

10.2. Содержание радионуклидов цезия в воде и донных отложениях Баренцева моря

А.А. Параскив, Н.Ю. Мирзоева, О.Н. Мирошниченко

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», Севастополь

По результатам экспедиционных исследований в 68 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» проведена оценка содержания антропогенных радионуклидов ^{137}Cs в поверхностных водах и донных отложениях Баренцева моря. В результате проведения сравнительной оценки современных уровней радиоцезия в других морях сделан вывод о благополучной радиоэкологической обстановке в акватории Баренцева моря, несмотря на наличие большого количества потенциальных источников радиационного загрязнения. Работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем», № АААА-А18-118020890090-2.

Ключевые слова: радионуклиды цезия, радиоэкологический мониторинг, загрязнение.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(36)

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное поступление искусственных радионуклидов в окружающую среду началось с первых ядерных испытаний и боевого применения ядерного оружия при бомбардировке Хиросимы и Нагасаки в 1945 году, продолжилось в результате ядерных взрывов, проводившихся в мирных целях (США и СССР провели более 400 испытаний ядерных бомб). Отмечено, что ^{90}Sr и ^{137}Cs – два наиболее важных долгоживущих продукта деления в радиоактивных выпадениях после ядерных испытаний [Эйзенбад, 1967]. В современный период в процессе работы и в результате аварийных происшествий на предприятиях ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) искусственные радионуклиды продолжают поступать в природные среды [Сапожников и др., 2015]. Они в различном количестве встречаются во всей толще морских и океанических вод и, циркулируя в струях основных течений, распространяются на многие тысячи километров от источников [Матишов, Матишов, 2001; Радиоэкологический отклик..., 2008; Саркисов и др., 2015].

В последние десятилетия уделяется особое внимание экологическим проблемам Арктики. Это обусловлено, прежде всего, важной ролью полярного и приполярного регионов в сохранении экологического равновесия на планете, а также наличия в арктическом районе богатых месторождений минерального и углеводородного сырья. Ранее проведенные исследования показали, что, наряду с тяжелыми металлами и нефтяными углеводородами, радионуклиды считаются приоритетными загрязняющими веществами, влияющими на морские экосистемы Арктики [Евсеев, Красовская, 1996; Евсеев, Телелекова, 2013]. За время существования атомной энергетики произошло более 150 аварий различных типов, которые внесли свой вклад в радиоактивное загряз-

нение этого региона. Среди них наиболее крупной как по площади загрязнения земной поверхности, так и по уровню радиоактивных выбросов, стала авария на атомной электростанции в Чернобыле (СССР, 1986 г.) [Радиоэкологический отклик..., 2008]. В Баренцево-Карской акватории базировались атомные подводные лодки, курсировали ледоколы, которые, по совокупности, были оснащены 180 ядерными реакторами, а также периодически происходили сбросы и захоронения жидких и твердых радиоактивных отходов [Nilsen et al., 1996]. Как результат, антропогенные радиоизотопы вовлекались в океанологические и биогеохимические процессы и проникали во все компоненты морских экосистем.

Необходимость и актуальность радиоэкологического мониторинга в регионе Баренцева моря также обуславливают затонувшие в результате аварий атомные подводные лодки. Опасение вызывают возможные утечки радионуклидов из их атомных реакторов [Саркисов и др., 2015]. Наряду с этим, для решения природоохранных вопросов, особенно на локальных акваториях, важны сведения о современном содержании основных дозообразующих радиоактивных техногенных нуклидов, к которым в настоящее время относят ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238,239,240}\text{Pu}$ [Матишов, Матишов 2001; Радиоэкологический отклик, 2008; Саркисов и др., 2015]. Такие знания не менее важны также для системы экологической безопасности в случае применения при аварийных ситуациях на объектах с атомными реакторами, при нефтегазодобыче на шельфе [Матишов, Матишов, 2001].

Все это предполагает изучение тенденций в развитии морских экосистем под влиянием слабой радиации, а также определение стратегии природоохранных мер по сохранению биоразнообразия морей Арктики.

