

Авторы посвящают настоящий труд памяти вице-адмирала,
академика РАН Ашота Аракеловича Саркисова

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2023 г. С. В. Антипов^а, И. Г. Тананаев^{б, *}

^а *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
115191, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52*

^б *Кольский научный центр РАН, 184209, Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, д. 14
e-mail: geokhi@mail.ru

Поступила в редакцию 01.02.2023, после доработки 10.02.2023, принята к публикации 14.02.2023

В обзоре отмечается и обосновывается ключевая роль Арктической зоны в социально-экономическом развитии Российской Федерации, дается определение и детальное описание ее радиоэкологического состояния, раскрываются причины, приведшие к радиоактивному загрязнению арктической территории и акватории, приводятся источники этого загрязнения и их относительный вклад в общую картину, а также предпринятые меры по ликвидации или значительному снижению загрязнений. Показана определяющая роль ГК «Росатом» в развитии международного сотрудничества в рамках Глобального партнерства в ликвидации радиоэкологического загрязнения Арктики в рамках разработанного и выполненного Стратегического мастер-плана комплексной утилизации атомных подводных лодок и экологической реабилитации обслуживающей инфраструктуры флота, реализация которого позволила освободить основные объекты Северо-запада России от «ядерного наследия» холодной войны. Приводятся ряд данных и фотографий объектов до и после выполнения работ по их реабилитации от радиационных загрязнений. В обзоре дается информация о состоянии и различных вариантах решения радиоэкологических проблем других радиационно-опасных объектов, таких как затопленные в арктической акватории объекты с ОЯТ, возможные варианты вывоза ОЯТ с Билибинской АЭС, реабилитации мест аварийных мирных ядерных взрывов, уменьшения выноса в море радионуклидов северными реками. По всем этим направлениям учеными РАН ведутся и будут продолжены исследования, направленные на сбережение и улучшение экологии «Русского Севера».

Ключевые слова: Арктическая зона РФ, радиоэкология, источники радиационного загрязнения, ядерное наследие, испытания ядерного оружия, мирные ядерные взрывы, эксплуатация ядерных энергетических установок, стратегический мастер-план утилизации атомных подводных лодок, вывоз отработанного ядерного топлива, уменьшение накопленной активности в Арктике.

DOI: 10.31857/S0033831123020028, **EDN:** WWXWVA



Научный руководитель работ по ликвидации ядерного наследия, утилизации АПЛ, кораблей, судов атомного флота и реабилитации обслуживающей их инфраструктуры вице-адмирал, академик РАН А.А. Саркисов

Темпы и масштабы будущего социально-экономического развития нашего государства определяются рядом ключевых факторов, среди которых особое место занимает освоение и опережающее развитие Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Что же понимается под этим названием, какие территории и акватории относятся к этой зоне? К сожалению, точного, исчерпывающего юридического определения данного понятия не существует. На законодательном уровне с конца прошлого века предпринимались неоднократные попытки принять закон «Об Арктической зоне Российской Федерации». В 1998 г. в Совете Федерации был разработан и внесен в Госдуму соответствующий законопроект. Но Правительство РФ не поддержало принятие законопроекта, так как введение ряда экономических и социальных льгот на 1/5 части территории РФ возможно было только за счет существенного сокращения доходной части федерального бюджета и увеличения расходной. По разным причинам такой закон не принят до сих пор.

В 2008 г. Президент РФ утвердил «Основы государственной политики Российской Федерации

в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу». Под Арктической зоной Российской Федерации в документе понималась часть Арктики, определенная еще решением Госкомиссии при Совете Министров СССР по делам Арктики от 22 апреля 1989 г.

2 мая 2014 г. Президент РФ В.В. Путин подписал Указ № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации», который определил сухопутные территории Арктической зоны России. Впоследствии в указ были внесены изменения и дополнения с добавлением в этот список восьми районов.

В июле 2020 года был принят федеральный закон № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации», который добавил к Арктической зоне еще несколько территорий. На сегодня в эту зону включен 131 населенный пункт страны. В этом законе появилось подробное определение ее границ: «...Под Арктической зоной Российской Федерации (далее – Арктическая зона) понимаются сухопутные территории и примыкающие к ним внутренние морские воды и территориальное море Российской Федерации, участки континентального шельфа Российской Федерации, а также земли и острова, которые в будущем могут быть открыты, не являются территориями иностранных государств, расположены в Северном Ледовитом океане к северу от побережья Российской Федерации до Северного полюса в пределах между меридианом тридцать два градуса четыре минуты тридцать пять секунд восточной долготы от Гринвича, проходящим по восточной стороне Вайда-губы через триангуляционный знак на мысе Кекурский, и меридианом сто сорок восемь градусов сорок девять минут тридцать секунд западной долготы от Гринвича, проходящим по середине пролива, разделяющего о-ва Ратманова и Крузенштерна группы островов Диомида в Беринговом проливе...» [1].

Хотя перед этим определением стоит фраза «применяется только в целях настоящего Федерального закона» («О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации»), формально ограничивающая его применение, тем не менее, примем это подробное, но сложное определение за универсальное и официальное. Но будем помнить, что самое

простое, но всеобъемлющее определение этому географическому району дал А.П. Энгельгардт – архангельский губернатор, первым использовавший короткий, но четкий и емкий топоним «Русский Север».

Так почему же эта так сложно определяемая зона важна для развития России? Прежде всего, потому, что здесь сконцентрированы почти все ресурсные, технологические, военно-политические основы будущего России [2]. В этой зоне добывается более 90% металлов платиновой группы, никеля, кобальта, меди, 80% газа и 60% нефти, здесь базируются мощные атомные военный и гражданский ледокольный флот, сосредоточены крупнейшие промышленные предприятия для строительства и поддержания их эксплуатации, береговые АЭС и плавучая ПАТЭС, сооружаются объекты малой атомной энергетики, создается инфраструктура для обеспечения обороноспособности страны, круглогодичной навигации по Северному морскому пути – самому короткому и экономичному пути между Западной Европой и Юго-Восточной Азией с гарантированным обеспечением экологической и радиоэкологической чистоты Арктики.

К сожалению, когда возникает вопрос об экологической чистоте, для многих Арктика ассоциируется с большой помойкой, которая никогда не приводилась и не будет приведена в порядок, в частности потому, что казалось, что Север далек и недоступен для проживания, а его уборка нерентабельна и трудно контролируема.

Однако стратегия развития Арктики требует обеспечения ее гарантированной экологической, в том числе радиоэкологической, безопасности. Отдавая должное необходимости приведения в порядок экологии Арктики в целом, в нашем обзоре мы имеем возможность остановиться лишь на радиоэкологических проблемах, на масштабах и основных источниках радиационных загрязнений Арктики, предпринимаемых мерах и планах по ее реабилитации.

