 Бк/м³ [1; 4; 5; 9].

В 2010–2013 гг. объемная активность ^{90}Sr в Баренцевом море изменялась в диапазоне 0,4–13 Бк/м³. Наибольшие концентрации были отмечены в водах Мурманской ветви Нордкапского течения и в отдельных губах Кольского и Мотовского заливов. В верхнем слое воды Карского моря его концентрация изменялась от 2,7 до 11 Бк/м³ [8; 9].

Радиоизотопы $^{239, 240}\text{Pu}$ были обнаружены в водах арктических морей сразу после первых ядерных взрывов в атмосфере и на море [2; 3]. Преимущественно они встречались в отдельных заливах и губах, где базировались или ремонтировались атомные подводные лодки и коммерческие суда с атомными силовыми установками (Федеральное государственное унитарное предприятие «Атомфлот»). Концентрация $^{239, 240}\text{Pu}$ в водных массах Баренцева моря на протяжении 1980–90-х гг. постепенно снижалась с 13–18 до 6–11 Бк/м³. В начале 1990-х гг. на юге Баренцева моря (к северо-западу от полуострова Рыбачий и западнее острова Вайгач) загрязнение поверхностных вод изотопом $^{239, 240}\text{Pu}$ было всего 4–8 Бк/м³. Эпизодически его содержание повышалось до 7–11,5 Бк/м³ на глубине 100 м [19]. В 1998 г. воды Кольского залива в районе базы ФГУП «Атомфлот» содержали $^{239, 240}\text{Pu}$ в концентрации 18–70 Бк/м³ [12].

Современное радиоэкологическое состояние вод Баренцева и Карского морей (2014–2018 гг.) характеризуется снижением концентраций антропогенных радионуклидов. За всю историю ядерной эпохи в морях Северного Ледовитого океана не были зафиксированы опасные концентрации искусственных радиоизотопов, а в середине второго десятилетия XXI века морская вода и водоросли-макрофиты содержали искусственные радиоизотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr в малых и следовых количествах. Исключение составляют губа Черная и локальные акватории побережья Кольского полуострова и Новой Земли [2].

В настоящее время основу спектра техногенных радионуклидов в водах арктических морей составляют изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr . Изотопы $^{239, 240}\text{Pu}$ обнару-

живаются только в донных отложениях, оказывая опосредованное влияние на водную среду. Но следует отметить, что вблизи локальных источников радиации концентрация $^{239, 240}\text{Pu}$ может повышаться, особенно в губе Черной.

Ежегодные радиоэкологические съемки поверхностного слоя воды в Баренцевом море на разрезе по меридиану 33°30' в.д. – «Кольский меридиан» протяженностью 1200 км – выявили весьма неравномерное распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr (рис. 2).

Воды Северо-Атлантического течения, устремлявшиеся по Медвежинскому желобу на баренцевоморский шельф, содержали в среднем 2–2,5 Бк/м³ радиоцезия. В смешанных водах фиксировались концентрации до 0,8–1,5 Бк/м³. Лишь эпизодически в зоне Полярного фронта в районе Шпицбергена и в Западно-Новоземельском желобе содержание ^{137}Cs было повышено до 3,3–4,8 Бк/м³. В ледовых разводьях в районе Северного полюса в августе 2017 г. в подледной воде концентрация ^{137}Cs составляла 2 Бк/м³.

В водах прибрежной ветви Мурманского течения содержание ^{137}Cs также неоднородно и варьирует в диапазоне 0,8–2,8 Бк/м³. В свободных от инфраструктуры атомного флота губах Мурманского побережья (Ивановская, Териберская, Зеленцкая, Ярнышная, Порчниха) и Кольского залива (губы Тоня, Белокаменная, районы мысов Ретинский, Мишуково, Абрам), по данным исследований 2018 г., концентрации ^{137}Cs в целом соответствовали уровню загрязненности вод прибрежного течения, варьировались от 1,3 до 2,5 Бк/м³. На момент съемки в 2017 г. в восточной части Баренцева моря – в районе Центральной впадины, Западно-Новоземельского, Гусиног, Новоземельского желобов, Северо-Восточного плато – в поверхностных водах ^{137}Cs присутствовал в низкой концентрации, 1–2 Бк/м³. На локальных участках его содержание увеличивалось до 3,4–3,7 Бк/м³, что определялось, по-видимому, неравномерностью поступления загрязнителя и перемешивания вод на обширной акватории моря.