Цель проводимых исследований состояла в обобщении результатов многолетнего изучения перераспределения ^{137}Cs в воде и донных отложениях Баренцева моря по литературным данным [АМАР, 1997; Crene, Galasso, 1999; Матишов, Матишов, 2001; Саркисов и др., 2015] в сравнении с полученными на основе отбора проб (2017 г.) в 68 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» собственными данными.

ИСТОЧНИКИ И ПУТИ ПЕРЕНОСА РАДИОНУКЛИДА ^{137}Cs В БАРЕНЦЕВО МОРЕ

Многолетние мониторинговые радиоэкологические исследования в морях Арктики позволили выделить следующие источники радиоактивного загрязнения Баренцева моря, в том числе радионуклидом ^{137}Cs [Саркисов и др., 2015]:

- глобальные выпадения после испытания атомного оружия в открытых средах;
- атмосферные выпадения в результате аварии на Чернобыльской АЭС;
- вынос радионуклидов реками с водосборных бассейнов;
- перенос радиоактивных отходов, сбрасываемых в моря западноевропейскими радиохимическими заводами;
- сбросы радиоактивных отходов атомного флота, проведенные СССР/Россией;
- последствия аварий при эксплуатации кораблей СССР/России с ядерными энергетическими установками.

Максимальные величины глобальных атмосферных выпадений приходились на 1962–1963 гг. [Матишов, Матишов, 2001; Радиоэкологический отклик..., 2008]. В районе архипелага Новая Земля в 1950–1960 гг. проводились многочисленные ядерные испытания в атмосфере и гидросфере, что приводило к образованию очагов локального загрязнения в непосредственной близости от испытательных полигонов [Матишов и др., 1994; Smith et al., 1995a, b]. По различным оценкам в период 1945–2000 гг. на территорию Баренцева моря с атмосферными выпадениями поступило 1.5–2.1 ПБк ^{137}Cs [Матишов, Матишов 2001; Техногенные радионуклиды, 2005; Саркисов и др., 2015].

После аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) в атмосферу поступило до 100 ПБк ^{137}Cs [Израэль и др., 1994], при этом около 1 ПБк ^{137}Cs попало в Арктические регионы непосредственно с атмосферным переносом и выпадением с осадками, затем 5 ПБк этого радионуклида поступило в Норвежское, Баренцево и Карское моря вместе с Норвежским течением из Балтийского и Северного морей [MacDonald, Bewers, 1996].

Радионуклиды, поступившие в окружающую среду в результате сбросов из ядерных центров ПО «Маяк», Сибирского химкомбината и Красноярска-26, в том числе искусственный радионуклид ^{137}Cs , оказали незначительное влияние на радиоактивность арктических морей. Это обуславливается тем, что ^{137}Cs перераспределяется в донные отложения на всем протяжении таких крупных рек, как Енисей и Обь, которые впадают в Карское море Ледовитого океана, а также Иртыша, который является притоком Оби. Также в поймах и эстуариях этих рек при смешивании морской и пресной вод (так называемый маргинальный фильтр океана) происходит лавинообразное выпадение радионуклидов ^{137}Cs с взвесью [Лисицын, 1994; Саркисов и др., 2015].

К западноевропейским радиохимическим заводам, активно сбрасывающим радиоактивные отходы в северные моря во второй половине XX века, относят Селлафилд (северо-западное побережье Англии), Ла-Аг (Франция) и Дунрей (северо-восток Шотландии). Самым значительным источником радионуклидов являлся завод в Селлафилде – суммарная активность сброшенных искусственных радионуклидов составляла 160 ПБк, среди которых на долю ^{137}Cs приходилось 25.6 ПБк [Израэль и др., 1994]. Пик сбросов ^{137}Cs в Ирландское море пришелся на 1975 год (5 ПБк) [Kershaw, Baxter, 1995]. К началу 2000-х гг. поступление этого радионуклида снизилось до величины порядка 0.01 ПБк в год [Матишов, Матишов, 2001].

В целом, к 1985 г. в результате сбросов в Селлафилде и переноса с течениями с временным запаздыванием в 5 лет в акваторию Баренцева моря поступило примерно 5–6 ПБк ^{137}Cs (рис. 10.2.1) [Техногенные радионуклиды..., 2005; Саркисов и др., 2015].