Во второй половине прошлого века, в разгар холодной войны, в связи со строительством, эксплуатацией атомного флота и обслуживающей инфраструктуры, проведением испытаний ядерного оружия и т.д. во весь рост встала проблема обращения с радиоактивными отходами. В условиях гонки

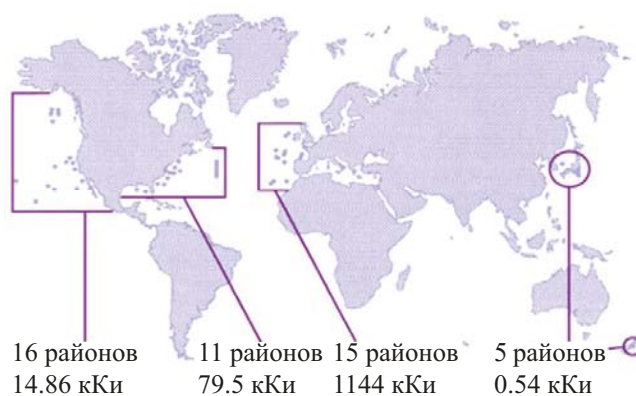


Рис. 1. Районы захоронения РАО в Мировом океане (без СССР)

ядерных вооружений для сохранения оборонного паритета все силы и ресурсы страны были направлены на разработку, испытание и производство в необходимом количестве оружия, боеприпасов и их носителей. Поскольку этот процесс сопровождался образованием большого количества радиоактивных отходов, а системы обращения с ними не было, было принято решение сливать и затоплять жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) и твердые радиоактивные отходы (ТРО) в акватории Северного Ледовитого океана или хранить их временно на берегу. К сожалению, это совпало с распространенной мировой практикой. Первое затопление ТРО состоялось в 1946 г. в Тихом океане [3]. Его осуществили США близ побережья Калифорнии без фиксации активности и радионуклидного состава затопляемых объектов. Такой способ обращения с РАО обрел активных последователей – затопление РАО (дампинг) осуществляли 14 стран в 47 районах Атлантического и Тихого океанов (рис. 1).

В результате этой деятельности, а также из-за случившихся аварий с выходом радионуклидов в окружающую среду, последней был нанесен существенный ущерб, что выразилось в радиоактивном загрязнении территорий и морских акваторий. Из-за высокой концентрации ядерно- и радиационно-опасных объектов (ЯРОО) и географического положения особенно досталось северо-западу России. Ниже приведены основные источники и представлены причины появления этих загрязнений и их относительный вклад в общую картину: испытания ядерного оружия в атмосфере (глобальные выпадения); сброс РАО в воды северных морей в результате работы радиохимических комбинатов

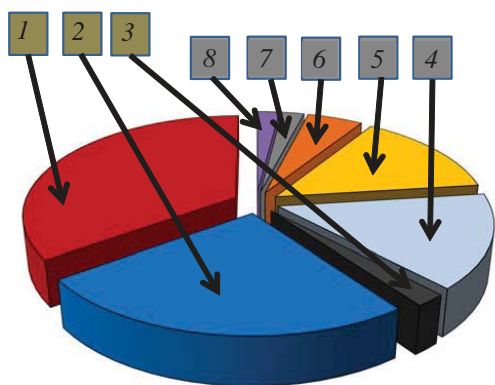


Рис. 2. Источники радиоактивного загрязнения Арктической акватории и их сравнительные объемы:

1 – затопленные объекты с ОЯТ; 2 – затопленные реакторы, радиоактивные отходы (без ОЯТ); 3 – затопленные ТРО; 4 – вынос РАО с мыса Аг и Селлафилда Гольфстримом; 5 – глобальные выпадения от ядерных испытаний; 6 – вынос нуклидов реками России; 7 – Чернобыльские выпадения; 8 – сливы ЖРО в море.

Великобритании и Франции; вынос радиоактивных веществ российскими северными реками; длительная эксплуатация военного и ледокольного атомных флотов СССР/России; Чернобыльские выпадения; массовый вывод из эксплуатации атомного флота и обслуживающей его инфраструктуры; затопление/гибель объектов, содержащих ОЯТ и РАО, в северных морях, включая атомные подводные лодки (АПЛ) К-27, «Комсомолец» и Б-159, и т.д.

При этом разделим источники загрязнений на две группы: (а) реальные источники, т.е. те, которые сегодня оказывают влияние на радиоэкологическую обстановку региона; (б) потенциальные источники, которые пока не влияют на радиоэкологическое состояние, но могут снести существенный свой вклад при определенных условиях (рис. 2). Из рис. 2 видно, что на сегодня уровень реального радиационного загрязнения в основном определяют глобальные выпадения от испытаний государствами «ядерного клуба» ядерного оружия в атмосфере, проводившиеся СССР испытания на Новой Земле, вынос слитых в море радиоактивных отходов от предприятий Великобритании и Франции [4], ядерные взрывы в мирных целях, Чернобыльские выпадения, эксплуатация и вывод из эксплуатации (утилизация) объектов военного и гражданского атомных флотов.

К потенциальным источникам можно отнести затопленные (планово и аварийно) объекты с ОЯТ, реакторные отсеки и реакторы без ОЯТ, ТРО. На

рис. 2 отражен относительный вклад этих факторов в радиоактивное загрязнение Арктики, а на рис. 3 показаны реальные поля загрязнения в местах базирования флота.

На полигонах государств, обладающих ядерным оружием, начиная с 1945 г., было осуществлено более 500 атмосферных ядерных взрывов. В Советском Союзе действовало два ядерных полигона – Семипалатинский, на котором было проведено около 75% всех испытаний, и Новоземельский (или Центральный), где испытывали термоядерные заряды особой мощности. Середина прошлого столетия характеризовалась высочайшей активностью испытаний. Загрязнение окружающей среды принимало угрожающие масштабы. По некоторым данным, в результате испытаний ядерного оружия в окружающую среду было выброшено до 30 МКи ^{137}Cs и 20 МКи ^{90}Sr , что практически повсеместно привело к резкому повышению радиационного фона [5]. Российские ученые делали все возможное для того, чтобы минимизировать последствия глобальных выпадений. Огромную роль сыграл в этом Борис Васильевич Курчатов, брат И.В. Курчатова, выдающийся советский ученый, о котором, к сожалению, знают немногие.

Осознав пагубность проведения такой политики, представляющей опасность для современного и будущих поколений, в 1963 году Советский Союз, США и Великобритания подписали в Москве До-

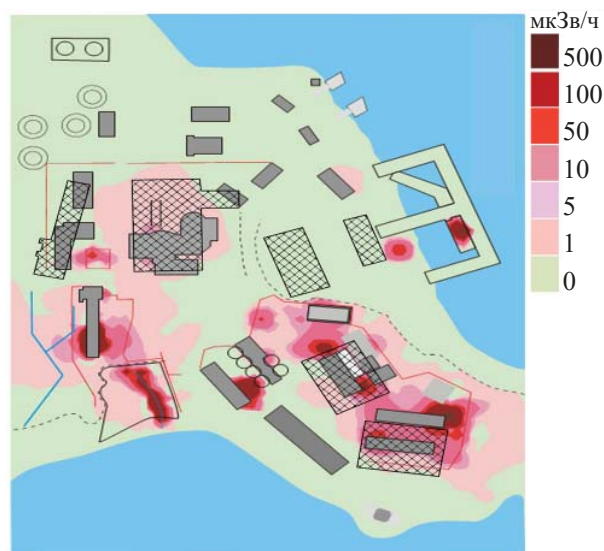


Рис. 3. Радиационное загрязнение территории береговой технической базы (БТБ) в губе Андреева.

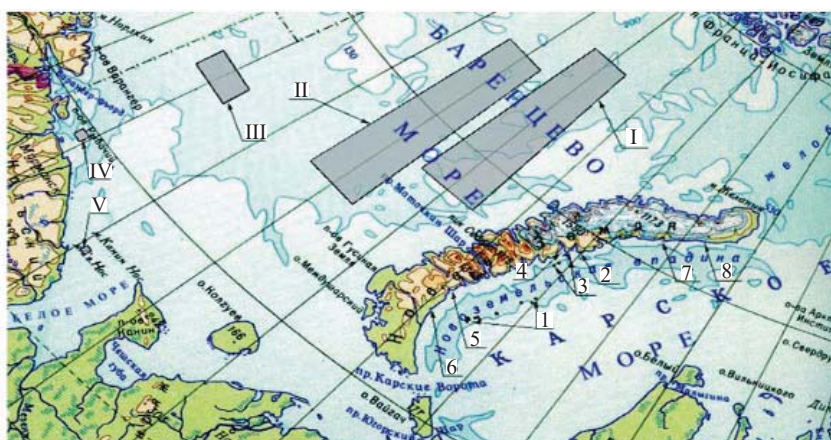


Рис. 4. Районы слива жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и затопления твердых радиоактивных отходов (ТРО) в акватории морей СССР; №№ 1–8 – сбросы твердых радиоактивных отходов; районы I – V – сбросы жидких радиоактивных отходов.