^{90}Sr в водных массах Баренцева моря и в разводьях арктических льдов к северу от Земли Франца-Иосифа также присутствовал в малых количествах – от 0,4–0,6 до 3,7 Бк/м³. Местами, вблизи губы Черной, в Гусином желобе и в районе мыса Желания, его содержание было повышено до 4–4,5 Бк/м³.

На шельфе Карского моря, в его северной части, в настоящее время поверхностный слой воды менее

загрязнен изотопами ^{137}Cs и ^{90}Sr , чем воды южной части, особенно прибрежной зоны его юго-западной части.

Над склонами Восточно-Новоземельского желоба и береговыми склонами полуострова Ямал концентрация ^{90}Sr увеличивается местами до 3–4,5 Бк/м³.

Таким образом, совокупный анализ данных за 1990–2018 гг. позволил установить многолетнюю динамику и относительный вклад глобальных, региональных и локальных источников в радиоактивное загрязнение арктических морей и Северной Атлантики [2, 7, 8, 9, 12].

РАДИАЦИОННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ МОРСКОЙ БИОТЫ

Макрофиты. Заросли водорослей-макрофитов сорбируют и фильтруют радионуклиды из прибрежных вод. Максимальное накопление радионуклидов в баренцевоморских водорослях происходило в начале 1980-х гг. в результате транзита сбросов «Селлафилда» и после аварийных выбросов Чернобыльской АЭС. Удельная активность ^{137}Cs в водорослях в начале 1980-х гг. была повышена до 10 Бк/кг сухой массы, а в 1987 г. после чернобыльской аварии – до 7 Бк/кг.

В 1990-е гг. в водорослях Баренцева, Белого, Печорского и Карского морей содержание ^{137}Cs зависело от видовой принадлежности и местоположения на побережье. Его концентрация изменялась от 0,4–1 до 3–5 Бк/кг [2; 7]. Исследования *Fucus vesiculosus*, *F. distichus* и *Laminaria saccharina* показали, что для всех образцов характерны в целом низкие концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr . Произрастающие в прибрежье Баренцева моря водоросли накапливали ^{137}Cs и ^{90}Sr в концентрациях 0,4–5 и 0,3–3 Бк/кг сухой массы соответственно. Произрастающие в губах южной части Новой Земли и в районе острова Вайгач макрофиты накапливали ^{137}Cs в количестве 0,5–2,5 Бк/кг. В новоземельском заливе Абросимова (Карское море) содержание ^{137}Cs в *Fucus spiralis* составляло 2–3 Бк/кг, а в *Laminaria digitata* – около 1,5 Бк/кг [4; 18].

Но в условиях прямой близости к радиоактивным стокам концентрация ^{137}Cs возрастала до 0,3–5 Бк/кг. В отдельных местах Кольского и Мотовского заливов, насыщенных объектами инфраструктуры атомного флота, содержание ^{137}Cs в литоральных макрофитах достигало 20–46 Бк/кг сырой массы, ^{134}Cs – 1,2 Бк/кг, ^{60}Co – 1,6 Бк/кг и ^{152}Eu – 4,6 Бк/кг. К примеру, в губе Оленья, вблизи

судоремонтного завода, ламинариевые водоросли в талломах накапливали ^{137}Cs около 0,3–0,4 Бк/кг, в стеблях – около 2 Бк/кг. Для сравнения отметим, что в 100 км восточнее вдоль побережья, в губе Порчнixa, *Fucus distichus* почти не содержал радиоцезия (0,06 Бк/кг) [2; 12].

В акватории базы ФГУП «Атомфлот» ламинарии аккумулировали этот радионуклид в количестве 5–13 Бк/кг, а фукусы – 0,2–1,1 Бк/кг. В одном из образцов ламинарии из этого района (мыс Мишуков, Кольский залив) обнаружены следовые количества короткоживущего ^{134}Cs и ^{152}Eu , что связано с влиянием местных утечек из акватории ФГУП «Атомфлот» [2; 12]. Радиоизотопы $^{239,240}\text{Pu}$ макроводоросли содержали в 1980–90-е гг. в небольшом количестве – 0,02–0,3 Бк/кг.

