

УДК 502:911.2

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ КОНТРОЛЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

¹Епифанова И.Э., ²Епифанов А.О.¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»,
Обнинск, e-mail: epifan.obninsk@gmail.com;²ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета РФ,
Обнинск, e-mail: epifanov@rpatyphoon.ru

Представлен обзор результатов обследования уровней радиоактивного загрязнения морской воды, донных отложений и биоты регионов акватории Баренцева моря наиболее значимыми искусственными радионуклидами ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, полученных в течение длительного периода наблюдений. Приведены оценки объемной активности и концентраций этих радионуклидов на разных глубинах для различных диапазонов временных периодов. Оценены потоки ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в Баренцевом море и приведены годовые балансы этих радионуклидов для широкого диапазона временных периодов. Оценен вклад различных источников загрязнения в поступление радионуклидов в Баренцево море. Подтверждено, что трансокеанический перенос радиоактивных отходов западноевропейских химкомбинатов остается основным источником загрязнения экосистем Баренцева моря ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Описаны совместные исследования российских и зарубежных специалистов по контролю содержания техногенных радионуклидов в компонентах морской и прибрежной экосистем на морских и береговых станциях, а также результаты экспедиционных работ по оценке возможного поступления радионуклидов в морскую среду от затонувших атомных подводных лодок (АПЛ). Показана необходимость единого подхода к проведению радиоэкологического мониторинга специалистами разных стран для научного обоснования оптимальных мероприятий по ликвидации последствий экстренных радиологических ситуаций в случае их возникновения. Отмечено, что, несмотря на стабильно невысокий уровень концентрации радионуклидов в экосистемах акватории Баренцева моря, для успешного (с точки зрения экологической безопасности) развития народнохозяйственной деятельности необходимо продолжать регулярный радиоэкологический мониторинг в этом регионе.

Ключевые слова: Баренцево море, радиоэкологический мониторинг, радиоактивное загрязнение, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr

ON THE ISSUE OF CONTROL OF THE BARENTS SEA RADIOECOLOGICAL SITUATION'S

¹Epifanova I.E., ²Epifanov A.O.¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, e-mail: epifan.obninsk@gmail.com;²Research&Production Association «Typhoon» of Roshydromet RF, Obninsk,
e-mail: epifanov@rpatyphoon.ru

An overview of the results of a survey of the levels of radioactive contamination of seawater, bottom sediments and biota of the regions of the Barents Sea water area with the most significant artificial radionuclides ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr obtained over a long period of observations is presented. Estimates of the volumetric activity and concentrations of these radionuclides at different depths for different ranges of time periods are given. The fluxes of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the Barents Sea are estimated and the annual balances of these radionuclides are given for a wide range of time periods. The contribution of various sources of pollution to the intake of radionuclides into the Barents Sea was estimated. It was confirmed that the transoceanic transport of radioactive waste from Western European chemical plants remains the main source of pollution of the ecosystems of the Barents Sea with ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr. The joint studies of Russian and foreign specialists on the control of the content of technogenic radionuclides in the components of marine and coastal ecosystems at sea and coastal stations, as well as the results of expeditionary work to assess the possible intake of radionuclides into the marine environment from sunken nuclear submarines, are described. The need for a unified approach to radioecological monitoring by specialists from different countries for the scientific substantiation of optimal measures to eliminate the consequences of emergency radiological situations in case of their occurrence was shown. It is noted that, despite the stably low level of concentration of radionuclides in the ecosystems of the Barents Sea water area, for the successful (in terms of environmental safety) development of national economic activity, it is necessary to continue regular radioecological monitoring on this region.

