

НАУКА
И ОБЩЕСТВО

К ВОПРОСУ О ЛИКВИДАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

© 2019 г. А.А. Саркисов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

E-mail: sarkisov@ibrae.ac.ru

Поступила в редакцию 21.06.2018 г.

Поступила после доработки 20.09.2018 г.

Принята к публикации 24.10.2018 г.

В статье рассмотрены наиболее значимые источники масштабных радиоактивных загрязнений, которым подвергалась Арктика начиная с середины прошлого столетия: радиоактивные выпадения при испытаниях ядерного оружия, сливы отходов радиохимических комбинатов Селлафилд (Великобритания) и Кап де ля Аг (Франция), выносы активности северными реками России, эксплуатация атомного флота, радиоизотопные термоэлектрические генераторы, затопленные и затонувшие радиоактивные объекты. Оценивается их сравнительный вклад и сопутствующие радиоэкологические риски. Особое внимание сосредоточено на анализе проблем "ядерного наследия" атомного флота СССР/России и поиске путей их решения. Описывается содержание и итоги реализации разработанного в рамках широкого международного сотрудничества "Стратегического мастер-плана утилизации выведенного из эксплуатации атомного флота и радиоэкологической реабилитации обслуживающей его инфраструктуры". Обращается внимание на остающиеся нерешёнными в Арктике экологические проблемы, связанные с затопленными и затонувшими объектами, в которых содержатся отработавшее ядерное топливо и радиоактивные отходы. Приводятся обобщённые данные по таким объектам и риски радиоэкологического загрязнения акваторий, оценённые на основе модельных исследований последствий возможных аварий. Статья подготовлена на основе научного сообщения на заседании президиума РАН 29.01.2016 г.

Ключевые слова: Арктика, атомная подводная лодка, ядерный реактор, активная зона, неконтролируемая самоподдерживающаяся цепная реакция, радиоактивные вещества, техногенные радионуклиды, ядерные испытания, глобальные выпадения, загрязнение, окружающая среда.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873892107-124>

Арктика – северная полярная область земного шара, охватывающая Северный Ледовитый океан с островами (кроме востока и юга Норвежского моря), прилегающие части Атлантического и Тихого океанов и северные окраины материков Евразии и Северной Америки (без полуострова Лабрадор). В качестве южной границы Арктичес-

кой зоны иногда принимают Северный полярный круг, в других случаях – среднюю изотерму июля 10°C. Последнего определения мы придерживаемся в контексте данной статьи.

Полярные владения СССР/России включают в себя все земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане к северу от побережья России до Северного полюса в пределах между меридианами 35°55'25" и 168°58'49,4" восточной долготы, за исключением архипелага Шпицберген и о. Медвежий. Сухопутные территории России, входящие в состав Арктической зоны РФ, установлены указами Президента РФ № 296 от 02.05.2014 г. и № 287 от 27.06.2017 г. Они включают в себя всю Мурманскую область и ряд других регионов.

Значение Арктики определяется несколькими факторами. Прежде всего Арктика играет уникальную роль в формировании климатических



САРКИСОВ Ашот Аракелович
академик РАН, советник РАН.

и гидрологических процессов в Мировом океане, являясь "кухней погоды" Северного полушария Земли. Важно и то, что Арктическая зона богата разведанными и прогнозируемыми запасами минерального сырья, особенно углеводородов. Из-за отсутствия достаточно полных и достоверных данных разведки приводимые в литературе оценки запасов углеводородов на арктическом шельфе крайне противоречивы. В этих условиях наиболее предпочтительна вероятностная оценка ресурсов. По оценкам группы исследователей СО РАН [1], начальные извлекаемые запасы нефти составляют от 31,8 до 92,0 млрд т, попутного газа – 1560–4655 млрд м³, конденсата – 314–783 млн т, а геологические запасы свободного газа – 55,2–154,4 трлн м³. При этом почти весь арктический газ находится вблизи берегов России на глубине до 500 м. Вероятностная оценка общих начальных ресурсов углеводородов в Северном Ледовитом океане не превышает 252 млрд т в нефтяном эквиваленте (для сравнения: общие начальные ресурсы углеводородов в Атлантическом океане не превышают 70 млрд т, в Индийском – 65 млрд т, в Тихом – 25 млрд т). Отметим также, что в Арктической зоне России добывается 100% её алмазов, сурьмы, апатита, редких и редкоземельных металлов, 98% платиноидов, 90% никеля и кобальта, 60% меди. Значение Арктики определяется и тем, что в условиях глобального потепления возрастает привлекательность интенсивного использования Северного морского пути как оптимальной транспортной коммуникации для внутренних и международных перевозок. Наконец, для России Арктическая зона имеет большое оборонно-стратегическое значение: на неё приходится более 30% государственной границы и более половины морской границы страны.

Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2020 г. утверждена Президентом РФ в 2013 г. Для реализации Стратегии

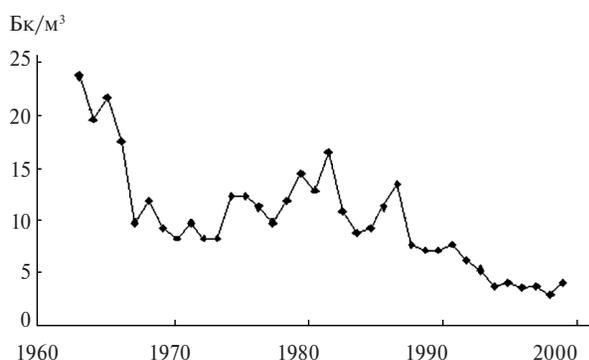


Рис. 1. Среднегодовая концентрация ⁹⁰Sr в поверхностных водах Баренцева моря на меридиане Кольского залива

была принята Государственная программа "Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года" (далее – Программа), позднее продлённая до 2025 г. В рамках Программы обеспечение экологической безопасности (а радиоэкологическая безопасность – важнейший её элемент) включено в перечень приоритетов.

Научно обоснованный подход к обеспечению радиоэкологической безопасности требует:

- тщательного анализа текущей радиоэкологической ситуации;
- идентификации и оценки существующих радиоэкологических угроз;
- разработки планов и программ мероприятий по ликвидации существующих угроз и предотвращению их возникновения в ходе будущей хозяйственной деятельности.

Этот круг вопросов и будет рассмотрен далее.

РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ АРКТИКИ

Практически с самого начала атомной эры Арктика подвергается беспрецедентным по масштабам радиоактивным загрязнениям. Различные их источники целесообразно разделить на две группы: реальные, то есть существующие или существовавшие ранее, вызывающие загрязнения фактического уровня, и потенциальные, создающие риски загрязнения в случае нарушения целостно-

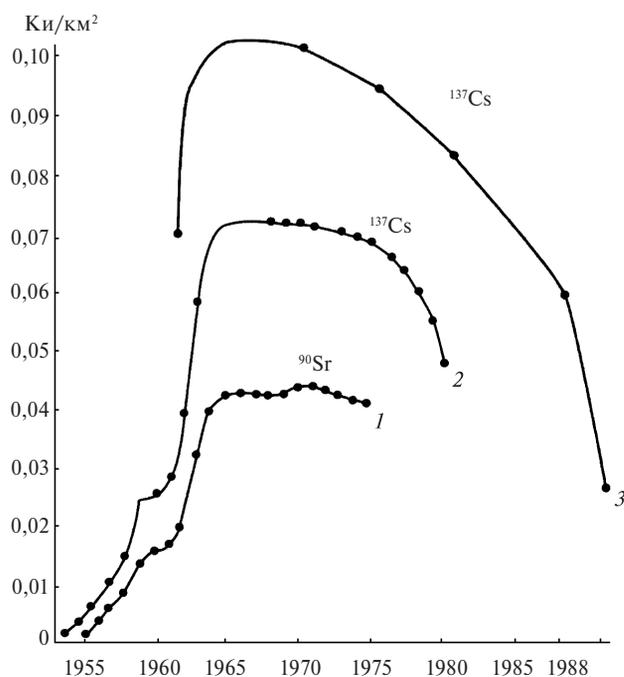


Рис. 2. Средняя плотность загрязнения почвы техногенными радионуклидами в различные годы на территории СССР/России (1, 2) и на архипелаге Новая Земля (3)

сти их защитных барьеров. Каковы же важнейшие источники существующего загрязнения и каков их вклад в текущую радиоэкологическую обстановку в Арктике?

Ядерные испытания и глобальные выпадения. В результате проведённых в 1949–1962 гг. атмосферных (в воздухе, на воде и под водой, а также в космосе) ядерных испытаний в атмосферу Земли поступило большое количество радионуклидов. В дальнейшем они выпадали с осадками на поверхность суши и водную поверхность, формируя техногенно изменённый радиационный фон. В СССР с 1949 по 1990 г. было проведено 715 ядерных испытаний, в том числе 219 атмосферных. Для сравнения: США с 1945 по 1992 г. провели 1056 ядерных испытаний (включая бомбардировки Хиросимы и Нагасаки), в том числе 217 атмосферных [2].

В Арктической зоне России заметный вклад в радиоактивное загрязнение Баренцева и Карского морей внесли атмосферные ядерные испытания на Новой Земле в 1955–1962 гг. Всего на этом полигоне было проведено 130 испытаний, в том числе 91 атмосферное (85 воздушных, 1 наземное, 2 надводных и 3 подводных). Их общая мощность составила около 90% мощности всех атмосферных взрывов, произведённых в СССР. В результате в 1962–1963 гг. содержание ^{90}Sr в поверхностных водах Баренцева моря достигло максимальных за всё время наблюдений значений – свыше 20 Бк/м³ [3–7] (рис. 1). После запрета

в 1963 г. на проведение ядерных испытаний в трёх средах концентрация ^{90}Sr в морской воде стала постепенно уменьшаться и в 1970 г. опустилась до значений 7–9 Бк/м³.