В 2010–2013 гг. сохранялись сходные уровни загрязнения с небольшими вариациями, соответствующими естественной флуктуации значений в природной среде. В частности, в водорослях *Laminaria saccharina*, *Fucus vesiculosus*, собранных вдоль Мурманского побережья Кольского полуострова, содержание радиоцезия составляло 0,45–2,3 Бк/кг сухой массы. В водорослях, собранных в других районах, в том числе в беломорском прибрежье Кольского полуострова, содержание ^{137}Cs варьировало от 0,2 до 1,5 Бк/кг, а ^{90}Sr – от 0,4 до 4,1 Бк/кг.

Современный уровень радиоактивного загрязнения водорослей Баренцева и Белого морей, по данным за 2014–2018 гг., характеризуется низкой концентрацией радиоизотопов. Так, в губах Чупа (Кандалакшский залив), Зеленецкая, Териберская, Ура, Печенга, в Кольском заливе макрофиты содержат 0,2–0,8 Бк/кг ^{137}Cs и 0,1–1 Бк/кг ^{90}Sr . Исключение составляет загрязненная губа Андреева в системе губы Западная Лица (Мотовский залив). На побережье губы располагается хранилище радиоактивных отходов, включая отработавшее ядерное топливо. Отмечено загрязнение прибрежных вод, а произрастающие на литорали водоросли становятся индикатором эмиссии радионуклидов с территории хранилища. К примеру, ламинария в разных зонах губы Андреева содержит от 1–2 до 12 Бк/кг сухой массы ^{137}Cs и от 1–5 до 35 Бк/кг ^{90}Sr .

Морские беспозвоночные. Бентосные животные – важный индикатор качества водной среды. В 1960-е гг., в период максимальных выпадений радиоактивного вещества после испытаний ядерного оружия в атмосфере и под водой, исследования содержания искусственных изотопов в донных организмах не проводились. Уже в 1990-е гг., ког-

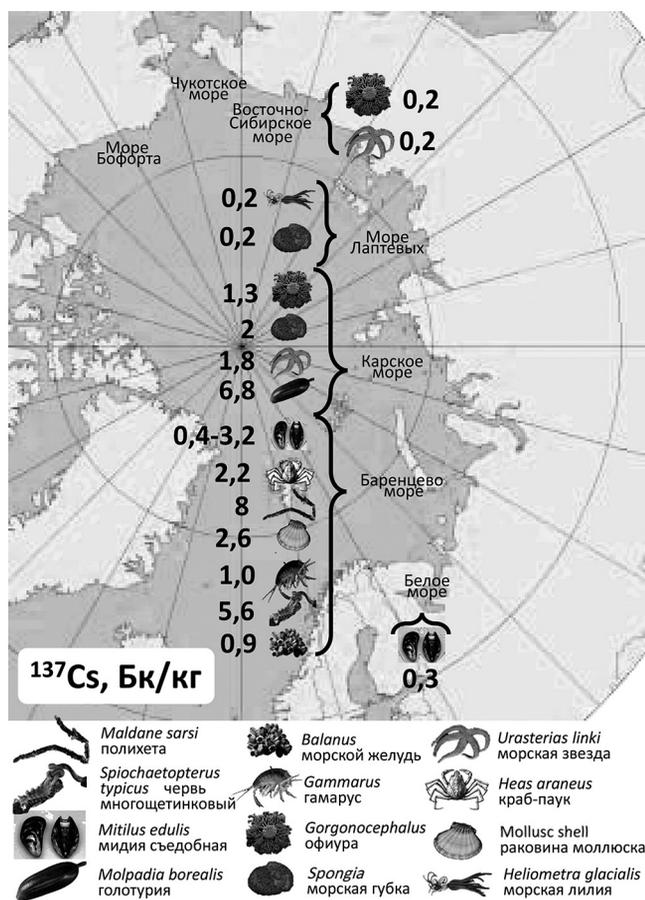


Рис. 3. Концентрация ^{137}Cs (Бк/кг сырой массы) в донных гидробионтах арктического шельфа (2000–2018 гг.).

Fig. 3. Concentration of ^{137}Cs (Bq/kg of wet weight) in bottom hydrobionts of the Arctic shelf (2000–2018).

да приступили к систематическому комплексному изучению радиоэкологического состояния арктических морских экосистем, беспозвоночные организмы в Баренцевом море содержали радиоизотопы ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в концентрации от 1 до 9,5 Бк/кг (рис. 3). В частности, северная креветка накапливала в тканях от 1,6 до 7,9 Бк/кг сырой массы ^{137}Cs , а морской еж – 1,8 Бк/кг.