В настоящее время на дне арктических морей находится около 18 тыс. радиационно-опасных объектов, в том числе три атомных подводных лодки (АПЛ), содержащие 5 реакторов с отработавшим ядерным топливом на основе обогащенного урана и относящихся к классу ядерно-опасных [Саркисов и др., 2015]. АПЛ «К-27» была затоплена в 1981 г. в заливе Степового у восточного побережья Новой Земли, «К-278» («Комсомолец») и «К-159» аварийно затонули в Норвежском (1989 г.) и Баренцевом (2003 г.) морях соответственно. Данные объекты представляют наибольшую опасность, так как они содержат ядерное топливо с массой, превышающей критическую, что теоретически не исключает возможности возникновения самопроизвольной цепной реакции и выхода большого количества радиоизотопов в морскую среду. Для Баренцева и Карского морей суммарная активность затоплений радиационно-опасных объектов составляет примерно 38.8 ПБк [Саркисов и др., 2015].

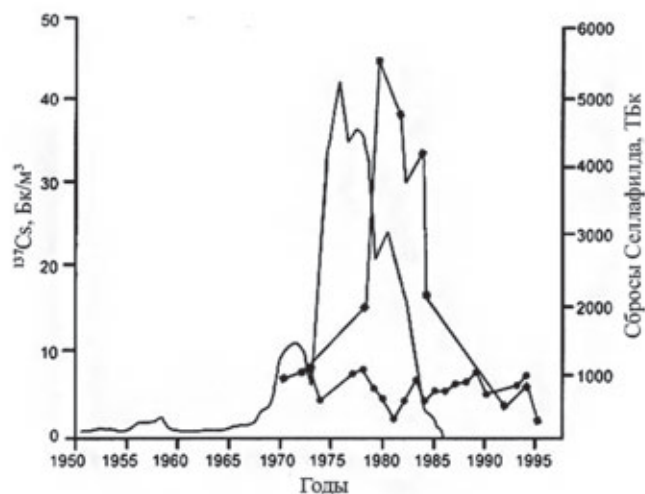


Рис. 10.2.1. Уровни сброса ^{137}Cs с завода по переработке ядерных материалов в Селлафилде в Ирландское море и радиоактивность поверхностных вод Баренцева моря и Восточно-Гренландского течения [Атомное наследие..., 2015].

Линия без маркеров – сбросы Селлафилда, линия с круглыми маркерами – Восточно-Гренландское течение, линия с квадратными маркерами – Баренцево море

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб поверхностной морской воды осуществлялся одновременно с отбором проб поверхностного (0–5 см) слоя донных отложений в 68 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в июле–августе 2017 года. Пробы поверхностной воды объемом 100 л отбирались с помощью проточной системы отряда гидрооптики Института океанологии им. П.П. Ширшова. Пробы донных осадков отбирались дночерпателем «Океан-50». Определение содержания ^{137}Cs в пробах поверхностной воды проводили методом, который основан на его концентрировании с помощью проточной сорбции [Gulin et al., 2015]. Предварительно пробы прокачивали через полипропиленовый фильтр с номинальным диаметром пор 0.5 мкм для удаления взвешенного вещества. Далее фильтрат пропускали через два последовательно соединенных адсорбера, содержащих порошковый сорбент, импрегнированный ферроцианидом никеля-калия. Затем сорбенты сжигались в муфельной печи при температуре 400°C, после чего в них определялось содержание ^{137}Cs на высокоэффективном сцинтилляционном гамма-спектрометре 1282-CompuGamma (LKB Wallac, Финляндия), имеющем геометрию счета, близкую к 4π (well type детектор) по гамма-излучению дочернего радионуклида $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Эффективность сорбции определяли исходя из разницы активности на первом и втором адсорберах [Бей и др., 2015].