говор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, в космосе и под водой. Это привело к снижению интенсивности глобальных выпадений. Однако Крайнему Северу досталась тяжелая участь – за счет широтной зависимости атмосферного переноса воздушных масс (зональные ветры) в зоне 40-х градусов северной широты сформировался пояс максимальной плотности выпадений радионуклидов – до 1 кБк/м². Кроме широтной зависимости, на выпадения радиоактивных осадков влияют метеоусловия [6]. Максимум атмосферных осадков, характерный для Кольского полуострова, вызвал двукратное повышение уровня радиоактивного загрязнения лишайников и мхов в Мурманской области. Самая высокая мощность эквивалентной дозы, получаемой коренным населением Севера через пищевую цепочку лишайник–олень–человек, достигала здесь в 1966 г. 8 мЗв/год, что в 100 раз выше, чем у жителей крупных городов СССР. Но и сейчас содержание ¹³⁷Cs в лишайниках, определенное НИИ радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева, сохраняется на уровне до 350 Бк/кг сухой массы [7].

Радиоактивные выбросы от аварии на Чернобыльской АЭС также не обошли Крайний Север стороной. Но в большей степени их последствия коснулись стран Западной Европы, где ¹³⁷Cs было загрязнено до 60000 км² территорий с уровнями >1 Ки/км². Особенно пострадал ряд областей Норвегии с выпадением по ¹³⁷Cs до 500 кБк/м² [8].

Что касается затоплений РАО в океане, то по данным первой инвентаризации, выполненной МАГАТЭ в 1991 г., за 36 лет в морях Мирового океана

было затоплено 1.24 МКи твердых радиоактивных отходов (без учета вклада СССР). Подавляющая их часть приходится на северную часть Атлантики, где в 15 районах было затоплено более 1 МКи ТРО, удаленных Великобританией. В Тихом океане доминирует доля отходов США. Советский Союз совершил основные сбросы в регионе Крайнего Севера, где были выделены специальные районы для удаления РАО (рис. 4) [9].

К такому вынужденному решению привела следующая хронология событий. В 1958 г. начались ходовые испытания первой отечественной атомной лодки К-3. Оба реактора были выведены на мощность, и лодка совершила первое погружение и движение под водой. Через год на К-3 перегрузили активную зону и заменили парогенераторы. Одновременно в Белом море пошли ходовые испытания сразу трех новых АПЛ, что привело к накоплению не только жидких и твердых отходов, но и ОЯТ. Пришлось в срочном порядке определиться с защитой морской среды от радиационного воздействия. Уже к 1962 г. на технических базах флота в губе Андреева и пос. Гремиха были воздвигнуты комплексы по переработке жидких РАО с необходимым оборудованием, однако по разным причинам они в эксплуатацию не были введены, и образующиеся отходы стали сливать в море. Первым документом, регламентирующим этот порядок, явились «Временные санитарные требования к сбросу радиоактивных отходов с объектов ВМФ» ВСТ-60 [10], по которым устанавливались пределы суммарной активности и объема сливаемых вод (не более 10 Ки

Таблица 1. Активность более 30 000 ОТВС, хранившихся на объектах Северо-Запада РФ

Объекты	Активность ОЯТ (МКи)
Утилизируемые АПЛ с ОЯТ	5.0
ПВХ в губе Андреева	3.46
ПВХ в Гремихе	0.35
ПТБ «Лепсе»	0.54
Зд. 5 ФГУП "Атомфлот"	2.57

объемом не выше 1000 м³). Потребовались плавучие технические базы (плавмастерские) и танкеры Северного флота ВС СССР. Вся эта разнородная флотилия за 32 года перевезла и захоронила от 140 до 205 тыс. м³ радиоактивных вод. Следует отметить, что как бы пугающе не звучали приведенные выше цифры сливов и сбросов, их содержанием являлись радиоактивные отходы низкой и средней активности с пренебрежимо малым воздействием на окружающую среду относительно глобальных техногенных выпадений при атмосферных ядерных испытаниях в 1950–1960-х гг.

Счет захоронениям ТРО в Северном регионе был открыт также в 1959 г., когда в Белом море была затоплена безымянная баржа с радиоактивными отходами из Северодвинска. Затем (1966 г.) были введены в действие «Временные санитарные требования к захоронению в море радиоактивных отходов», где допускались к сбросу в море твердые отходы (кроме ОТВС). До 1991 г. всего было захоронено около 18 тысяч объектов различной степени радиационной опасности объемом более 30 тыс. м³, в том числе 18 затоплений совместно со списанными судами. В соответствии с Лондонской конвенцией, к которой присоединилась и Россия (СССР), захоронения ТРО в море были запрещены, а на сбросы ЖРО устанавливался мораторий [11]. Таким образом, хотя проблема ТРО и ЖРО и не была решена, но по крайней мере в этой области были установлены определенные запреты и ограничения, защищающие окружающую природную среду и требующие использовать иные экологически приемлемые способы обращения с отходами.

Одновременно с этим во весь рост встала не менее масштабная проблема – что делать с выслужившими свои проектные сроки эксплуатации и выведенными из боевого состава ВМФ АПЛ? В 1986 г. в результате наступившей «разрядки» было принято

решение вывести из состава ВМФ все АПЛ первого и второго поколения и приступить к их утилизации. За период 1986–1998 гг. из состава флота на Дальнем Востоке и на Севере было выведено свыше 170 АПЛ, а темпы выгрузки из них ОЯТ и утилизации не превышали 2–3 объекта в год [12]. Существовавшая промышленная инфраструктура была создана для массового строительства АПЛ – СССР построил атомных подводных лодок больше, чем все остальные государства, вместе взятые. Но эта же промышленность оказалась неподготовленной к такому массовому выводу АПЛ и их утилизации. Не было соответствующего оборудования, технологий, проектной документации, отсутствовали подготовленные кадры. В результате происходило накопление в пунктах отстоя хранящихся на плаву АПЛ и реакторных блоков с ОЯТ в активных зонах реакторов. Это создавало высокий уровень риска обширного загрязнения акваторий арктических морей при возникновении аварийных ситуаций на ядерно- и радиационно-опасных объектах, поскольку подлежащие утилизации АПЛ и суда сопровождения (атомного технического обслуживания, АТО), а также объекты обслуживающей инфраструктуры – береговые технические базы, судостроительные и судоремонтные предприятия – в Арктическом регионе концентрированно локализованы на севере Кольского полуострова в районе г. Мурманска и пос. Гремиха, а также в г. Северодвинске Архангельской обл. Радиационный потенциал ОЯТ, накопленного в активных зонах реакторов АПЛ и в хранилищах береговых технических баз, к 1998 г. в десятки раз превышал уровни проявившегося к этому времени реального радиоактивного загрязнения Арктического региона от различных источников (табл. 1). В целом масштаб проблемы характеризовался такими цифрами [13]: было необходимо утилизировать около 150 АПЛ, большей частью – с ОЯТ на борту, а более 30 – с потерей плавучести; общая активность ОЯТ в их активных зонах – свыше 25 МКи; суммарная масса радиоактивных конструктивных материалов – свыше 150 тыс. тонн.