В конце 1990-х – начале 2000-х гг. в бентосных гидробионтах сохранялась низкая концентрация ^{137}Cs . Так, в большей части из 160 проб зообентоса из разных арктических морей удельная активность ^{137}Cs была ниже предела обнаружения изотопа гамма-спектрометром ($<0,1$ Бк/кг). В то же время, по данным норвежских исследователей, из 32 проб баренцевоморской креветки только в одном образце был обнаружен ^{137}Cs в концентрации 0,2 Бк/кг сырого веса [20]. По данным ММБИ, в морских звездах из губы Оленьей отмечался ^{137}Cs на уровне 0,3 Бк/кг. Низкой, на уровне

не 0,2–0,5 Бк/кг сырой массы, была концентрация ^{137}Cs в мягких тканях двустворчатых моллюсков *Mytilus edulis* и гастроподы *Littorina*, собранных на литорали различных губ Кольского побережья [2; 12]. Измерения удельной активности ^{90}Sr в раковинах мидий выявили незначительные различия удельной активности этого радионуклида в разных районах. Максимальное содержание ^{90}Sr (2,5 Бк/кг) было обнаружено в раковинах особей, обитавших в губе Ура (Мотовский залив), минимальное – в организмах из средней части Кольского залива (0,64 Бк/кг).

В Карском, Восточно-Сибирском морях и в море Лаптевых донные беспозвоночные практически повсеместно содержали ^{137}Cs в концентрации 0,1–0,7 Бк/кг (рис. 3). К примеру, в Восточно-Новоземельской впадине и на мелководье ямальского шельфа донные гидробионты – амфиподы, полихеты, морские звезды, офиуры – содержали в тканях ^{137}Cs и ^{90}Sr в концентрациях от 0,2 до 2,5 Бк/кг, которые можно отнести к фоновому уровню радиоактивности зообентоса. В этом интервале вариаций удельной активности большими величинами (0,5–2 Бк/кг) характеризуются губки *Spongia* sp. – фильтраторы морской воды – и голотурии *Molpadia borealis* – типичные грунтофаги. Единично в тканях голотурии была обнаружена концентрация ^{137}Cs 6,8 Бк/кг (рис. 3).

Современный уровень радиоактивного загрязнения зообентоса наиболее распространенными ^{137}Cs и ^{90}Sr очень низкий. Моллюски (мидии *Mytilus edulis*, литорины *Littorina*) и бокоплавы (*Gammarus* sp.), обитающие в губах Териберская, Йоканьга, в Кольском заливе (мыс Абрам, губы Белокаменная, Сайда, Пала), содержат в мягких тканях не более 0,1–0,2 Бк/кг ^{137}Cs . На прибрежном шельфе открытых участков моря вблизи устья Кольского залива мидии накапливают не более 0,1–0,4 Бк/кг ^{137}Cs . Но вблизи источников загрязнения, например в губе Андреева, современная концентрация ^{137}Cs в мидиях остается повышенной. По данным за 2014 г., в тканях *Mytilus edulis* из этой губы удельная активность ^{137}Cs составила 9,3 Бк/кг, а ^{90}Sr – 0,1 Бк/кг.

Морские рыбы. В 1960–90 гг. наиболее детально исследовалось загрязнение массовых и важных промысловых рыб – трески, сайды, пикши. На рисунке 4 показана общая динамика содержания ^{137}Cs в мышечной ткани рыб. После новоземельских ядерных испытаний в атмосфере концентрация ^{137}Cs в треске и сайде, выловленных в Баренцевом