Пробы донных осадков высушивали в сушильном шкафу при температуре 80°C, гомогенизировали и проводили определение содержания в них ^{137}Cs на полупроводниковом гамма-спектрометре с детектором из сверхчистого германия. Контроль корректности методов и достоверности полученных результатов осуществляли путём международной интеркалибрации МАГАТЭ (Вена, Австрия) и Национальной Лаборатории (РИСОЕ, Дания) [Радиоэкологический отклик..., 2008].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведение анализа вклада различных источников в загрязнение Баренцева моря радиоцезием показало, что основными из них являются поступление с морскими течениями в результате сброса радиоактивных отходов во Франции и Великобритании, а также глобальные выпадения после испытания ядерного оружия в открытых средах. На фоне этих источников незаметно воздействие от затонувших атомных подводных лодок и операций по сбросу и захоронению радиоактивных отходов.

Первые данные по распространению и количественной динамике ^{137}Cs в поверхностных водах Баренцева моря относятся к 1970-м гг. [Вакуловский и др., 1985], где отмечено содержание изучаемого радиоизотопа на уровне 5–30 Бк/м³, а в юго-восточной части моря – 25–60 Бк/м³. Максимальные концентрации были характерны для прибрежных вод, поступающих с Норвежским течением.

В 1980-е гг. воды Баренцева моря аккумулировали в себе еще большие концентрации ^{137}Cs – 10–90 Бк/м³ [Вакуловский и др., 1985] и было установлено, что практически все повышенные уровни радиоцезия находились в акватории западнее и восточнее Новой Земли, а также к северу от Кольского и Мотовского заливов. В северо-западном направлении от Новой Земли к Шпицбергену содержание ^{137}Cs в поверхностной воде убывало до 6–8 Бк/м³.

В 1990-е годы уровни ^{137}Cs были сравнительно низкими, отмечались концентрации 4.4–7.4 Бк/м³ [Foyn, Semenov, 1993; Матишов, Матишов, 2001]. Несколько большие концентрации были обнаружены в поверхностных водах Норвежского течения рядом с Кольским полуостровом – 4–15 Бк/м³, что обуславливалось как выбросами с Селлафилда, так и более загрязненными водами из Балтийского моря [Матишов, Матишов, 2001]. В исследованиях 2000–2010 гг. отмечены еще более низкие концентрации радиоцезия – 3–5 Бк/м³ [Nikitin, 2014]. В целом, процессы самоочищения морских акваторий протекают более медленными темпами, чем в атмосфере, и по оценкам [Усягина, 2012] время уменьшения содержания ^{137}Cs в Баренцевом море составляет 6–12 лет.