Похожая картина наблюдается и в отношении плотности загрязнения почвы ^{90}Sr и ^{137}Cs (рис. 2) [8] и поверхностного слоя донных отложений (рис. 3) [9–11]. Как видно из рисунка 3, исключение составляет Чёрная губа на южной оконечности Новой Земли со стороны Баренцева моря, где концентрация ^{137}Cs в донных отложениях местами превышает 200 Бк/кг, а $^{139,140}\text{Pu}$ – 7000 Бк/кг [12]. Это связано с проведёнными в этом месте надводными и подводными ядерными испытаниями.

В Мурманской и Архангельской областях в 1986 г. наблюдались заметные выпадения на поверхность суши и прилегающих участков акваторий в результате Чернобыльской аварии. Общее поступление чернобыльского ^{137}Cs на акватории арктических морей России было оценено в ~1,1 ПБк [13], что составляет около 1,5% вклада глобальных выпадений за всё время наблюдений.

Не считая локального загрязнения в Чёрной губе, в целом в настоящее время остаточное загрязнение сопоставимо (а в отдельных районах выше лишь в 2–3 раза) с уровнем, предшествовавшим испытаниям ядерного оружия (до 1955 г.).

Сливы жидких радиоактивных отходов. В течение ряда лет европейские радиохимические предприятия Великобритании (Селлафилд на побережье Ирландского моря) и Франции (Кап де ла Аг

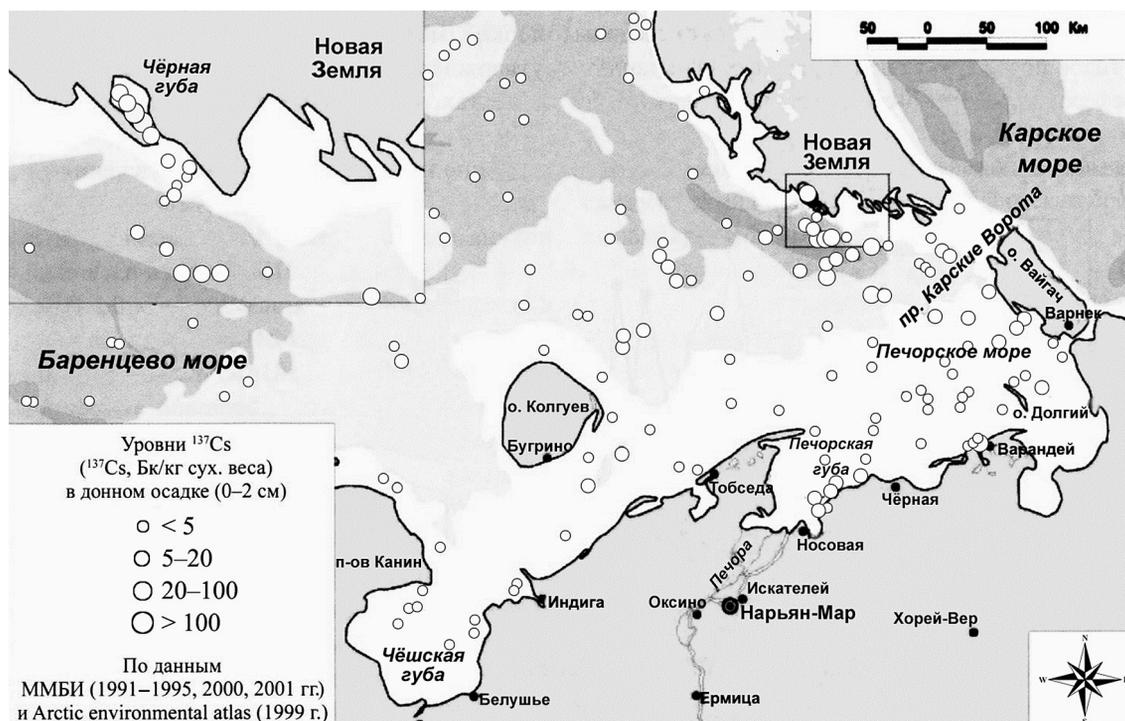


Рис. 3. Содержание ^{137}Cs в поверхностном (0–2 см) слое донных отложений Баренцева моря в 1991–2001 гг.



Рис. 4. Сброс радионуклидов с РХЗ Селлафилд и уровень загрязнения воды ^{137}Cs в Баренцевом море

на полуострове Котантен) производили слив жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в морскую среду. За счёт переноса радионуклидов морскими течениями радиоактивное загрязнение проникло в бассейн Северного Ледовитого океана.