Эта проблема вызывала озабоченность как российских, так и зарубежных ученых, специалистов, политиков, общественности. В такой ситуации Министерство обороны РФ, отвечавшее за утилизацию АПЛ, но имевшее в качестве основной задачи обеспечение обороны страны, оказалось не в состоя-

нии решить эти проблемы. Поэтому Правительство РФ передало все функции по утилизации АПЛ Министерству по атомной энергии РФ (Постановление Правительства РФ от 1998 года № 518). Для Министерства по атомной энергии РФ эта задача также не являлась основной, однако эта организация имела богатый опыт международного сотрудничества в ядерной области и сумела организовать взаимодействие в части не только утилизации АПЛ, но и реабилитации обслуживающей инфраструктуры более чем с десятком стран мира [14]. При этом Российская сторона, представленная кроме Министерства атомной энергии РФ также представителями МИДа, Министерства финансов РФ, ВМФ, судостроителей и др., сумела донести до иностранных партнеров нашу позицию, что именно их определенные действия, такие, как применение США первыми ядерного оружия, раскручивание гонки вооружений, создание ситуации опасного противостояния сторон и т.п., вынудили СССР в ответ создать паритетные системы обороны, ставшие угрозой для обеих сторон. И поскольку возникшая опасность угрожает обеим сторонам и всему миру, нужны совместные усилия (в том числе финансовые) для ликвидации возникших угроз. После длительных многократных встреч и переговоров был найден компромисс, устроивший всех. На этой базе появилась инициатива «Глобальное партнерство», где среди четырех направлений сотрудничества одним из главных стала утилизация АПЛ при совместном финансировании работ.

Для лучшего понимания конкретной ситуации, правильной расстановки приоритетов, ранжирования проектов, во избежание дублирования и пропусков работ, а также для контроля за расходованием средств назначенное государственным заказчиком-координатором работ по данной проблеме Министерство атомной энергии РФ предложило разработать Стратегический мастер-план утилизации выведенных АПЛ и реабилитации объектов обслуживающей их инфраструктуры (СМП), что было поддержано участниками «Глобального партнерства» и Фондом природоохранного партнерства «Северного измерения», который взялся профинансировать разработку данного плана. Главной исполнителем СМП ИБРАЭ РАН совместно с НИЦ «Курчатовский институт» и НИКИЭТ сформировал рабочую группу, куда вошли ведущие уче-

ные и специалисты 12 российских организаций, а также консультанты из ведущих компаний США и Великобритании, имевшие богатый опыт стратегического планирования в области реабилитации радиационно-опасных объектов. Под научным руководством вице-адмирала академика РАН А.А. Саркисова этот коллектив в кратчайшие сроки сумел впервые в России разработать такой масштабный стратегический план и автоматизированную систему управления его реализацией (ИСУП) [15].

СМП был одобрен Ассамблеей доноров Фонда поддержки Природоохранного партнерства «Северное измерение» (ППСИ) и введен в действие приказом генерального директора ГК «Росатом» в качестве основного руководящего документа по решению проблемы ликвидации ядерного наследия холодной войны на северо-западе России. К настоящему времени СМП практически реализован по всем основным направлениям. По оставшимся не до конца решенным проблемам выработаны научные и технические решения, составлены планы и графики работ. Это позволило ликвидировать острые проблемы ядерного наследия на северо-западе России и радикально улучшить здесь радиоэкологическую обстановку [16]. Участники разработки не только реализовали дорожную карту СМП, но и создали научно-технические основы и информационно-аналитическое обеспечение ликвидации ядерного наследия на северо-западе России. Руководитель коллектива академик РАН А.А. Саркисов стал лауреатом Международной энергетической Премии «Глобальная энергия», а наиболее опытные участники были удостоены Премии Правительства РФ в области науки и техники 2014 г.

Сегодня основные результаты работ по проблеме СМП выглядят так (рис. 5–9):

на северо-западе России утилизировано 120 АПЛ из выведенных 126 (одна – в процессе утилизации, 4 ожидают утилизации, по затонувшей Б-159) пока не принято решение;

в Сайда-губе создан пункт долговременного хранения реакторных отсеков. Там уже установлено на долговременное хранение (70–100 лет) 123 реакторных отсека;

там же построен и введен в строй региональный центр кондиционирования и долговременного хранения ТРО;



Рис. 5. Рабочие моменты на этапах вывода из эксплуатации 120 из 126 АПЛ первого и второго поколения, выведенных из состава Северного флота; на 2023 год 4 АПЛ ожидают утилизации, а по затопленной АПЛ Б-159 решение не принято.

из пункта временного хранения ОЯТ и РАО в пос. Гремиха вывезено все ОЯТ реакторов ВВР;

восстановлена инфраструктура выгрузки и выгружено ОЯТ из трех АПЛ с жидкометаллическим теплоносителем;

введено в эксплуатацию хранилище неперерабатываемого ОЯТ на площадке АО «Атомфлот»;

создан комплекс по выгрузке ОЯТ из хранилищ в губе Андреева, выгружено и вывезено на ПО «Маяк» более половины ОТВС.

в Мурманской и Архангельской областях созданы системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования.

На главных объектах Кольского полуострова, а это губа Андреева, пос. Гремиха и губа Сайда, в прошлом году суммарная активность сокращена на 324 кКи за счет вывоза ОЯТ на переработку на ПО «Маяк». На 1 июня 2022 г. накопленная радиоактивность в районе действия СМП составляет около 5 МКи. Полную разгрузку отработавшего ядерного топлива из хранилищ в губе Андреева планируется завершить к 2027 г. [17].

Сегодня наиболее актуальной проблемой радиологической реабилитации Арктики остается проблема затопленных ЯРОО. Как отмечено выше, в арктической акватории было затоплено около 18000 радиоактивных объектов, из которых 7 содержат ядерное топливо (табл. 2).

На данный момент из всех наиболее опасных затопленных объектов «наследия», относящихся к классу ядерно-опасных и содержащих делящиеся материалы на основе обогащенного урана, самыми опасными являются АПЛ К-27 и Б-159, так как в первой находится высокообогащенный уран оружейного качества, а во второй – почти треть активности от всех затопленных на Севере ЯРОО. Есть и другие причины для такого утверждения. Поэтому постоянно ведутся научные исследования состояния объектов, мониторинг радиологического состояния в районах затоплений, проводятся материаловедческие исследования и прогнозы разрушений конструкционных материалов (НИЦ КИ). В продолжение работ по СМП ИБРАЭ РАН проведены исследования по расчету коррозионного разрушения защитных барьеров ядерных объектов и распространения различных радионуклидов в аква-



Рис. 6. Созданные сооружения в Сайда-губе: пункт длительного хранения радиоактивных отсеков (ПДХ РО, слева) и Центр кондиционирования и длительного хранения РАО (РЦКДХ РАО, справа)

тории Северного Ледовитого океана в случае их выхода в окружающую среду. Показано, что по всем рассмотренным объектам возможен локальный выход активности не более 100 Бк/м^3 с дальнейшим падением до фоновых значений.

Хотя перед затоплением объекты специально готовились так, чтобы гарантировано в течение сотни лет из них не произошло выхода активности, тем не менее, при разработке сценариев гипотетических аварий рассматривались и такие, которые допускают для К-27 и Б-159 возможность возникновения самопроизвольной цепной реакции с разрушением корпуса АПЛ [18, 19].