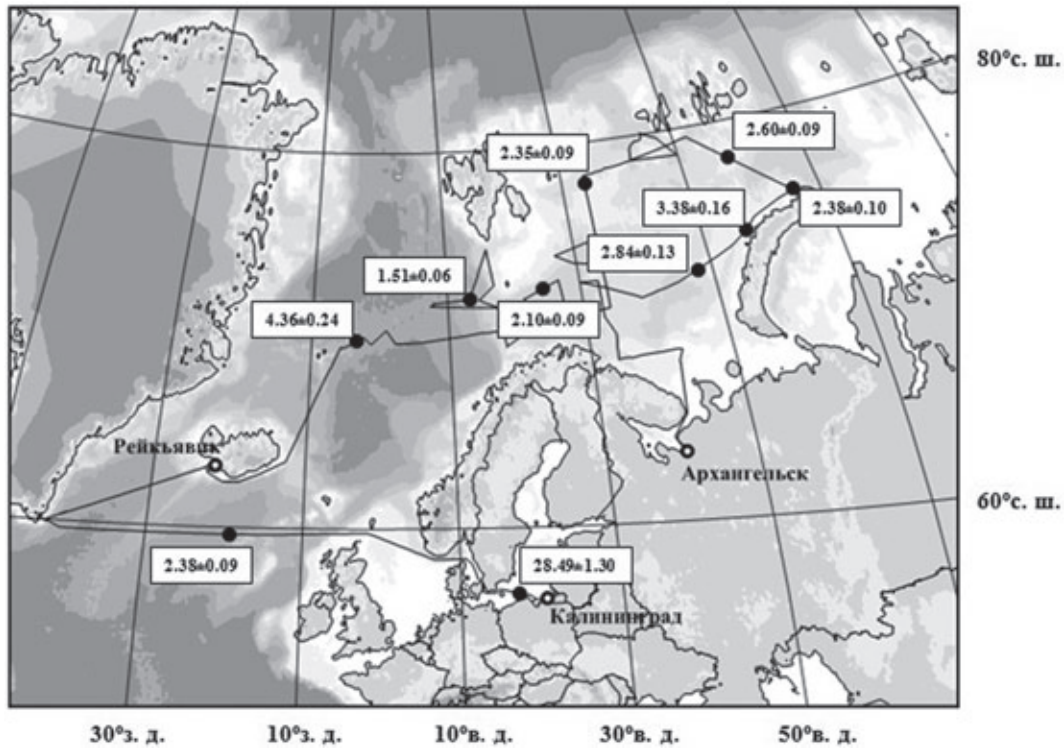


Рис. 10.2.2. Концентрации радионуклидов ^{137}Cs (Бк/м³) в поверхностной воде Баренцева моря (отбор проб 68 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш»)

Результаты определения концентрации радионуклидов ^{137}Cs в водах Норвежского и Баренцева морей в ходе 68 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (июль–август 2017г.) дополняют эти данные (рис. 10.2.2). Так, в различных частях акватории Баренцева моря наблюдались практически одинаковые уровни радиоцезия – 2.1–3.4 Бк/м³. Стоит отметить, что в водах Балтийского моря была определена на порядок большая концентрация ^{137}Cs .

Сравнительная оценка содержания ^{137}Cs в поверхностной воде Баренцева, Балтийского и Черного морей показала, что на протяжении 40 лет самым загрязненным было и остается Балтийское море (рис. 10.2.3). Воды Баренцева моря характеризуются сравнительно более благополучной радиоэкологической обстановкой, где современные уровни ^{137}Cs в 1.9 и 8.4 раз меньше, чем таковые в Черном и Балтийском морях соответственно.

Низкое содержание радиоцезия в водах Баренцева моря, по сравнению с морями, расположенными южнее, может быть обосновано моделью механизмов переноса и ассимиляции радиоизотопов в морских экосистемах [Матишов, Матишов, 2001]. Основная идея данной модели сводится к тому, что в северных морях существует благоприятное сочетание высокой биологической активности, трансграничного водообмена и термохалинных и гидродинамических

условий. Все эти факторы способствуют срабатыванию масштабного эффекта самоочищения акваторий от радиоактивного загрязнения. Наиболее важные функции системы самоочищения контролируются явлениями литологической и биологической адсорбции, которые происходят, соответственно, в маргинальном фильтре (эстуариях) и в пелагическом био-фильтре (аккумуляция гидробионтами).

Следует отметить, что современная нормативная база загрязнения морской среды радионуклидами отличается от имевшей место в 1970–1980-е гг., когда в отечественной и зарубежной практике применялся ряд количественных критериев – норм предельно допустимого сброса радионуклидов в морскую воду, ПДК для морской воды, донных отложений и гидробионтов. В данный момент как в России, так и за рубежом нет обновленных документов. В нашей стране существуют лишь ведомственные [Временные методические указания..., 1981; Руководство..., 1991; СанПиН, 2009], значения в которых разнятся (на порядок) между собой (табл. 10.2.1). Однако, согласно всем нормативно-правовым документам, современные уровни содержания ^{137}Cs в поверхностной воде Баренцева моря находятся ниже предельно допустимых (уровней вмешательства).

Содержание и состав искусственных радионуклидов в поверхностных донных отложениях северных

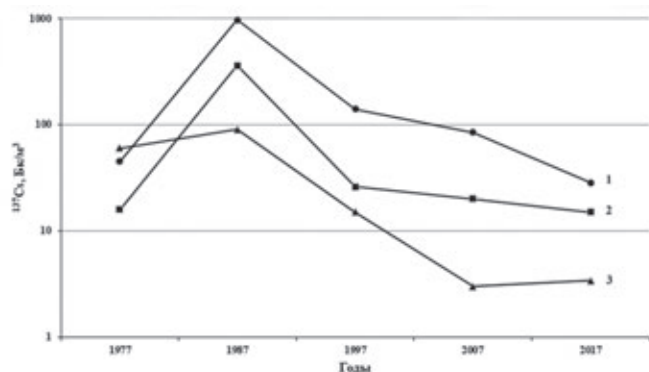


Рис. 10.2.3. Сравнительная характеристика максимального содержания ^{137}Cs на протяжении 40 лет в поверхностных водах Балтийского (1) [Шус, Ikaheimonen, 1991; Матишов, Матишов, 2001], Черного (2) [Радиоэкологический отклик..., 2008] и Баренцева (3) [Матишов, Матишов, 2001; Техногенные радионуклиды..., 2005; Саркисян и др., 2015] морей