Keywords: Barents Sea, radioecological monitoring, radioactive contamination, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr

Современный уровень развития народно-хозяйственной деятельности в регионах Арктической зоны России по разведке и освоению новых месторождений газа и нефти, работа предприятий по переработке и утилизации радиоактивных отходов (РАО), а также деятельность атомного морского флота становятся причинами возрас-

тающего техногенного воздействия на эти территории [1]. Среди многочисленных экологических проблем арктических регионов важное место занимает радиоактивное загрязнение [2]. Поэтому для дальнейшего безопасного развития регионов Арктической зоны РФ необходимо постоянное проведение мониторинга радиоэкологического

состояния окружающей среды, важной составляющей которого является радиологический мониторинг морских вод и донных отложений северных морей. Информация об уровне загрязнения водных экосистем необходима для решения природоохранных вопросов, особенно на локальных акваториях с относительно высокими уровнями искусственных изотопов $^{134,137}\text{Cs}$, ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239-240}\text{Pu}$. Также это важно для организации системы экологической безопасности в случае применения при нефтегазодобыче на шельфе атомных энергетических установок и для случаев аварийных ситуаций на объектах с атомными реакторами [3].

Изучение радиоэкологического состояния арктических морей ассоциируется, в первую очередь, с исследованием Баренцева моря, воды которого загрязняются техногенными радионуклидами с начала испытания атомного оружия по настоящее время. Баренцево море подвержено, по сравнению с другими морями Северного Ледовитого океана, наиболее сильному влиянию потока вод из Северной Атлантики, определяющему высокий уровень радиационного воздействия на морскую экосистему [4]. Баренцево море обладает высоким рыбопромышленным потенциалом. При оценке негативного влияния радиоактивного загрязнения на компоненты морской биоты и связанных с этим рисков для населения необходимы знания закономерностей накопления и миграции радионуклидов в экосистемах моря [5].

С целью подтверждения важности проведения научно-исследовательских работ по оценке и контролю радиоэкологической обстановки, как для решения практических задач (определения оптимальных способов экологически безопасного освоения природных ресурсов региона и ведения народнохозяйственной деятельности), так и для теоретического изучения глобальных процессов, протекающих в окружающей среде, в данной работе представлены результаты радиоэкологического мониторинга региона Баренцева моря, полученные за длительный период наблюдений, в процессе изменения приоритетных источников загрязнения радионуклидами окружающей среды в этом регионе. Сделан вывод, что, с учетом вероятности возникновения аварийных ситуаций на ядерно-опасных объектах региона, регулярный радиоэкологический мониторинг акватории Баренцева моря сохраняет свою актуальность.

Исследование содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в акватории Баренцева моря

Современная радиоэкологическая обстановка в Баренцевом море сложилась под

воздействием целого ряда источников техногенного загрязнения. Сброс отходов радиохимических западноевропейских комбинатов, глобальные выпадения радионуклидов, обусловленные проведенными на архипелаге Новая Земля ядерными испытаниями и аварийным выбросом после аварии на ЧАЭС, деятельность атомного морского флота и предприятий по переработке и утилизации радиоактивных отходов (РАО), а также размещение пунктов захоронения РАО и объектов с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) определяют уровень загрязнения морских вод в этом регионе [6; 7].

К наиболее значимым радионуклидам, требующим постоянного контроля за их содержанием в природных водах, относятся ^{137}Cs и ^{90}Sr . ^{137}Cs имеет высокую радиотоксичность (β - и γ -излучатель) и повышенную растворимость в водных средах [8]. ^{90}Sr имеет долгий период полувыведения из организма человека (11 лет); при попадании в организм быстро не выводится, прочно фиксируясь в костях. Являясь токсикантами, легко встраивающимися в процессы метаболизма, и имеющими длительный период полураспада, эти радионуклиды своим присутствием в окружающей среде представляют серьезную опасность для здоровья людей. Поэтому при проведении мониторинга радиоэкологической ситуации в акватории Баренцева моря одной из приоритетных задач является оценка содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в исследуемых образцах.

Объемные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в водах Баренцева моря вблизи его границы с Норвежским морем, полученные в ходе периодических экспедиционных обследований, приведены в [9]. Приведены данные о вкладах разных источников загрязнения в поступление радионуклидов в Баренцево море. Сделан вывод, что основным источником радиационного загрязнения в 1961–1970 гг. являлись атмосферные глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов, а после 1971 г. – трансокеанический перенос радиоактивных отходов западноевропейских радиохимических заводов. В [10] приведены оценки концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr в морской воде на различных глубинах; проанализировано изменение отношения концентраций $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ в зависимости от влияния течений. Подтверждено существенное влияние загрязненных радиоактивными отходами вод Норвежского прибрежного течения на радиационную обстановку в Баренцевом море: поступление локального ^{137}Cs из Норвежского моря только за один 1982 г. составило около 35% суммарного выпадения радионуклида в результате всех ядерных испытаний, проведенных до 1978 г.