Сегодня вопрос о возможном подъеме и утилизации затопленных объектов с ОЯТ по-преж-

нему официально не решен. Есть различные мнения, оценки, рекомендации, заключения, но нет предписывающего государственного документа, поручающего какому-то органу или организации выполнение работы по подъему, возлагающего ответственность за безопасность и определяющего источник финансирования. В результате сложилась некая матрица с пятью «не»: (1) не определен правовой статус затопленных объектов; (2) не определен федеральный орган, ответственный за реабилитацию арктических морей от ЯРОО; (3) не определена комплексная программа решения проблемы; (4) не определена нормативно-правовая база в области загрязнения морей радиоактивными материалами; и, наконец, (5) не определены источники финансирования работ по реабилитации арктических морей

Таблица 2. Ядерно и радиационно опасные объекты, находящиеся на дне морей Арктики

Ядерно и радиационный объект	Число (ед)	Комментарии
Атомные подводные лодки	3	с ОЯТ
Ядерный реактор с АПЛ заказ № 421	1	с ОЯТ
Экранная сборки атомного ледокола	1	с ОЯТ
Реакторный отсек	2	с ОЯТ
Реакторный отсек	3	без ОЯТ
Радиоактивные конструкции	735	–
Суда для слива радиоактивных отходов	19	с ТРО
Контейнеры с ТРО	до 17 000	с ТРО

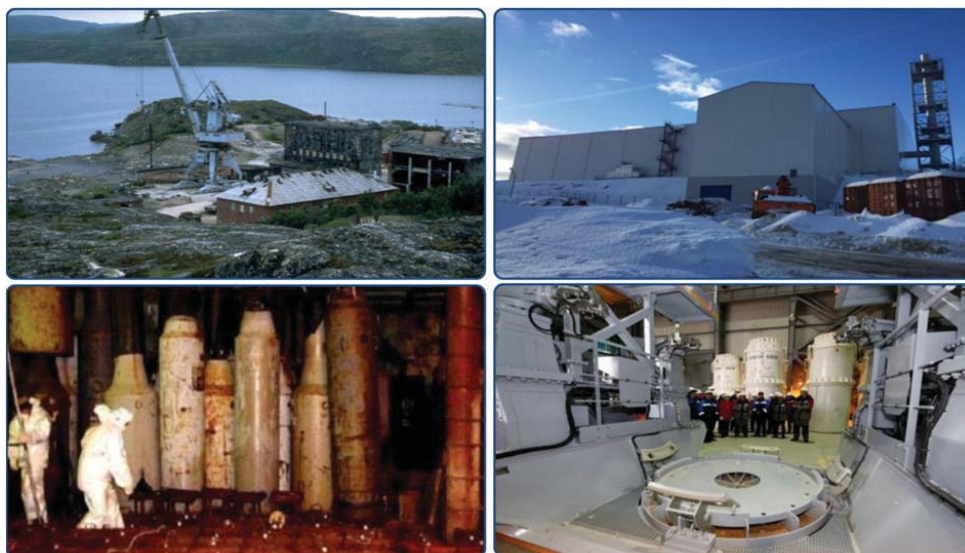


Рис. 7. Комплекс по обращению с ОЯТ в губе Андреева (слева – было, справа – стало)

от ЯРОО. И пока эти пять «не» не будут ликвидированы, над проблемой затопленных ЯРОО, и над будущим новым поколением будет висеть «дамоклов меч».

С середины 1970-х гг. в Советском Союзе для энергообеспечения различных автономных систем (световые и радиомаяки, светящиеся навигацион-

ные знаки), находящиеся в труднодоступных районах морского побережья в отсутствие обычных источников электропитания, начали использовать РИТЭГи – радиоизотопные термоэлектрические генераторы [20] (рис. 10). В них преобразуется тепловая энергия, выделяющаяся при естественном распаде энергоемких радиоактивных изотопов, в

(а)



(б)

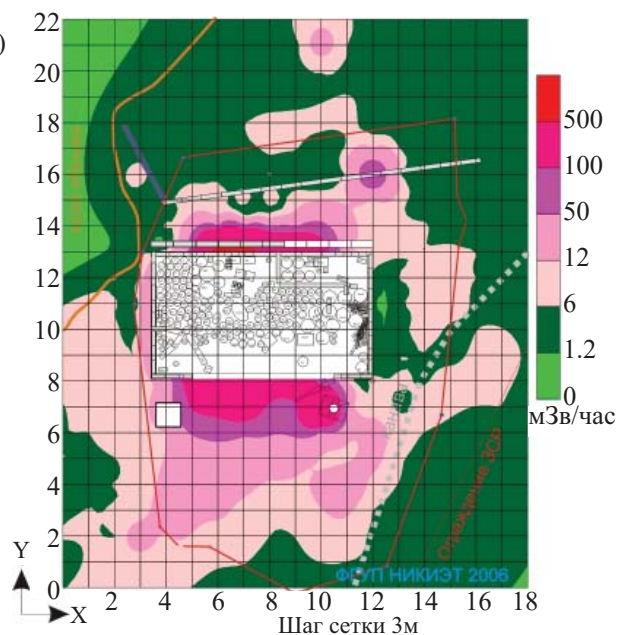


Рис. 8. Радиационная обстановка на загрязненной территории временного пункта хранения ОЯТ береговой базы Гремиха (Кольский п-ов); (а) – Вид на площадку ТРО в Гремихе до начала работ по реабилитации; (б) – Распределение МЭД гамма-излучения в окрестностях площадки ТРО на высоте 0.1м от земли.

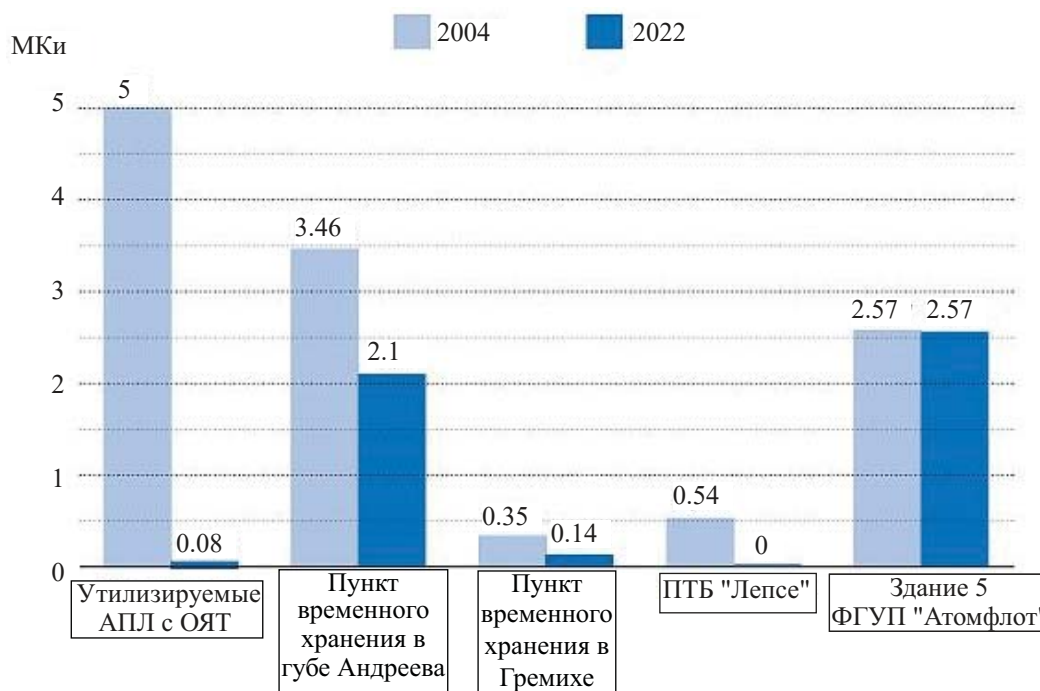


Рис. 9. Изменение активности на радиационно опасных объектах Северо-запада России в процессе реабилитации загрязненной территории (снижение на 60%) с 2004 по 2022 гг.