На рисунке 1 отражено повышение концентрации ^{90}Sr в водах Баренцева моря в 1970-х годах. В 1972 г. наблюдениями западногерманского Гидрографического института были выявлены относительно высокие концентрации ^{134}Cs ($0,3\text{--}0,6\text{ Бк/м}^3$) в водах юго-западной части Баренцева моря. Этот факт объяснили поступлением радионуклидов с водами Норвежского течения, загрязнённого радиоактивными отходами с заводов по переработке отработавшего ядерного топлива. В 1978 г. экспедиция НПО "Тайфун" также обнаружила в водах юго-западной части Баренцева моря ^{134}Cs в концентрации $0,4\text{--}0,6\text{ Бк/м}^3$, источником появления которого являлись ЖРО, сбрасываемые в море

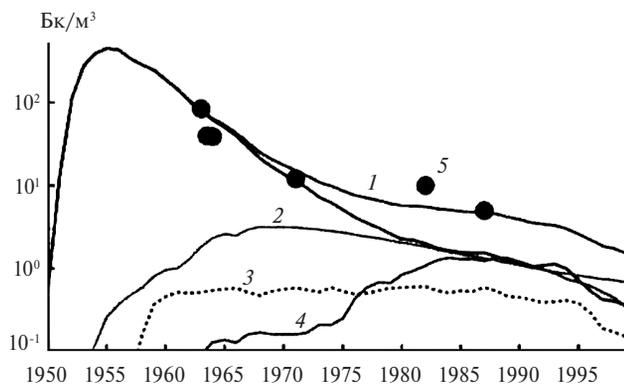


Рис. 5. Концентрация ^{90}Sr в морской воде в открытых районах Карского моря с оценками вклада основных источников

1 – атмосфера, 2 – реки, 3 – Селлафилд, 4 – река Енисей [18], 5 – натурные данные (обозначены кружками) [19]

с Селлафилда. Измерение соотношения концентраций $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ позволило оценить длительность переноса радионуклидов с Селлафилда в Баренцево море примерно в 6 лет. Эта оценка соответствует сравнительной картине динамики ежегодного сброса отходов с Селлафилда и изменению концентрации ^{137}Cs в Баренцевом море (рис. 4).

В 1982 г. было проведено обследование радиоактивности Гренландского, Норвежского, Баренцева и Карского морей, которое подтвердило, что на радиационную обстановку в западных арктических морях стало заметно влиять поступление радиоактивных отходов Селлафилда [14]. По оценкам [3], 60–80% содержания ^{137}Cs в водах юго-западной части Баренцева моря обуславливалось переносом загрязнения с Селлафилда. С 1957 г. по наше время этот завод сбросил в Ирландское море более 37 ПБк ^{137}Cs и более 5,5 ПБк ^{90}Sr , в результате в 1980-х годах концентрация ^{137}Cs в воде южной части Баренцева моря достигала в отдельных местах $20\text{--}40\text{ Бк/м}^3$, что почти в 10 раз выше фона, обусловленного глобальными выпадениями.

Поступление радионуклидов с предприятия Кап де ла Аг значительно меньше по общей активности – около 1% от вклада Селлафилда. Однако измерения концентрации ^{129}I в Баренцевом и Карском морях показали, что основным источником этого радионуклида в Северной Атлантике и Арктике является слив ЖРО с заводов в Селлафилде и Кап де ла Аг, причём с 1966 по 1994 г. поступление ^{129}I из Кап де ла Аг почти вдвое превышало его поступление из Селлафилда [15].

Сливы ЖРО в арктические моря в период 1960–1990 гг. проводились и судами атомного флота СССР. По оценкам [16], среднегодовое поступление ЖРО от этих сливов составляло $\sim 10\text{ ТБк/год}$, в то время как среднегодовые сливы от Селлафилда в тот же период достигали $2,4\text{ ПБк/год}$.

Выносы активности северными реками России. Одним из источников загрязнения вод арктических морей оказываются выносы впадающих в эти моря северных рек России, вблизи берегов которых расположены предприятия радиохимического профиля. Так, содержание ^{90}Sr в Оби в 1961–1990 гг. оценивалось в $\sim 0,6\text{ ПБк}$, причём до 75% этого вклада было обусловлено смывом в реку осадков со всего водосборного бассейна площадью $3 \cdot 10^6\text{ км}^2$ [17]. По другим оценкам, за период 1961–1989 гг. в Карское море из Оби и Енисея поступило около 1 ПБк ^{90}Sr [18].

Наблюдательные данные и оценки вкладов различных рассмотренных источников в загрязнение Карского моря ^{90}Sr показаны на рисунке 5. Видно, что вынос активности северными реками за всё время наблюдений находился на уровне фоновых значений и оставался значительно меньше вклада глобальных выпадений.

Эксплуатация атомного флота СССР/России. Многолетняя эксплуатация атомного флота привела к появлению заметных локальных загрязнений участков суши и прилегающих к ним участков акваторий арктических морей. Локальные загрязнения появлялись в местах базирования, отстоя, ремонта и обслуживания на береговых технических базах (БТБ), а также утилизации кораблей с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) на судоремонтных предприятиях. В результате таких загрязнений появились участки побережья и акваторий, где концентрация ^{60}Co превышала уровень фона в 30–70 раз, а ^{137}Cs – в сотни и тысячи раз.