Существенный вклад в исследование радиологической обстановки региона Баренцева моря внесен специалистами Мурманского морского биологического института. Результаты многолетних наблюдений, проводимых начиная с 50-х годов XX века, представлены в широком ряде работ.

Оценка потоков ^{137}Cs и ^{90}Sr в Баренцевом море представлена в [11]. Приведены годовые балансы ^{137}Cs и ^{90}Sr для широкого диапазона временных периодов начиная с 50-х годов XX века. Установлено, что главной составляющей приходных частей годовых балансов радионуклидов в Баренцевом море с 1960 по 2009 г. является перенос ^{137}Cs и ^{90}Sr по системе течений из Норвежского моря. Атмосферные выпадения вносили существенный вклад в радиоактивное загрязнение моря в 1950–1960-е гг. и 1986 г. Поступление ^{137}Cs и ^{90}Sr с речными водами, так же как и при сливах жидких радиоактивных отходов в результате аварийных ситуаций, незначительно. В современном балансе ^{137}Cs и ^{90}Sr трансграничный перенос из Норвежского моря для каждого радионуклида составляет около 99% от общего поступления. В 1960–1980-х гг. отмечено значительное преобладание изотопов ^{137}Cs ; в 1990-е гг. ^{137}Cs и ^{90}Sr поступали из Норвежского моря примерно в одинаковых количествах; в настоящее время перенос ^{90}Sr преобладает над переносом ^{137}Cs [11].

В [12] также отмечено, что трансокеанический перенос радиоактивных отходов западноевропейских радиохимических заводов в Селлафилде и на мысе Аг заметно повлиял на радиоактивное загрязнение всего Баренцева моря. Максимальные объемы сброса в Селлафилде были зафиксированы в 1974–1978 гг. Через 5–6 лет сброшенные радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr попали в Баренцево море. Концентрация ^{137}Cs в начале 80-х годов в отдельных районах моря достигала 30 Бк/м^3 , что в несколько раз выше уровня, обусловленного атмосферными выпадениями. С конца 1970-х гг., с уменьшением значимости последствий ядерных испытаний, трансокеанический перенос сбросов радиохимического завода в Селлафильде становится основным источником поступления радиоизотопов в Баренцево море в целом. В 1990-е годы отмечено резкое снижение концентраций радионуклидов. В 1993–1995 гг. у северной границы моря объемная активность ^{137}Cs не превышала $3,0\text{--}4,7 \text{ Бк/м}^3$, активность ^{90}Sr – $1,0 \text{ Бк/м}^3$. В 2000–2007 гг. содержание радиоцезия в водах центральных и южных районов Баренцева моря составляло $0,5\text{--}3 \text{ Бк/м}^3$, а радиостронция – $0,7\text{--}4,9 \text{ Бк/м}^3$; на северо-западной периферии концентрации ^{137}Cs

и ^{90}Sr были заметно выше: $4,0$ и $7,5 \text{ Бк/м}^3$ соответственно [12].

Радиологический мониторинг загрязнения морей Российского сектора Арктики проведен авторами [4; 13]. Отмечено, что в Баренцево море за период 1950–2009 гг. поступило около $37,5 \cdot 10^3 \text{ ТБк } ^{137}\text{Cs}$ и $24,8 \cdot 10^3 \text{ ТБк } ^{90}\text{Sr}$. К настоящему времени в процессе водообмена большая часть этих радиоизотопов выведена из бассейна. В результате расчета годовых балансов содержание радионуклидов оценено величинами: $11,6 \cdot 10^3 \text{ ТБк } ^{137}\text{Cs}$ и $5,3 \cdot 10^3 \text{ ТБк } ^{90}\text{Sr}$. Большая часть радиоизотопов поступает через Норвежское море как следствие сбросов западноевропейских радиохимических заводов. На примере анализа концентраций ^{137}Cs было показано, что в бассейн Баренцева моря поступало около 20% радиоактивных отходов, сбрасываемых этими заводами [4]. Годовой приток ^{90}Sr с водами превышает расход. Поступление ^{137}Cs было выше его выведения до 1980-х гг., затем баланс стал отрицательным. Донные отложения депонируют в настоящее время около $447 \text{ ТБк } ^{137}\text{Cs}$ и $75 \cdot 10^3 \text{ ТБк } ^{90}\text{Sr}$ [13].