основном ^{90}Sr , в электрическую с помощью термоэлектрогенератора. Большая часть из них находилась на Крайнем Севере для Северного морского пути. Всего было выпущено свыше 1000 РИТЭГов различных типов с начальной активностью до 465 кКи, тепловой мощностью до 2200 Вт и генерируемой выходной электрической мощностью до 180 Вт. Развал Советского Союза привел к потере контроля над хранением данных генераторов. За 20 лет случилось более 20 инцидентов с выходом радиоактивности в окружающую среду, смертельных случаев со взрослыми и детьми. На сегодня все РИТЭГи выведены из эксплуатации, демонтированы и отправлены на ПО «Маяк» для их переработки, что играет колоссальную роль в снижении риска радиационного действия на здоровье человека и природу [21]. Лишь несколько единиц, находящихся в хорошо охраняемых зонах, продолжают использоваться до выработки ресурса.

Следующим фактором загрязнения Крайнего Севера являются сбросы радиохимических производств зарубежных стран. Как видно на рис. 11, вдоль западного побережья Норвегии в Арктику Гольфстрим переносит атлантические воды, содержащие радиоактивные отходы, сбрасываемые западноевропейскими предприятиями по переработ-

ке отработавшего ядерного топлива в Селлафилде (Великобритания) и на мысе Аг (Франция) [22]. По оценке специалистов, с момента ввода в эксплуатацию (1957 г.) по настоящее время Баренцево море получило до 20% ^{137}Cs и 30% ^{90}Sr от сбросов РАО (до 1 МКи ^{137}Cs и 150 кКи ^{90}Sr) от европейских радиохимических производств. К сказанному следует добавить, что в Северном, Норвежском и Баренцевом морях в ходе добычи нефти и газа нарастает содержание природных радионуклидов в объектах морской среды. Поэтому актуальна работа

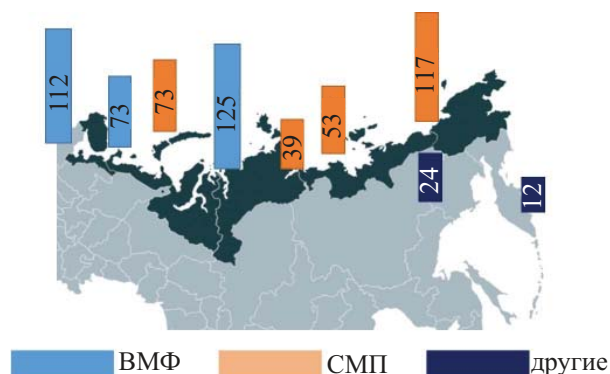


Рис. 10. Ведомственная принадлежность, количество и места дислокации РИТЭГ в Арктике в 1980-х – 2000-х годах"



Рис. 11. Зависимость уровня загрязнений морской воды Баренцева моря ($\text{Бк}/\text{м}^3$) от объемов сбросов радионуклидов – продуктов деления от радиохимического производства Селлафилд (Великобритания, $\text{ПБк}/\text{год}$) за счет их переноса течением Гольфстримом (1950–1995 гг.)

НПО «Тайфун» на тему мониторинга радиоактивного загрязнения морской воды в Баренцевом море, содержания техногенных и природных радионуклидов в пробах биоты (водоросли, рыба, мидии, донные отложения) для радиоэкологического моделирования экосистемы. Современные данные радионуклидного анализа свидетельствуют об отсутствии существенного влияния деятельности радиационно-опасных объектов и других возможных локальных источников на радиоактивное загрязнение объектов морской среды близ Кольского полуострова [23]. Но радиоэкологические проблемы Арктики не заканчиваются на берегах Кольского полуострова. В восточной части АЗРФ силами НПО «Тайфун» была проведена большая работа по определению радионуклидов в дельте Енисея – реки, которая вносит наибольшие объемы растворенных и взвешенных веществ в Ледовитый океан. Так, в 1971 г. С.М. Вакулевским и др. впервые были обнаружены аномально высокие (восьмикратные по сравнению с глобальными загрязнени-

ями) уровни радиоактивности изотопов Cs, Mn, Zn в донных осадках в Енисейском заливе. С 1972 г. начались исследования техногенной радиоактивности на протяжении 2000 км по Енисею от Красноярска до Дудинки, где наибольший уровень найден близ сброса РАО (до $10^6 \text{ Бк}/\text{м}^2$ донных осадков) близ г. Красноярска. Было показано, что основным источником загрязнений была енисейская вода, применяемая для охлаждения трех реакторов, расположенных в горном массиве Горно-химического комбината (рис. 12).

За прошедшее время сибирскими учеными, прежде всего в лабораториях радиоэкологии Института биофизики СО РАН (зав. лабораторией А.Я. Болсуновский) и Сибирского федерального университета (Л.Г. Бондарева), был проведен огромный объем работы по определению и распределению в объектах речной и морской окружающей среды техногенных радионуклидов, выявлению основных зон загрязнения техногенными радионуклидами водных растений, зообентоса, рыб, водных растений, разработке и использованию новых биотестов для оценки влияния малых доз облучения. После закрытия оборонных программ выбросы существенно снизились. Ученые сделали вывод о том, что в настоящее время вклад радиоактивного загрязнения за счет выноса рекой Енисей в Карской море не может быть существенным.

Кроме упомянутых крупных ядерных объектов использования атомной энергии за полярным кругом в Арктической зоне РФ действуют Кольская и Билибинская АЭС.

История строительства Кольской АЭС началась в 1960-е гг., когда бурное развитие промышленности региона требовало дополнительных энергетических ресурсов. Кольский полуостров не имел других источников электроэнергии, кроме гидроресурсов, которые были задействованы уже практически полностью. Соответственно, было принято решение о строительстве первой в Заполярье атомной электростанции. В 1973 г. станция, состоящая из четырех энергоблоков с реакторами ВВЭР-440, дала первый ток. Она была построена по одному проекту с финской АЭС «Ловииса», как считают, самой «чистой» АЭС в Европе. Действительно, ученые Кольского научного центра РАН, проводящие мониторинг окружающей среды, гарантируют безопасное проживание населения близ Кольской