Как следствие неудовлетворительных условий хранения радиационно опасных конструкций и материалов на территориях береговых технических баз в губе Андреева и посёлке Гремиха появились сильно загрязнённые участки почвы, где мощность дозы γ -излучения достигала 1–10 мЗв/ч, что на 3–4 порядка выше предельно допустимой мощности дозы непрерывного облучения (0,5 мкЗв/ч). Концентрация техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr была в тысячи раз выше ПДК. Кроме того, местами плотность поверхностного загрязнения β -радионуклидами достигала

105 расп/(мин·см²), что в тысячи раз выше предельно допустимого уровня. Смыв радионуклидов с поверхности за счёт осадков приводил также к загрязнению прилегающих участков акватории. На рисунке 6 показаны уровни загрязнения территории и прилегающей акватории береговой технической базы в губе Андреева [20].

"ЯДЕРНОЕ НАСЛЕДИЕ" АТОМНОГО ФЛОТА СССР

Рассмотрим теперь потенциальные источники радиоактивного загрязнения Арктики. К ним относятся радиационно опасные объекты, из которых выход активности в окружающую среду пока отсутствует, но в случае повреждения их защитных барьеров они станут реальными источниками радиоактивного загрязнения.

В период гонки вооружений в СССР был создан самый многочисленный атомный флот в мире. По количеству кораблей и судов с ядерными энергетическими установками СССР превосходил все остальные страны вместе взятые. Основу военного атомного флота составляли атомные подводные лодки (АПЛ). В 1970-х годах их строительство и ввод в состав ВМФ производились очень вы-

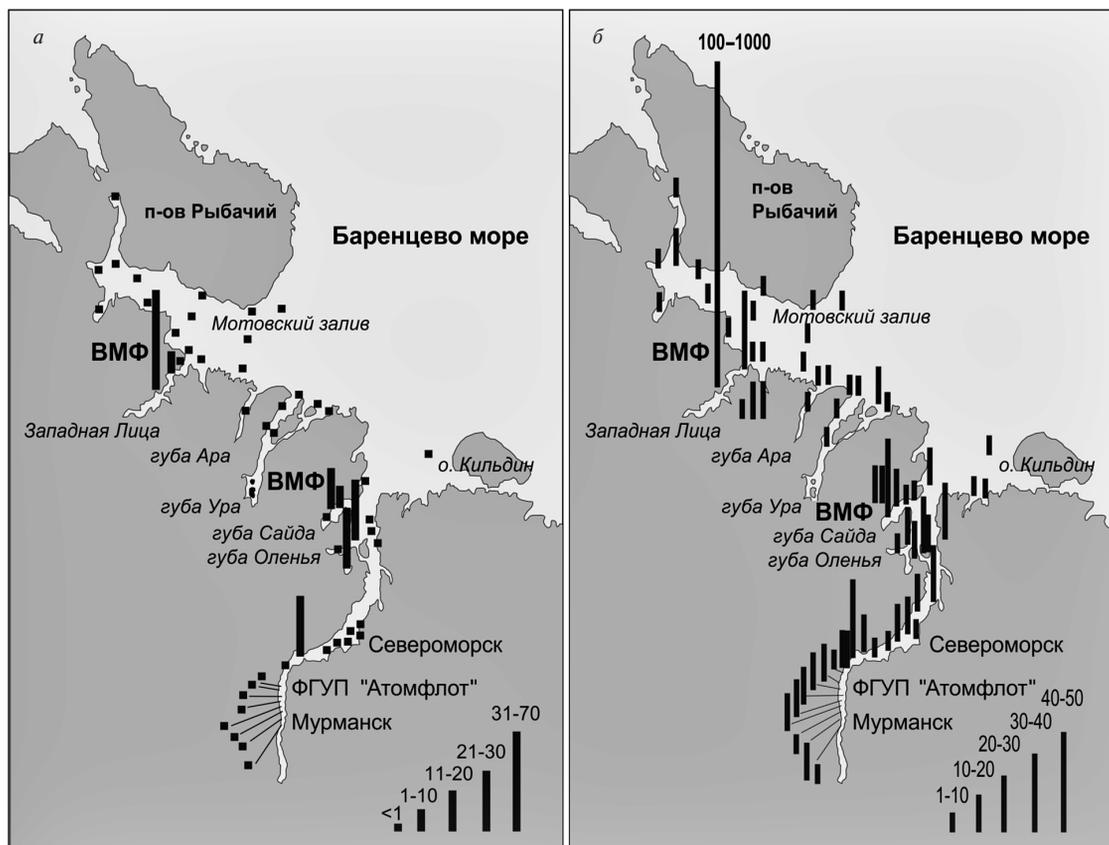


Рис. 6. Содержание ^{60}Co (а) и ^{137}Cs (б) в донных отложениях Кольского и Мотовского заливов и на прилегающих к ним территориях, Бк/кг сухого веса

сокими темпами – до 12 в год. Поэтому и вывод АПЛ из боевого состава флота, обусловленный истощением их технического ресурса, в конце 1980-х – начале 1990-х годов стал лавинообразным. Ситуация ещё более усугублялась необходимостью выполнения обязательств по соглашению о сокращении стратегических наступательных вооружений. В пиковом 1990 г. на утилизацию было передано 29 кораблей.