В [12] приведены результаты исследования активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в морской среде в районе Земли Франца-Иосифа (ЗФИ) – одной из наименее изученных частей Баренцева моря. В 1970–1980-е гг. в районе ЗФИ объемная активность ^{137}Cs варьировала от 8 до 15 Бк/м^3 , ^{90}Sr – $4,6\text{--}9 \text{ Бк/м}^3$. В 1990-е гг. уровень загрязнения вод ^{137}Cs составлял $3\text{--}6 \text{ Бк/м}^3$, по ^{90}Sr – $1,5\text{--}3 \text{ Бк/м}^3$. В донных отложениях вблизи ЗФИ содержалось $0,2\text{--}9 \text{ Бк/кг } ^{137}\text{Cs}$; в то же время в зоне переноса атлантических вод течением Фрама концентрация радиоцезия достигала $10\text{--}15 \text{ Бк/кг}$ сухого осадка. Исследование донных отложений в 2000-е годы выявило активность ^{137}Cs от $2\text{--}4,9$ до $4\text{--}8 \text{ Бк/кг}$; ^{90}Sr – от $0,2$ до $2,6 \text{ Бк/кг}$. Современный радиоактивный фон вод, омывающих архипелаг ЗФИ, характеризуется низкими концентрациями ^{137}Cs ($0,3\text{--}1,9 \text{ Бк/м}^3$) и ^{90}Sr ($0,1\text{--}1,8 \text{ Бк/м}^3$).

В результате радиологического мониторинга водных масс западной части Баренцева моря выполнены измерения объемной активности ^{137}Cs [4]. Экспедиционные работы проводились в 2017 г. вдоль западных границ водоема. Отмечено, что подобные прямые исследования не проводились в течение последнего десятилетия, несмотря на актуальность информации о поступлении радионуклидов в Баренцево море. Приведен анализ широтного распределения концентраций ^{137}Cs на западной окраине моря. Показаны современные особенности трансокеанического переноса

этого изотопа из Северной Атлантики в Баренцево море. Отмечено, что атлантические воды по-прежнему отличаются максимальным содержанием радионуклидов, но не все ветви атлантического потока равномерно ими насыщены.

Оценка современного радиоактивного загрязнения и выявление тенденций изменения радиационного фона вод Баренцева и Карского морей представлены в [14]. Приведены концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и донных отложениях в различных частях акватории Баренцева моря в период 1960–2013 гг. Проведенный сравнительный анализ загрязнения показал, что за 60 лет за счет естественных океанологических процессов и распада изотопов концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr многократно снизилась по сравнению с периодом 1960-х гг. Современная динамика активности радионуклидов в Баренцевом море имеет тенденцию снижения до минимальных значений, возможных в «Ядерную эпоху». Отмечено, что обнаружение следов аварийных выбросов АЭС «Фукусима-1» в высокоширотных областях Арктики способствовало повышению внимания к проблеме радиоактивного загрязнения морей Евро-Арктического региона. Дана рекомендация о направленности современных радиоэкологических исследований на проведение мониторинга, изучение перераспределения радионуклидов и механизмов самоочищения морских экосистем, на выявление районов аккумуляции техногенных радионуклидов.

Изучение радиоэкологической обстановки региона Баренцева моря в рамках международного сотрудничества

В настоящее время при проведении радиоэкологического мониторинга специалисты разных стран используют отличающиеся друг от друга методы измерений, приборные/аппаратурные базы, подходы к анализу имеющихся баз данных. Однако в случае возникновения экстренных радиологических ситуаций для научного обоснования адекватных мероприятий по их ликвидации необходимо иметь корректные информационные данные. Поэтому в рамках международного сотрудничества в области радиационной безопасности проводятся совместные исследования российских, норвежских и финских специалистов, целью которых является получение сопоставимых результатов наблюдений надежных и регулярных данных о состоянии радиоактивного загрязнения окружающей среды западной Арктики.