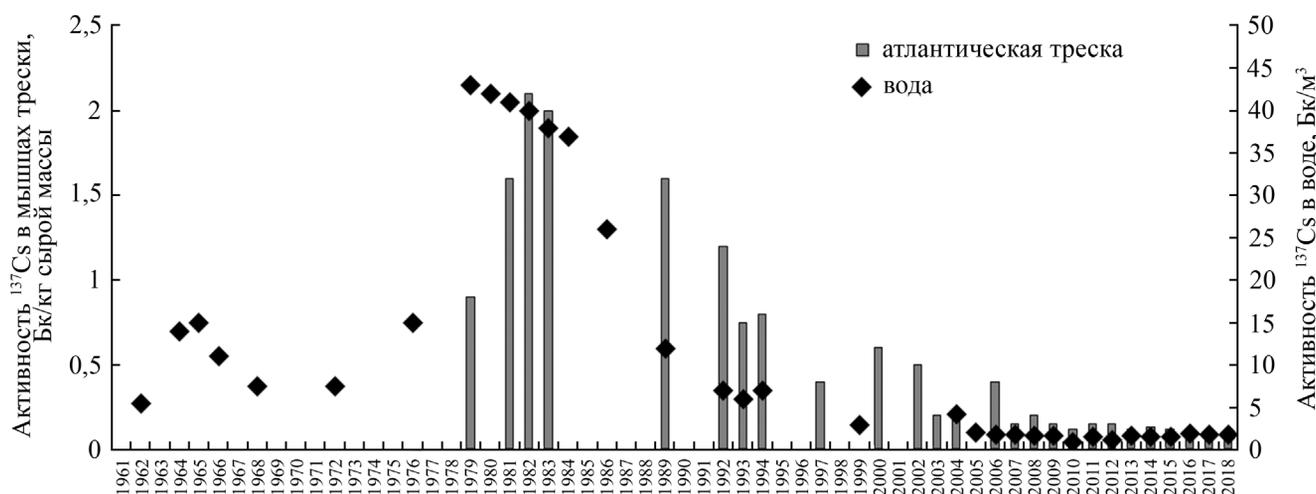


Рис. 4. Многолетняя динамика концентраций ^{137}Cs в мышцах атлантической трески (Бк/кг сырой массы) и в воде Баренцева моря (Бк/м³).

Fig. 4. Long-term dynamics of ^{137}Cs concentrations in Atlantic cod muscles (Bq/kg of wet weight) and in the Barents Sea water (Bq/m³).

море, снижалась: 1963 г. – 90 Бк/кг сырой массы, 1968 г. – 10 Бк/кг, 1992–1994 гг. – 0,2–1 Бк/кг [21]. В 1980–90-е гг. незначительные колебания уровня ^{137}Cs (от 0,2 до 3,5 Бк/кг) в треске Норвежского и Баренцева морей были сопряжены с меняющимся объемом стоков «Селлафилда». В 1993 г. в Баренцевом море в районе Центральной впадины треска содержала ^{137}Cs в мышцах около 0,5–0,9 Бк/кг, а в костях – 0,4–0,5 Бк/кг. Для сравнения можно отметить, что в то же время в Балтийском море в проливе Скагеррак в треске был обнаружен радиоизотоп ^{134}Cs (0,3 Бк/кг), свидетельствующий о недавно поступивших в море радиоактивных сбросах [20].

В конце XX века рыбы-ихтиофаги, такие как треска, сайда, палтус, скат, не имели высоких концентраций ^{137}Cs . Уровни этого изотопа колебались в основном от 0,2 до 3,2 Бк/кг.

В 2000–2009 гг. все изученные виды рыб Баренцева моря содержали не более 0,1–0,3 Бк/кг ^{137}Cs . В 2010–2013 гг. удельная активность ^{137}Cs в рыбе, выловленной в прибрежных водах Баренцева моря, также была низкой – 0,08–0,10 Бк/кг. Это на два порядка ниже допустимого уровня ^{137}Cs , установленного СанПиН (2.3.2.1078-01) [22] для рыбы, нерыбных объектов промысла и продуктов, вырабатываемых из них.

Исследования 2018 г. показали, что основные промысловые виды рыб, выловленные в прибрежных водах Кольского полуострова, содержат следовое количество ^{137}Cs (менее 0,1 Бк/кг сырой массы) в мышечной ткани.

В Кольском заливе, в его северной части (г. Полярный), в треске и сайде отмечаются также низкие концентрации радионуклидов. Максимальная удельная активность ^{137}Cs , зафиксированная при исследованиях, не превышала 0,3 Бк/кг, а ^{90}Sr – 0,1 Бк/кг. Такие же уровни были в рыбах, пойманных на юго-востоке Баренцева моря, в Печорском море.