Существовавшая промышленная инфраструктура оказалась неподготовленной к массовой утилизации атомного флота. В начале 1990-х годов экономика страны переживала глубокий кризис, и бюджетное финансирование этих работ было явно недостаточным. К тому же отсутствовали научно обоснованные концепция и стратегия утилизации АПЛ, что не позволяло эффек-

тивно использовать даже небольшие выделяемые ресурсы.

За период 1985–1998 гг. из состава Северного и Тихоокеанского флотов было выведено 177 АПЛ, но только из 52 выгрузили отработавшее ядерное топливо (ОЯТ). К концу 1998 г. в пунктах отстоя в Мурманской и Архангельской областях на плаву хранилось 76 АПЛ и многоотсечных блоков с ОЯТ в реакторах (рис. 7). Это создавало серьёзную угрозу обширного загрязнения акваторий арктических морей при возникновении аварийных ситуаций на ядерно- и радиационно опасных объектах, поскольку подлежащие утилизации АПЛ, многоотсечные блоки и суда технического обслуживания, а также объекты инфраструктуры (береговые технические базы, судостроительные и судоремонтные предприятия) в Арктическом

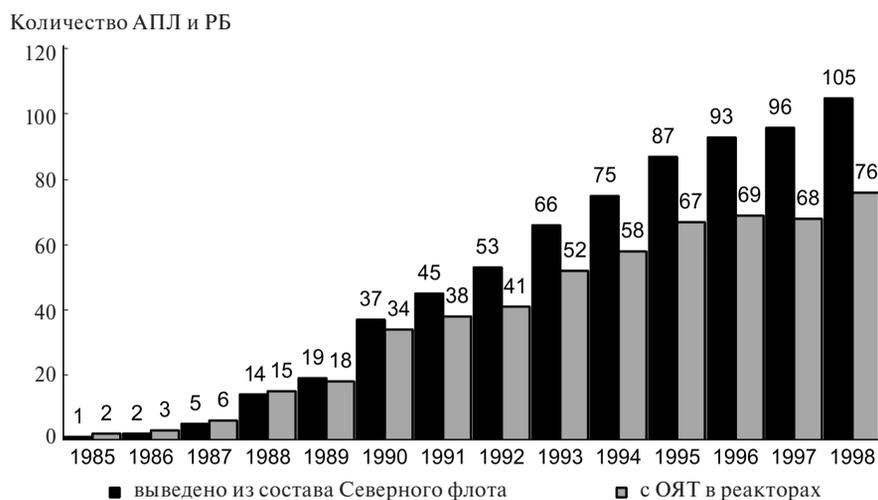


Рис. 7. Накопление хранящихся на плаву в Арктическом регионе АПЛ и многоотсечных реакторных блоков с ОЯТ в реакторах

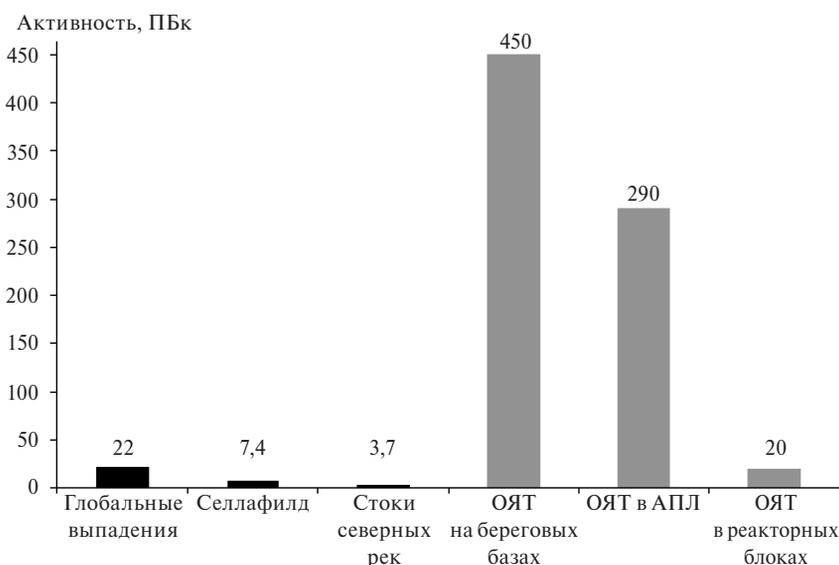


Рис. 8. Реальные и потенциальные источники радиоактивного загрязнения северо-западной части Арктического региона

регионе локализованы на севере Кольского полуострова — в районе г. Мурманска и в посёлке Гремиха, а также в г. Северодвинске Архангельской области. Совокупность этих ядерно- и радиационно опасных объектов известна в литературе как "ядерное наследие" холодной войны.