В 1992 г. начались совместные работы России и Норвегии по изучению общего

состояния радиоактивного загрязнения Баренцева моря. С 2006 г. по настоящее время Росгидромет РФ и Норвежское агентство по радиационной защите ведут исследования по совместному проекту мониторинга радиоактивного загрязнения морской среды Баренцева моря [7]. Целью выполняемых работ является разработка и реализация единой мониторинговой программы с общими объектами наблюдений и одинаковыми методическими принципами для обеспечения возможности отслеживать тренды в радиационной обстановке как в прибрежных районах Баренцева моря, так и в районах открытого моря. В рамках этих программ на морских и береговых станциях ведется контроль содержания техногенных радионуклидов в компонентах морской экосистемы. Экспериментальные исследования выполняются на трех станциях в открытом море, а также в окрестностях п. Териберка (побережье Кольского полуострова). Проводится мониторинг радиоактивного загрязнения морской воды в Баренцевом море и российской береговой станции; определяются уровни содержания отдельных радионуклидов в пробах биоты (водоросли, рыба, донные отложения и др.) в районе российской береговой станции. Также производится оценка некоторых экспериментальных параметров, необходимых для моделирования экосистемы Баренцева моря [15]. В рамках программы получены временные ряды данных о содержании радионуклидов в морской воде, донных отложениях и различных видах биоты Баренцева моря. Приоритетным является контроль техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^3H). Получены данные о содержании некоторых естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{228}Ra и ^{210}Pb) в пробах морской воды.

В [16] приведены результаты 10-летних совместных мониторинговых работ норвежских и российских исследователей, выполненных в открытом море и прибрежных районах Баренцева моря. Отбор проб морской воды и водорослей проводился на норвежских станциях Хиллесе (район Тромсё) и Гренсе Якобсельв, проб прибрежных отложений – на двух станциях в Лаксе-фьорде (Финляндия). Дана оценка содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в морской воде, водорослях и рыбе, а также содержания ^{137}Cs в донных отложениях. Сообщается об экспедиционных исследованиях, проведенных в заливе Степового (восточное побережье Новой Земли). В ходе этой экспедиции были взяты образцы донных отложений большого объема для их последующего сравнительного анализа всеми участниками проекта (в исследовании так-

же участвовали представители МАГАТЭ). Отмечено хорошее согласование результатов анализа, проведенного участниками совместной программы и специалистами МАГАТЭ. Данные, собранные в результате 10 лет совместных исследований, дают хорошее представление об уровнях и тенденциях радиоактивного загрязнения морской среды Баренцева моря и подтверждают, что уровни антропогенных радионуклидов низкие и продолжают снижаться.

*Мониторинг экосистем Баренцева моря
в местах расположения
потенциальных источников
локального радиоактивного загрязнения*

Несмотря на невысокий в настоящее время уровень концентраций долгоживущих радионуклидов в водах Баренцева моря, нельзя не учитывать вероятность локального радиоактивного загрязнения экосистем этого региона из-за расположенных на его территории многочисленных захоронений объектов с ОЯТ и РАО.

Возможными источниками локального радиоактивного загрязнения акватории Баренцева моря также являются затонувшие в разное время на разной глубине атомные подводные лодки российского флота, среди которых АПЛ «Комсомолец» и «К-159» относятся к группе наиболее опасных объектов с ОЯТ в Арктике в целом [17]. В рамках программ международного сотрудничества проведен ряд совместных экспедиционных работ российских и норвежских специалистов по оценке возможного поступления радионуклидов в морскую среду Баренцева моря от затонувших АПЛ «Курск», К-159 и «Комсомолец».