Таким образом, анализ водорослей-макрофитов, бентосных организмов и промысловых рыб, обитающих в современной обстановке (2014–2018 гг.) в Баренцевом, Белом, Восточно-Сибирском морях и в море Лаптевых, позволяет заключить, что радиационное загрязнение биоты морей Арктики крайне низкое и в настоящее время не представляет опасности для человека. Основная роль в формировании современного радиационного фона в морях Северного Ледовитого океана принадлежит локальным источникам радиации и трансграничной циркуляции техногенных радиоизотопов. Необходим ежегодный контрольный мониторинг совместными усилиями приарктических стран.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60249 «Радиоактивное загрязнение и вторичные источники антропогенных изотопов в морях Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков». Частично – в рамках НИР ГЗ ЮНЦ РАН № госрегистрации АААА-А18-118122790121-5, а также темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН № госрегистрации 01201363186.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kautsky H. 1988. Radioactive Substances. In: *Pollution of the North Sea. An assessment*. Berlin, Springer-Verlag: 390–399.
2. Matishov D.G., Matishov G.G. 2004. *Radioecology in Northern European Seas*. Berlin, Heidelberg, Springer: 335 p. doi: 10.1007/978-3-662-09658-1
3. Smith J.N., Ellis K.M., Naes K., Dahle S., Matishov D. 1995. Sedimentation and mixing rates of radionuclides in Barents Sea sediments off Novaya Zemlya. *Deep-Sea Research II*. 42(6): 1471–1493. doi: 10.1016/0967-0645(95)00050-X
4. Strand P., Nikitin A., Rudjord A.L., Salbu B., Christensen G., Føyn L., Kryshev I.I., Chumichev V.B., Dahlgaard H., Holm E. 1994. Survey of artificial radionuclides in the Barents Sea and the Kara Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 99–112. doi: 10.1016/0265-931X(94)90010-8
5. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. 1985. О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западноевропейских радиохимических заводов. *Атомная энергия*. 58(6): 445–449.
6. Кузнецов Ю.В., Ревенко Ю.А., Легин В.К., Раков Н.А., Жидков В.В., Савицкий Ю.В., Тишков В.П., Поспелов Ю.Н., Егоров Ю.М. 1994. К оценке вклада реки Енисей в общую радиоактивную загрязненность Карского моря. *Радиохимия*. 36(6): 546–559.
7. Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Касаткина Н.Е., Усягина И.С., Павельская Е.В. 2012. К оценке воздействия аварийных выбросов АЭС «Фукусима-1» на моря Западной Арктики (на примере Баренцева моря). *Доклады Академии наук*. 446(4): 448–452.
8. Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Моисеев Д.В., Дале С., Касаткина Н.Е., Валуйская Д.А. 2017. О влиянии хранилища радиоактивных отходов в губе Андреева на загрязнение экосистемы Баренцева моря. *Доклады Академии наук*. 472(5): 590–595. doi: 10.7868/S086956521705019X
9. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Усягина И.С., Касаткина Н.Е. 2014. Многолетняя динамика радиоактивного загрязнения Баренцево-Карского региона (1960–2013 гг.). *Доклады Академии наук*. 458(4): 473–479. doi: 10.7868/80869565214280238