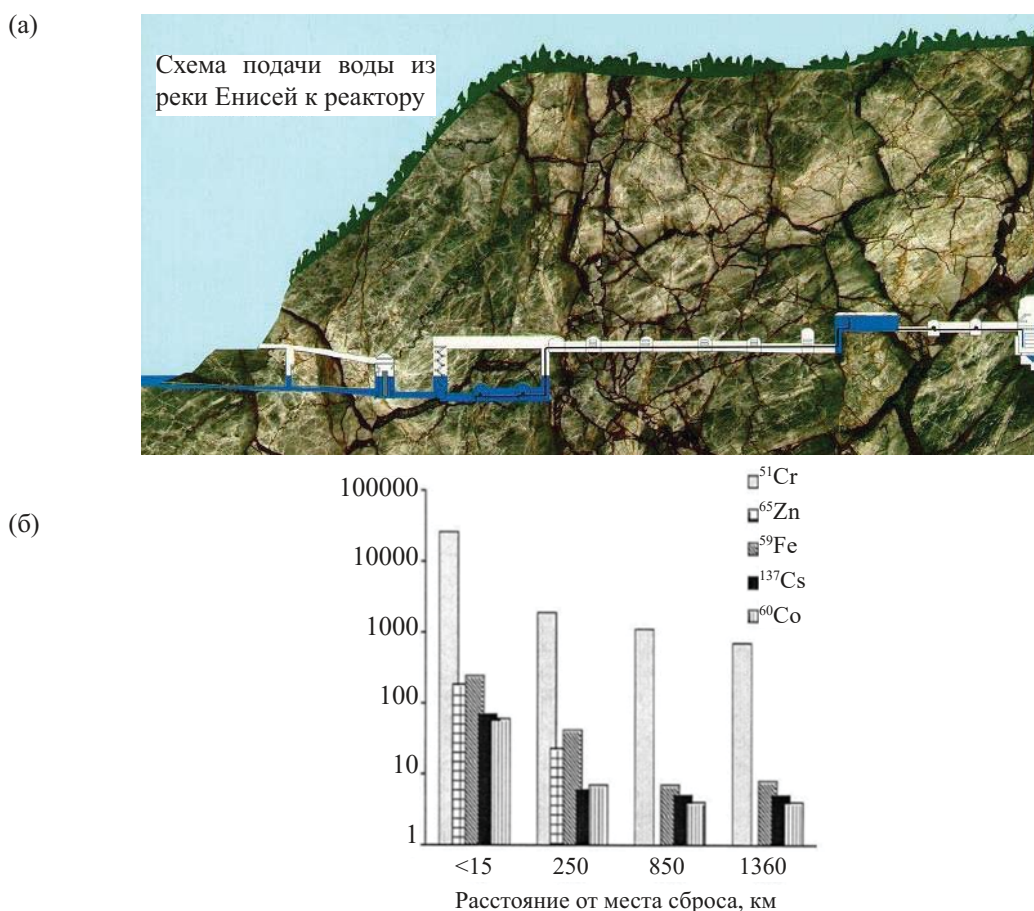


Рис. 12. Загрязнения реки Енисей от деятельности производств ФГУП ФЭО «Горно-химический комбинат»: (а) – схема подачи воды реки Енисей для охлаждения реактора; (б) – определенная НПО «Тайфун» активность различных радионуклидов в речной воде дельты реки Енисей (1970-е–1980-е гг.)

АЭС – его годовые дозы облучения, обусловленные выбросами и сбросами, не превышают минимально значимую дозу (10 мкЗв/год) [24].

Кольская АЭС стала единственной в России атомной станцией, где была реализована программа повторного продления сроков эксплуатации двух энергоблоков. В дальнейшем ГК «Росатом» принял решение о строительстве на Кольском полуострове второй АЭС на новой площадке с двумя блоками ВВЭР-600 с вводом в эксплуатацию в 2034 г.

Билибинская АЭС состоит из четырех однотипных энергоблоков суммарной электрической мощностью 48 МВт с водно-графитовыми гетерогенными реакторами канального типа ЭГП-6. Станцию построили после открытия месторождения россыпного золота и создания Билибинского ГОК. Ее уникальность состоит в строительстве АЭС на вечной мерзлоте и конструкционно – в монтаже «под од-

ной крышей» всех четырех блоков с организацией непрерывной работы в помещениях с комнатной температурой. Несмотря на то, что эксплуатация Билибинской АЭС существенно дороже эксплуатации других атомных электростанций, она оставалась самым надежным и эффективным источником энергии в регионе. В 2019 г. к Билибинской энергосистеме подключили плавучую атомную ТЭС «Академик Ломоносов» [25], и нагрузки мощности Билибинской АЭС снизили на 75%. Возник вопрос о выводе ее из эксплуатации. По мнению специалистов, стоимость ее вывода будет стоить столько же, сколько и сама электростанция – до 8–9 млрд руб., однако вариантов нет – необходимо локализовать и переработать до 8000 накопленных отработавших ТВС.

На сегодня решаются задачи создания необходимой инфраструктуры, разработки проекта вывода



Рис. 13. Места проведения мирных ядерных взрывов на территории СССР (источник <https://dnpmag.com/2019/06/28/karta-yadernyx-vzryvov-v-sssr-dokument-kotoryj-by-l-zasekrechen/>)

из эксплуатации, оснащения площадки оборудованием и подготовки к вывозу ОЯТ. Разработана технология разделки и пенилирования ОТВС для транспортировки на переработку на ПО «Маяк». Оценено воздействие на окружающую среду, проведены необходимые процедуры общественных слушаний. Вопрос о том, каким именно образом ОЯТ будет доставлено на переработку, оставался открытым. Есть варианты вывоза ОЯТ воздушным транспортом (для этого необходимо сооружение бетонной дороги до аэропорта и новой взлетной полосы) или морским путем (необходима прокладка длинной дороги до порта с сооружением мостов под тяжелую технику). Пока первый вариант предпочтителен. Вывод планируют осуществить до 2035 г.

В финале обзора мы остановимся на истории проведения за полярным кругом ядерных взрывов мирного назначения (МЯВ). Известно, что за двадцать лет в период с 1968 по 1988 гг. в Советском Союзе было выполнено около 120 таких взрывов (рис. 13) [26]. Цели и задачи варьировались: от сейсмического зондирования земной коры, интенсификации добычи и создания подземных емкостей для хранения углеводородов и даже до переворота сибирских рек на юг. К сожалению, несколько МЯВ сопровождалось недопустимыми выходами радиоактивности на поверхность, два из которых – на Крайнем Севере (взрыв «Кратон-3» и «Днепр-1»).

МЯВ «Кратон-3» мощностью 22 кт осуществили на глубине 577 м по заказу Министерства геологии СССР с целью глубинного изучения земной коры методом «сейсмического зондирования» 24 августа 1978 г. К сожалению, при организации взрыва были допущены нарушения: грунт имел трещины, вкрапления льда и горных пород разной степени водопроницаемости. Ядерное устройство было заложено с грубыми нарушениями проекта с изменением координат на 50 км, т.е. с неизученными геологическими, тектоническими, мерзлотными и гидрогеологическими условиями. За 3 ч до взрыва синоптики предупредили о сильном ветре, а дождь во время взрыва вызвал осаждение радионуклидов из облака и обусловил заражение местности, где на корню погиб лиственный лес на 100 га. Местные жители говорят, что исполнители после аварии покинули объект, не предупредив население, которое узнало об аварии лишь спустя 12 лет. Экспедиция 1993 г. обнаружило превышение содержания в почве $^{239,240}\text{Pu}$ в 1590 раз (в 2.5 раза выше, чем в 30-километровой зоне ЧАЭС и в 20 раз больше, чем в почве Нагасаки), а содержание ^{90}Sr в эпицентре составило 40 кБк/кг. Через 10 лет начались реабилитационные мероприятия. Однако анализы, проведенные в испытательной лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии (Якутск) и лаборатории кафедры радиохимии МГУ (Москва), отметили факт миграции радионуклидов. Министерство ох-



Рис. 14. Мирные ядерные взрывы (МЯВ) «Днепр-1» (04.09.1972) и «Днепр-2» (27.08.1984) в Хибинах: (а) – Принцип использования МЯВ как метод дробления апатитовой руды; (б) – замурованная горная шахта от МЯВ «Днепр-2» (фото А. Ма-
раховец, <https://www.drive2.ru/c/573015433691529288/>)

раны природы Республики Якутия (Саха) указывает, что радиационная обстановка на объекте не требует дополнительного вмешательства, однако на данном объекте необходим периодический контроль для своевременного выявления возможного загрязнения окружающей среды.

Цель проведения первого МЯВ «Днепр-1» (4 сентября 1972 г.) на апатитовом месторождении Куэльпорр, расположенном в 21 км от г. Кировска (Кольский п-ов) в 150 км от финской границы состояла в разработке методов подземного дробления и извлечения руды, как видно на рис. 14. Ядерное устройство мощностью 2.1 кт было размещено под месторождением руды. Радиоактивные продукты МЯВ должны были отводиться в пустые породы на расстоянии 120 м от эпицентра. Взрывом «Днепр-1» был раздроблен блок породы размером 50 × 50 × 50 м и было добыто до 400 тыс. тонн руды. Было установлено, что эффективность дробления руды ядерном взрывом малой мощности намного выше, чем химическими взрывчатыми веществами. При этом расход взрывчатого вещества был на порядки ниже: 12–13 г/т руды против 800–1000 г/т при использовании обычных методов.