В сентябре-октябре 2001 г. в процессе операции по подъему затонувшей АПЛ «Курск» специалистами из России и Норвегии на борту ОИС «Семен Дежнев» проводился мониторинг состояния поверхностных и придонных вод, поверхностного слоя придонных отложений и рыбы в районе затопления субмарины. В исследованных объектах не было обнаружено искусственных гамма-излучателей, подтверждающих возможную утечку радионуклидов из АПЛ «Курск». Результаты выполненных измерений проб морской среды, отобранных до подъема, во время подъема и после подъема затонувшей подлодки, приведены в [7]. Сделан вывод о том, что операция по подъему субмарины не повлекла за собой негативных последствий для радиологической обстановки в данном регионе Баренцева моря.

АПЛ «К-159», затонувшая при буксировке на утилизацию в 2003 г. на выходе

из Кольского залива, рядом с местом расположения судоходных путей и районами рыбного промысла, является наиболее опасным потенциальным источником радиоактивного загрязнения среди остальных захороненных в Баренцевом море объектов с ОЯТ [17]. Осенью 2014 г. проведена совместная норвежско-российская экспедиция в Баренцево море для получения информации о физическом состоянии затонувшей субмарины и оценки уровня радиоактивного загрязнения окружающей морской среды. Проведены видеонаблюдение за «К-159» с помощью подводного аппарата с дистанционным управлением (ROV) и измерение радиации на месте в критических точках вокруг подводной лодки (над реакторным отсеком). Отобраны пробы морской воды, донных отложений и биоты в носовой части, на корме и с обеих сторон реакторного отсека, а также в районе затопленной АПЛ. Установлено, что уровень радиации в районе «К-159» был типичным для Баренцева моря и аналогичным наблюдаемому в 2007 г. Сделан вывод, что утечки из реакторов подводной лодки в морскую среду не происходит [18].

В июле 2019 г. на НИС «G.O. Sars» Норвежским агентством по радиационной и ядерной безопасности была организована экспедиция для мониторинга радиационной обстановки на месте затопления АПЛ К-278 «Комсомолец» с участием российских специалистов. Для обследования корпуса К-278, отбора проб воды, донных отложений, биоты был использован ROV Egir6000. Предварительные результаты измерений удельной активности по ^{137}Cs проб из «облака» непосредственно рядом с верхом шахты АПЛ показали существенное превышение фоновых значений естественных радионуклидов в районе затопления субмарины [19]. Для окончательной оценки радиологического состояния морской среды в обследованном районе проводится детальный анализ отобранных проб в лабораторных условиях. Выполненное обследование подтверждает существование вероятности локального загрязнения морских экосистем вследствие аварийного поступления радионуклидов от затонувших АПЛ и доказывает необходимость проведения регулярного контроля радиологической ситуации в Баренцевом море.

Заключение

Радиологические обследования, проведенные в течение последних лет, подтверждают невысокий уровень концентрации техногенных радионуклидов в экосистемах акватории Баренцева моря

и наличие тенденции снижения уровня их активности до минимальных значений. Несмотря на это, проведение регулярного радиоэкологического мониторинга является важным условием для успешного хозяйственного развития изучаемых регионов и определения оптимальной стратегии экологически безопасной деятельности отраслей местной промышленности.

Информация, полученная в процессе радиоэкологических исследований, может использоваться как научная основа для выбора способов рационального ведения хозяйственной деятельности с учетом обеспечения радиационной безопасности окружающей среды, так и для применения при решении теоретических проблем, связанных с оценкой, перераспределением и балансом искусственных радионуклидов в экосистемах.

Актуальность сотрудничества специалистов разных стран по проблеме контроля радиоэкологической ситуации в Баренцевом море и на прилегающих к нему территориях будет расти по мере увеличения техногенной нагрузки на регион.