морей, в том числе и Баренцева, стали предметом изучения в 1980-х гг. Было выяснено, что особенности

Таблица 10.2.1. Допустимые концентрации (уровни вмешательства) для радионуклида ^{137}Cs в морской воде, применяемые в различных ведомствах Российской Федерации [Временные методические указания..., 1981; Руководство..., 1991; СанПиН, 2009]

Радионуклид	Допустимые концентрации (уровни вмешательства) в морской воде, Бк/л		
	Росгидромет	НРБ-99/2009	ВМФ
^{137}Cs	2.22	11	22.2

По результатам наших исследований (пробы лета 2017 г.) получено, что концентрации ^{137}Cs в поверхностном слое донных отложений Баренцева моря на всех станциях отбора проб были ниже уровня детектирования, за исключением северного побережья Новой Земли, где концентрация радионуклида составила 0.83 Бк/кг. Это может объясняться низкими современными уровнями изучаемого радиоизотопа в воде. Известно, что при низких концентрациях в морской воде цезий образует ионную форму Cs^+ , которая имеет тенденцию оставаться в водной среде, слабо сорбироваться взвесью, а значит, в незначительной степени накапливаться в донных осадках [Громов, Спицин, 1975; Никитин и др., 1991]. Существование радиоцезия в водном растворе преимущественно в ионном состоянии предопределяет способ его миграции в море, который, в свою очередь, зависит от гидрологических факторов. Так в акватории шельфа Баренцева моря к западу от Новой Земли сильные течения интенсивно разбавляют поверхностный сток с архипелага и выносят захваченные радиоизотопы в

миграции и накопления радионуклидов определяются как их химической природой, так и свойствами собственно донных осадков [Матишов, Матишов, 2001]. В начале 1980-х гг. концентрация ^{137}Cs в поверхностном слое донных осадков Баренцева моря составляла 10–30 Бк/кг, при этом основными загрязнителями считались радиохимические заводы западной Европы [Вакуловский и др., 1985; Вакуловский и др. 1988].

Начиная с 1990-х гг., практически во всех районах морского дна донные отложения характеризовались низкими уровнями искусственных радионуклидов [Nies et al., 1998]. По состоянию на 2001–2006 гг. концентрация ^{137}Cs в поверхностном слое практически по всей акватории Баренцева моря была на уровне 1–5 Бк/кг [Сыч, Дубинко, 2012]. Исключение составляла лишь бухта Черная, расположенная в южной оконечности Новой Земли со стороны Баренцева моря, где к середине 2000-х гг. содержание ^{137}Cs составляло 50–100 Бк/кг. Это обуславливается последствиями проведения подводных и надводных ядерных испытаний, проводившихся в этом месте [Саркисов и др., 2015].

Карское море [Матишов и др., 1994]. Из-за гидродинамического режима отсутствуют условия быстрого накопления тонкодисперсной фракции абиогенного и биогенного материала, что обуславливает недетектируемое количество ^{137}Cs в поверхностном слое донных осадков в этом районе.

Однако вызывает интерес изучение более глубоких слоев донных осадков, где, согласно ранее определенным данным [Матишов, Матишов, 2001; Вакуловский и др., 1985; Вакуловский и др. 1988], должны находиться значительные концентрации ^{137}Cs . Эти данные наряду с изучением послойного распределения изотопа ^{210}Pb могут служить основой для проведения датировки донных осадков, геохронологической реконструкции их загрязнения искусственными радионуклидами и определения скоростей осадконакопления в исследуемом районе. Опыт подобных работ существует для Черного моря [Радиоэкологический отклик..., 2008].