10. Никитин А.И., Катрич И.Ю., Кабанов А.И., Чумичев В.Б., Смагин В.М. 1991. Радиоактивное загрязнение Северного Ледовитого океана по результатам наблюдений в 1985–1987 гг. *Атомная энергия*. 71(2): 169–172.
11. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Дубинина Е.О., Асадулин Э.Э., Шука С.А., Усачева А.А. 2018. Изменение радиационного состояния донных отложений Енисейского залива. *Доклады Академии наук*. 483(6): 673–676. doi: 10.31857/S086956520003455-3
12. Matishov G.G., Matishov D.G., Namjatov A.A., Garrov J., Dahle S. 1999. Anthropogenic radionuclides in Kola and Motovsky Bays of the Barents Sea, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 43(1): 77–88. doi: 10.1016/S0265-931X(98)00096-4
13. Nilsen T., Kudrik I., Nikitin A. 1996. The Russian Northern Fleet: Sources of Radioactive Contamination. Oslo, Bellona Foundation: 169 p.
14. Kershaw P.J., Baxter A. 1995. The transfer of reprocessing waste from northwest Europe to the Arctic. *Deep-Sea Research II*. 42(6): 1413–1448. doi: 10.1016/0967-0645(95)00048-8
15. Яблоков А.В., Карасев В.К., Румянцев В.М., Кокеев М.Е., Петров О.И., Лысцов В.Н., Емельяненко А.Ф., Рубцов П.М. 1993. *Факты и проблемы, связанные с захоронением радиоактивных отходов в морях, омывающих территорию Российской Федерации. Материалы доклада Правительственной комиссии по вопросам, связанным с захоронением в море радиоактивных отходов*. М., Администрация Президента РФ: 108 с.
16. Nies H., Harms I.H., Karcher M.J., Dethleff D., Bahe C., Kuhlmann G., Oberhuber J.M., Backhaus J.O., Kleine E., Loewe P., Matishov D., Stepanov A., Vasiliev O.F. 1998. Anthropogenic Radioactivity in the Nordic Seas and the Arctic Ocean – Results of a Joint Project. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*. 50(4): 313–343. doi: 10.1007/BF02764228
17. Aarkrog A., Dahlgaard H., Hansen H., Holm E., Hallstadius L., Rioseco J., Christensen G. 1985. Radioactive Tracer Studies in the Surface Waters of the Northern Atlantic Including the Greenland Norwegian and Barents Sea. *Rit. Fiskideldar*. 9: 37–42.
18. Strand P. 1998. Chapter 8. Radioactivity. In: *AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues*. Oslo, Arctic Monitoring and Assessment Programme: 526–615.
19. Føyn L., Nikitin A. 1993. *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*. 29 p.
20. Sickel M.A., Selnes T.D., Christensen G.C., Strand P. 1995. Radioactivity in the Marine Environment. In: *Rep. from the National surveillance program Strallvern Rapport*. Østerås, Norwegian Radiation Protection Authority: 23–24.
21. Føyn L., Sværen I. 1995. The Barents Sea, its fisheries and the past and present status of radioactive contamination and its impact on fisheries. In: *Environmental Radioactivity in the Arctic. Proceedings of the Second International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic (Oslo, Norway, 21–25 August 1995)*. Østerås, Scientific Committee of the Environmental Radioactivity in the Arctic: 215–220.
22. СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». URL: https://mibio.ru/docs/110/sanpin_2.3.2.1078-01_gigienicheskie_trebovaniya_bezopasnosti.pdf.