Список литературы

1. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Сивинцев Ю.В., Никитин В.С. Проблемы радиационной реабилитации Арктических морей, способы и пути их решения // Арктика: экология и экономика. 2011. № 1 (1). С. 70–81.
2. Саркисов А.А., Большов Л.А., Антипов С.В., Биляшенко В.П., Высоцкий В.Л., Кобринский М.Н., Шведов П.А. История, современное состояние и перспективы радиоэкологической реабилитации Арктики // Атомная энергия. 2016. № 5 (121). С. 247–255.
3. Матишов Д.Г. Антропогенные радионуклиды в морских экосистемах: дис... докт. геогр. наук: 25.00.36. Мурманск, 2001. 394 с.
4. Ильин Г.В., Усягина И.С., Валуйская Д.А., Максимова Т.М. Содержание техногенного изотопа ¹³⁷Cs в Западной части Баренцева моря по результатам экспедиций 2017 года // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. № 4–5 (9). С. 131–139.
5. Усягина И.С. Распределение и пути миграции искусственных радионуклидов в экосистеме Баренцева моря: автореф. дис... канд. геогр. наук. Мурманск, 2012. 24 с.
6. Хвостова М.С. Вопросы радиоэкологии Арктического региона России // Российская Арктика. 2019. № 4. С. 58–71.
7. Никитин А.И., Шершаков В.М., Цатуров Ю.С. Совместные российско-норвежские исследования радиоактивного загрязнения западных арктических морей в районах. Подверженных воздействию локальных источников // Арктика: экология и экономика. 2011. № 2. С. 26–35.
8. Епифанов А.О., Епифанова И.Э. Использование композитных сорбентов на основе гексаацианоферратов для концентрации радиоцезия при проведении радиологического мониторинга природных вод // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 11–1. С. 181–187.
9. Вакуловский С.М. Техногенные радионуклиды в Баренцевом море // Атомная энергия. 2013. № 5 (114). С. 296–299.
10. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. О загрязнении Арктических морей отходами западноевропейских радиохимических заводов // Атомная энергия. 1988. № 6 (58). С. 445–449.
11. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Усягина И.С., Касаткина Н.Е., Павельская Е.В. Оценка потоков ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в Баренцевом море // Доклады Академии наук. 2011. № 6 (439). С. 822–827.
12. Усягина И.С., Касаткина Н.Е., Ильин Г.В. Техногенные радионуклиды в морской среде и элементах наземной экосистемы архипелага Земля Франца-Иосифа // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. Т. 4. № 23. С. 102–112.
13. Ильин Г.В., Усягина И.С., Касаткина Н.Е. Геоэкологическое состояние среды морей Российского сектора Арктики в условиях современных техногенных нагрузок // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 2(21). С. 82–93.
14. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Усягина И.С., Касаткина Н.Е. Многолетняя динамика радиоактивного загрязнения Баренцево-Карского региона (1960–2013 гг.) // Доклады Академии наук. 2014. № 4 (458). С. 473–479.
15. Исследование радиоактивного загрязнения морской среды Баренцева моря. Отчет по российско-норвежскому проекту. Обнинск, 2015. 33 с.
16. Heldal H.E., Jensen L.K., Shpinkov V., Gwynn J.P. 10 Years of Joint Monitoring of Radioactive Substances in the Barents Sea. Joint Norwegian-Russian Expert Group for Investigation of Radioactive Contamination of the Northern Areas [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/321490880_JOINT_NORWEGIAN-RUSSIAN_EXPERT_GROUP_for_investigation_of_Radioactive_Contamination_in_the_Northern_Areas_10_YEARS_OF_JOINT_MONITORING_OF_RADIOACTIVE_SUBSTANCES_IN_THE_BARENTS_SEA (date of access: 20.09.2020).
17. Саркисов А.А., Антипов С.В., Высоцкий В.Л. Приоритетные проекты программы реабилитации арктических морей от затопленных и затонувших ядерных и радиационно опасных объектов и необходимость международного сотрудничества // Арктика: экология и экономика. 2012. № 4 (8). С. 4–15.
18. Gwynn J.P., Heldal H.E. Investigating the Sunken Nuclear Submarine K-159 in the Barents sea. [Electronic resource]. URL: <https://framesenteret.no/arkiv/investigating-the-sunken-nuclear-submarine-k-159-in-the-barents-sea-5751690-146437/> (date of access: 20.09.2020).
19. Вакуловский С.М., Епифанов А.О., Каткова М.Н., Уваров А.Д. Радиоэкологическое обследование вод Баренцева моря в месте затопления АПЛ К-278 «Комсомолец» // Будущее атомной энергетики – Atom Future 2019: материалы XV Международной научно-практической конференции. Обнинск, 2020. С. 22–23.