Радиационный потенциал отработавшего топлива, накопленного в реакторах 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 (рис. 8). Уровень возникших угроз и их нарастание вызывали озабоченность как российских, так и зарубежных учёных и специалистов атомной отрасли.

В начальный период вывода из эксплуатации АПЛ (до 1990-х годов), когда все исследования в области концептуальных подходов к решению проблемы комплексной утилизации проводились силами ВМФ, масштаб возникавших проблем был не слишком велик. Однако отсутствие системного подхода в планировании привело тогда к выбору ряда ошибочных стратегических решений, с которыми мне пришлось столкнуться после назначения на должность председателя Научно-технического комитета ВМФ. Одно из них заключалось в переоборудовании штолен, построенных в скальном массиве для укрытия подводных лодок в особый период, для хранения в них реакторных отсеков утилизированных АПЛ. Однако из-за недостаточной герметичности скального массива в штольни поступала вода, что создавало недопустимо высокий уровень влажности. К тому же основания штолен располагались значительно ниже уровня моря, и в случае повреждения гидравлического затвора реакторные отсеки могли бы оказаться затопленными. Изучив вопрос, я пришёл к выводу об ошибочности и недопустимости реализации такого решения и подготовил соответствующий доклад Главнокомандующему ВМФ. В результате напряжённых дискуссий от этого опасного в экологическом отношении и экономически обременительного проекта пришлось отказаться.

Другое ошибочное решение было связано с намерением перерабатывать все твёрдые радиоактивные отходы (ТРО) на специально создаваемых металлургических предприятиях для выделения из них наиболее активной компоненты и тем самым достигать существенного уменьшения объёма этих отходов. Принципиально задача решаемая, известны и технологии, но из-за чрезмерных затрат такой подход нигде в мире в широких масштабах не реализовывался.

Наконец, вместо того чтобы с самого начала выбрать на берегу подходящую площадку для длительного хранения реакторных отсеков, остающихся после утилизации АПЛ, и оборудовать

её надлежащей инфраструктурой, было решено формировать многоотсечные блоки с реакторными отсеками и временно хранить их на плаву. Принятию такого решения способствовало тяжёлое экономическое положение страны и отсутствие в ВМФ средств и ресурсов для создания берегового пункта длительного хранения. Эту ошибку пришлось исправлять в наши дни — поднимать трёхотсечные блоки на стапели судоремонтного завода, вырезать из них реакторные отсеки и транспортировать на сооружённый к этому времени пункт длительного хранения.

Для поиска наилучших путей ликвидации "ядерного наследия" и обмена практическим опытом в этой области ИБРАЭ РАН инициировал четыре международных конференции в рамках научно-технического сотрудничества "Россия — НАТО" (1995, 1997, 2002, 2004 гг.). По материалам этих конференций изданы четыре книги на русском и английском языках [21–24], в которых сконцентрирован весь мировой научный и инженерно-технологический опыт по наиболее актуальным проблемам утилизации и радиоэкологической реабилитации ядерных объектов.

В 1998 г. постановлением Правительства РФ № 518 от 28.05.1998 г. генеральным заказчиком и координатором работ по утилизации АПЛ, выведенных из боевого состава флота, был определён Минатом России (ныне ГК "Росатом"). К этому моменту масштаб проблемы в северо-западной части Арктической зоны России характеризовался такими цифрами:

- не утилизированы 79 АПЛ из 105 выведенных из боевого состава ВМФ;
- все неутраченные АПЛ и 26 многоотсечных блоков с реакторными отсеками содержатся на плаву;
- в реакторах 76 содержащихся на плаву объектов и в хранилищах БТБ находится отработавшее ядерное топливо суммарной активностью около 600 ТБк.

В 2001 г. Минатом России при участии других ведомств и организаций разработал и утвердил Концепцию комплексной утилизации атомных подводных лодок и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками [25], но уже вскоре стало ясно, что реализовать её исключительно за счёт бюджета России в приемлемые сроки невозможно. В сложившейся ситуации международное сообщество начало оказывать финансовую и техническую помощь в решении этих задач, причём вначале она осуществлялась в рамках различных двусторонних и многосторонних соглашений, таких как Программа совместного уменьшения угроз, Программа АМЕС и других.

На встрече лидеров "Большой восьмёрки" в Канадаскисе (Канада, 2002 г.) удалось сделать боль-

шой шаг вперёд в подходах к реабилитации Арктики: было учреждено "Глобальное партнёрство по предотвращению распространения оружия массового поражения, материалов и технологий для его изготовления". В задачи "Глобального партнёрства" входило:

- уничтожение химического оружия;
- утилизация выведенных из состава ВМФ России АПЛ;
- диспозиция оружейного плутония;
- перепрофилирование учёных-оружейников.