REFERENCES

1. Kautsky H. 1988. Radioactive Substances. In: *Pollution of the North Sea. An assessment*. Berlin, Springer-Verlag: 390–399.
2. Matishov D.G., Matishov G.G. 2004. *Radioecology in Northern European Seas*. Berlin, Heidelberg, Springer: 335 p. doi: 10.1007/978-3-662-09658-1
3. Smith J.N., Ellis K.M., Naes K., Dahle S., Matishov D. 1995. Sedimentation and mixing rates of radionuclides in Barents Sea sediments off Novaya Zemlya. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 42(6): 1471–1493. doi: 10.1016/0967-0645(95)00050-X
4. Strand P., Nikitin A., Rudjord A.L., Salbu B., Christensen G., Føyn L., Kryshev I.I., Chumichev V.B., Dahlgaard H., Holm E. 1994. Survey of artificial radionuclides in the Barents Sea and the Kara Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 99–112. doi: 10.1016/0265-931X(94)90010-8

5. Vakulovsky S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B. 1985. [On contamination of Arctic waters by radioactive effluents from Western Europe nuclear fuel reprocessing plants]. *Atomnaya energiya*. 58(6): 445–449. (In Russian).
6. Kuznetsov Yu.V., Revenko Yu.A., Legin V.K., Rakov N.A., Zhidkov V.V., Savitsky Yu.V., Tishkov V.P., Pospelov Yu.N., Egorov Yu.M. 1994. [To assess the contribution of the Yenisei River to the total radioactive contamination of the Kara Sea]. *Radiokhimiya*. 36(6): 546–559. (In Russian).
7. Matishov G.G., Il'in G.V., Kasatkina N.E., Usyagina I.S., Pavel'skaya E.V. 2012. Assessment of impact from the Fukushima nuclear plant accidental emission on western Arctic seas (Barents Sea case study). *Doklady Earth Sciences*. 446(2): 1185–1189. doi: 10.1134/S1028334X12100042
8. Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S., Moiseev D.V., Dahle S., Kasatkina N.E., Valuyskaya D.A. 2017. The effect of radioactive waste storage in Andreev bay on contamination of the Barents Sea ecosystem]. *Doklady Earth Sciences*. 472(2): 220–225. doi: 10.1134/S1028334X17020155
9. Matishov G.G., Matishov D.G., Usyagina I.S., Kasatkina N.E. 2014. Multiannual variations in radioactive pollution of the Barent-Kara region (1960–2013). *Doklady Earth Sciences*. 458(2): 1249–1255. doi: 10.1134/S1028334X14100092
10. Nikitin A.I., Katrich I.Yu., Kabanov A.I., Chumichev V.B., Smagin V.M. 1991. [Radioactive contamination of the Arctic Ocean according to the observations in 1985–1987]. *Atomnaya energiya*. 71(2): 169–172. (In Russian).
11. Miroshnikov A. Yu., Flint M.V., Dubinina E.O., Asadulin En.E., Shchuka S.A., Usacheva A.A. 2018. Changes in the Radiation State of Bottom Sediments in Yenisei Gulf. *Doklady Earth Sciences*. 483(2): 1582–1586. doi: 10.1134/S1028334X1812019X
12. Matishov G.G., Matishov D.G., Namjatov A.A., Garrov J., Dahle S. 1999. Anthropogenic radionuclides in Kola and Motovsky Bays of the Barents Sea, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 43(1): 77–88. doi: 10.1016/S0265-931X(98)00096-4
13. Nilsen T., Kudrik I., Nikitin A. 1996. The Russian Northern Fleet: Sources of Radioactive Contamination. Oslo, Bellona Foundation: 169 p.
14. Kershaw P.J., Baxter A. 1995. The transfer of reprocessing waste from northwest Europe to the Arctic. *Deep-Sea Research II*. 42(6): 1413–1448. doi: 10.1016/0967-0645(95)00048-8
15. Yablokov A.V., Karasev V.K., Rummyantsev V.M., Kokeyev M.E., Petrov O.I., Lystsov V.N., Emel'yanenkov A.F., Rubtsov P.M. 1993. *Fakty i problemy, svyazannyye s zakhoroneniym radioaktivnykh otkhodov moryakh, omyvayushchikh territoriyu Rossiyskoy Federatsii. Materialy doklada Pravitel'stvennoy komissii po voprosam, svyazannym s zakhoroneniym v more radioaktivnykh otkhodov*. [Facts and problems related to the disposal of radioactive waste in the seas surrounding the territory of the Russian Federation. Report materials of the Government Commission on issues related to the disposal of radioactive waste at sea]. Moscow, Presidential Administration of Russia: 108 p. (In Russian).
16. Nies H., Harms I.H., Karcher M.J., Dethleff D., Bahe C., Kuhlmann G., Oberhuber J.M., Backhaus J.O., Kleine E., Loewe P., Matishov D., Stepanov A., Vasiliev O.F. 1998. Anthropogenic Radioactivity in the Nordic Seas and the Arctic Ocean – Results of a Joint Project. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*. 50(4): 313–343. doi: 10.1007/BF02764228
17. Aarkrog A., Dahlgaard H., Hansen H., Holm E., Hallstadius L., Rioseco J., Christensen G. 1985. Radioactive Tracer Studies in the Surface Waters of the Northern Atlantic Including the Greenland Norwegian and Barents Sea. *Rit. Fiskideldar*. 9: 37–42.
18. Strand P. 1998. Chapter 8. Radioactivity. In: *AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues*. Oslo, Arctic Monitoring and Assessment Programme: 526–615.
19. Foyn L., Nikitin A. 1993. *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*. 29 p.
20. Sickel M.A., Selnas T.D., Christensen G.C., Strand P. 1995. Radioactivity in the Marine Environment. In: *Rep. from the National surveillance program Strallvern Rapport*. Østerås, Norwegian Radiation Protection Authority: 23–24.
21. Foyn L., Sværen I. 1995. The Barents Sea, its fisheries and the past and present status of radioactive contamination and its impact on fisheries. In: *Environmental Radioactivity in the Arctic. Proceedings of the Second International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic (Oslo, Norway, 21–25 August 1995)*. Østerås, Scientific Committee of the Environmental Radioactivity in the Arctic: 215–220.
22. SanPiN 2.3.2.1078-01 "Gigiyenicheskiye trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov". [SanPiN 2.3.2.1078-01 "Hygienic requirements for safety and nutritional value of food"]. Available at: https://mibio.ru/docs/110/sanpin_2.3.2.1078-01_gigiyenicheskiye_trebvaniya_bezopasnosti.pdf. (In Russian).

Поступила 21.06.2019