Увы, ударная волна при МЯВ «Днепр-1» не только произвела около кубометры битой руды, но и выбросила радиоактивные продукты из полости взрыва в окружающую среду. Выход на поверхность радиоактивных газов начался через 20 с после взрыва; на третьей минуте мощность дозы гамма-излучения вблизи источника достигла максимального значения в 8 МГр/чс, после чего начала

снижаться. Через 70 ч после МЯВ мощности доз достигли фоновых значений, и выход на поверхность радиоактивных газов криптона и ксенона прекратился. Истечение продуктов деления через трещины в горе привело к образованию радиоактивной струи, которая обогнула гору Куэльпорр и разделилась на две части. По пути следования происходило радиоактивное загрязнение местности, представленное короткоживущими радионуклидами, и через несколько дней загрязнение уже не фиксировалось. В результате работники, участвующие в эксперименте, могли получить до 10% годовых фоновых доз. Уточнить объем выброса удалось при вскрытии камеры захоронения на объекте «Днепр-1», что было сделано через 3.5 года после осуществления МЯВ. Было показано, что объем камеры увеличился, стенки были покрыты застывшими потоками расплавленной породы. Радиохимические исследования образцов показали, что в камеру захоронения ушло лишь 85% продуктов деления и взрывчатого вещества [27].

В ходе реабилитации вход в штольню засыпали горной породой, но главной экологической проблемой стало нарушение поверхности горы Куэльпорр и образование глубоких разломов и трещин. Дождевые и талые воды, прошедшие через зону радиоактивного загрязнения, через штольню уходили в русло протекающей реки. По данным обследования НИИ радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева, который проводил исследования в 2008, 2013 и 2019 гг., объемная активность трития в рудничной воде на выходе из нижней штольни десятикратно

превышала уровень вмешательства до 7700 Бк/кг. Была создана дренажно-разбавительная система, которая снижает содержание трития при поступлении в р. Кунийок примерно в 4000 раз. Главное, что за почти 50-летний период наблюдения в окрестностях горы Куэльпорр не было зафиксировано случаев превышения допустимой концентрации в рудничной воде стронция-90 и цезия-137. Их содержание тысячекратно меньше допустимой, поэтому в настоящий момент вода, изливающаяся из горы Куэльпорр, пригодна для питья без каких-либо ограничений. В оз. Имандра концентрация стронция-90, цезия-137 и трития соответствует уровням глобального фона.

В завершение следует сказать, что Крайний Север – район формирования глобальных атмосферных процессов, определяющих климат на планете, источник стока многих химических соединений, регулятор содержания кислорода и метана. Северные леса выполняют важную климатическую и водорегулирующую, защитную функцию в биосфере. Русская Арктика – это огромные площади с неразрушенной природной средой, ценность которых адекватно растет с угрозой возможной глобальной экологической катастрофы. Экологическая роль Севера – это биосферное сохранение России и земного шара в целом.

И, поскольку значение Арктики во всех отношениях возрастает, и Российская академия наук это прекрасно понимает, исследования в области экологии Крайнего Севера, направленные на сохранение и умножение его достоинств и богатств, будут продолжены, а проблемы радиоэкологии Арктической зоны – решены, принеся тем самым пользу не только населению и природе Арктики, но и всей планете.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-19-00615.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 13.07.2020 г. № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации». <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202007130047>
2. *Конторович А.Э., Эпов М.И., Буриштейн Л.М.* и др. // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 7–17.
3. Inventory of Radioactive Material Entering the Marine Environment: Sea Disposal of Low Level Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-588. Vienna: IAEA, 1991. P. 4.
4. *Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б.* // Атом. энергия. 1985. Т. 58, Вып. 6. С. 445–449.
5. Ядерные испытания СССР / Под ред. В.Н. Михайлова. Саров: ВНИИЭФ, 1997. Т. 1.
6. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1998 г. СПб.: Гидрометиздат, 2000.
7. *Омельчук В.В.* // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 47. С. 51–66. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-51-66>
8. NRPA Bull. <https://www2.dsa.no/filer/16cd121a98.pdf>
9. 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; создана распоряжением Президента РФ от 24.10.1992 г. за № 613-рп). М.: Администрация Президента РФ, 1993.
10. Временные санитарные требования к сбросу радиоактивных отходов с объектов ВМФ (ВСТ-60). М.: ВМФ, 1960.
11. *Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П., Высоцкий В.Л., Губин А.Т., Данилян В.А., Кобзев В.И., Крышев И.И., Лавковский С.А., Мазокин В.А., Никитин А.И., Петров О.И., Пологих Б.Г., Скорик Ю.И.* Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). М.: ИздАТ, 2005. с. 3.
12. Концепция комплексной утилизации атомных подводных лодок и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками. М.: Минатом России, 2001.
13. Проблемы вывода из эксплуатации и утилизации атомных подводных лодок / Под ред. А.А. Саркисова. М.: ИБРАЭ РАН, 1999.

14. Антипов С.В., Королева Н.С. // Атом. энергия. 2004. Т. 97. Вып. 5. С. 387–395.
15. Стратегический мастер-план утилизации и экологической реабилитации выведенных из эксплуатации объектов флота на Северо-Западе России: Итоговый отчет по 1-й фазе. М.: РНЦ КИ, ИБРАЭ РАН, НИКИ-ЭТ, 2003.
16. Саркисов А.А., Большов Л.А., Антипов С.В., Арутюнян Р.В., Ахунов В.Д., Билашенко В.П., Богатов С.А., Васильев А.П., Высоцкий В.Л., Захарчев А.А., Ильющенко Г.Э., Калинин Р.И., Кобринский М.Н., Кухаркин Н.Е., Никитин В.С., Пименов А.О., Пучков В.Н., Степеннов Б.С., Шведов П.А., Шишкин В.А.. Стратегические подходы к решению экологических проблем, связанных с выведенными из эксплуатации объектами атомного флота на Северо-Западе России / Под ред. А.А. Саркисова. М.: Наука, 2010.
17. <https://strana-rosatom.ru/2022/06/24/ochishheniesleduet-rosatom-prodolzhi/>
18. Саркисов А.А., Антипов С.В., Билашенко В.П., Высоцкий В.Л., Казеннов А.Ю., Кикнадзе О.Е., Кобринский М.Н., Королев А.В., Сотников В.А., Степеннов Б.С., Шведов П.А. // Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 2. С. 16–29.
19. Антипов С.В., Билашенко В.П., Высоцкий В.Л., Калантаров В.Е., Кобринский М.Н., Саркисов А.А. Сотников В.А., Шведов П.А. // Атом. энергия. 2015. Т. 119, Вып. 4. С. 222–229.
20. Григорьев А.С., Сажнев М.А., Щербина Н.Т. // Вопр. утилизации АПЛ. 2006. № 3. С. 46–55.
23. <https://bellona.ru/2003/11/17/ritegi/>
24. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. // Атом. энергия. 1985. Т. 58, Вып. 6. С. 445–449.
25. Усягина И.С. Распределение и пути миграции искусственных радионуклидов в экосистеме Баренцева моря. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2012.
26. Современное состояние экологических систем в районе Кольской АЭС (Мурманская область) / Под ред. В.А. Маслбоева, Е.А. Боровичева, Н.Е. Королевой. Апатиты: КНЦ РАН, 2020. 312 с.
27. Саркисов А.А., Смоленцев Д.О., Антипов С.В. // Арктика: экология и экономика. 2022. №3 (12). С. 349–358.
28. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Под рук. В.А. Логачева. М.: Издат, 2001.
29. Гуцин В.В. Подземная разработка апатитовых месторождений: от минных до ядерных взрывов. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. 196 с.