Следует также отметить отсутствие в поверхностной воде и донных отложениях Баренцева моря дру-

гого радиоактивного изотопа цезия – ^{134}Cs . Его период полураспада равен 2.1 годам, поэтому он обнаруживается, как правило, лишь после крупных радиационных аварий [Buessler, 2014]. В работе [Дружинин и др., 2016] отмечается, что в донных отложениях Белого моря летом 2012 г. обнаружены значимые концентрации ^{134}Cs – 0.7–8.3 Бк/кг. Данный факт может указывать на поступление техногенной радиоактивности в его акваторию, которая граничит с Баренцевым морем. Однако отсутствие ^{134}Cs в Баренцевом море в 2017 г., а также подтвержденная нашими исследованиями тенденция на снижение концентрации ^{137}Cs в его поверхностных водах говорит о том, что данная акватория не испытывает влияния от потенциальных источников техногенной радиоактивности. Но наши исследования не охватили самый масштабный маргинальный фильтр и накопитель антропогенных радионуклидов – экосистемы побережья, заливов и губ, что требует дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

Основными источниками радионуклидов цезия в Баренцевом море являются сбросы радиоактивных отходов в морскую среду западноевропейскими радиохимическими заводами, а также глобальные выпадения после испытания ядерного оружия в открытых средах.

На основании проведения работ по радиоэкологическому мониторингу в 68 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» и сравнении результатов с предыдущими исследованиями, можно сделать вывод о благополучной радиоэкологической обстановке в акватории Баренцева моря.

Современные концентрации ^{137}Cs в поверхностных водах Баренцева моря составляют 2.1–3.4 Бк/м³ и находятся существенно ниже уровней вмешательства [Временные методические указания..., 1981; Руководство..., 1991; СанПиН, 2009]. Большинство районов Баренцева моря характеризуется небольшими значениями концентрации ^{137}Cs в поверхностном слое донных осадков, так как практически весь он в растворенной форме остается в воде.

В донных осадках детектируемые количества радиоцезия обнаружены лишь у побережья Новой Земли, однако интерес вызывает изучение более глубоких слоев донных отложений, что позволит применять изучаемый радионуклид ^{137}Cs в качестве трассера природных процессов седиментации и осадконакопления.

Не выявлено влияния погибших АПЛ и затопленных радиоактивных отходов на радиоэкологическую обстановку в Баренцевом море. Последствия операций по захоронению РАО могут иметь локальный характер и проявляться лишь в регионах захоронений. Однако на данный момент уровни ^{137}Cs в Баренцевом море в несколько раз ниже, чем в Черном и Балтийском морях, где затопления РАО не проводились.

Процессы самоочищения системы Баренцева моря от радионуклидов контролируются явлениями литологической и биологической адсорбции, которые происходят, соответственно, в маргинальном фильтре и в пелагическом био фильтре.

Проведение дальнейших исследований необходимо в прибрежных экосистемах северных морей – эстуариях крупных рек, заливах, губах, являющихся накопителями антропогенных радионуклидов.

10.3. Оценка современного геоэкологического состояния фьордов восточной части Баренцева моря

В.А. Шахвердов, Д.В. Рябчук, М.А. Спиридонов, В.А. Жамойда, М.В. Шахвердова

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург

Проведен краткий анализ истории изучения геоэкологического состояния Баренцева моря, который показал, что на период начала промышленного освоения геологическая среда характеризовалась низким уровнем нарушения и загрязнения. На примере Кольского залива дана оценка современного геоэкологического состояния фьордов восточной части Баренцева моря. Сейсмоакустические исследования подтверждают преимущественно тектоническое происхождение залива и опасное распространение гравитационного перемещения пород, приуроченного к береговым склонам. Определены фоновые геохимические характеристики современных донных осадков. Показано, что геохимическое районирование дна акватории залива является следствием как природных, так и антропогенных процессов. Получена характеристика различных районов по содержанию в донных осадках Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg и гексанрастворимых нефтепродуктов (НП). Показано, что распределение НП в основных компонентах аквальных и береговых геосистем, наравне с другими поллютантами, является ведущим эле-