Решение второй из этих задач, предполагающее выгрузку и вывоз на переработку ОЯТ, утилизацию судов обслуживания, приведение в безопасное состояние и организацию долговременного хранения радиоактивных отходов, а также реабилитацию территорий бывших береговых баз флота, способствовало радиоэкологической реабилитации Арктики. Учреждение "Глобального партнёрства" ускорило подписание многостороннего международного соглашения о ядерно-экологической программе в России (2003), ставшего правовой базой сотрудничества, и позволило привлечь средства международного Фонда экологического партнёрства Северного измерения (ЭПСИ), образованного в 2001 г. для финансирования необходимых мероприятий.

Как иностранные партнёры, готовые вкладывать свои средства в решение радиоэкологических проблем на Северо-Западе России, так и руководители "Росатома" хотели видеть картину в целом: реальную ситуацию на объектах, чётко сформулированные приоритеты и цели, стратегию их достижения, технические, финансовые и организационные возможности самой России. Эффективное использование выделяемых ресурсов представлялось невозможным без единой комплексной программы. Разработка такой программы, получившей название Стратегический мастер-план (СМП), осуществлялась по заданию "Росатома", а финансировалась Европейским банком реконструкции и развития за счёт гранта Фонда ЭПСИ.

СТРАТЕГИЧЕСКИЙ МАСТЕР-ПЛАН

В специально созданную группу разработки программы вошли представители ведущих научно-исследовательских, проектно-конструкторских и производственных организаций ГК "Росатом", РАН, ВМФ и других ведомств, а функции головной организации были возложены на ИБРАЭ РАН. Впервые в российской практике в работах приняли участие специалисты из США и Великобритании; как международные консультанты они способствовали использованию передового зарубежного опыта стратегического планирования [26]. Общее научное руководство

разработкой СМП было поручено автору данной статьи.

Для "Росатома" Стратегический мастер-план стал главным инструментом управления деятельностью, связанной с утилизацией и реабилитацией на Северо-Западе России, а для стран-доноров — основой для выбора проектов, финансируемых в рамках двухсторонних или многосторонних инициатив. Таким образом, с самого начала СМП создавался в качестве документа двойного назначения — для использования в России и для обеспечения международного сотрудничества в рассматриваемой сфере.

Методологический принцип, применённый при разработке СМП, известен как "стратегическая пирамида". Он заключается в последовательной детализации целей и задач, решение которых приводит к достижению конечной цели программы ("видения"), являющейся вершиной пирамиды. "Видение" СМП было сформулировано так: "На Северо-Западе России ликвидированы угрозы от выведенных из состава ВМФ ядерных и радиационно опасных объектов и обеспечивавшей инфраструктуры, воздействие от которых на персонал, население и окружающую среду могут превышать действующие в России нормативы. При этом в пунктах временного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО) проведена реабилитация до уровня, не приносящего вреда здоровью человека и окружающей среде при предполагаемом будущем землепользовании".

Исходные данные. СМП разрабатывался в два этапа. На первом (2003–2004) основной задачей стал сбор и критический анализ данных о состоянии объектов утилизации и реабилитации, создаваемых ими угрозах, а также технологиях и производственных ресурсах обращения с этими объектами. Анализ позволил составить структурированный перечень и классификацию объектов; ранжировать их по степени угроз; выявить пробелы и неопределённости в исходной информации (методы и результаты этой работы подробно изложены в [27–29]). Все объекты были разделены на три категории. К первой отнесены выведенные из состава ВМФ и подлежащие утилизации и экологической реабилитации АПЛ, надводные корабли с ядерными энергетическими установками, суда технического обслуживания, а также береговые технические базы, преобразованные в пункты временного хранения отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов в губе Андреева (ПВХА) и в посёлке Гремиха (ПВХГ). Ко второй категории отнесены объекты производственной и транспортной инфраструктуры, которые должны быть использованы, созданы или реконструированы в процессе

реализации СМП: судоремонтные предприятия, накопительные площадки и комплексы обращения с ОЯТ и РАО, средства упаковки и транспортировки, системы контроля радиационной обстановки и физической защиты. Третью категорию составили нормативно-правовые документы, разработка или корректировка которых необходимы для эффективной и безопасной реализации СМП. В ходе определения очередности работ одной из наиболее сложных в методическом плане явилась задача оценки представляемой объектами утилизации потенциальной радиационной опасности для эксплуатационного персонала, населения региона и окружающей среды.

Ранжирование в первой категории по уровню создаваемых угроз проводилось четырьмя независимыми методами на основе сочетания аналитических и экспертных оценок для повышения объективности полученных результатов по величине интегрального радиационного потенциала объектов утилизации, по величине радиационного риска предполагаемых аварий, помимо того — с учётом их вероятности, а также на основе комплексной экспертной оценки по ряду актуальных параметров. Неожиданным оказалось определение в качестве объектов с наибольшим уровнем угроз пунктов временного хранения в губе Андреева и в посёлке Гремиха, а не объектов, хранящихся на плаву, как предполагалось в концептуальных документах Минатома России, равно как и в других материалах начала 2000-х годов. Это стало основанием для корректировки приоритетов СМП и соответствующих рекомендаций по перераспределению финансирования.

Программа комплексной утилизации. Главная цель Стратегического мастер-плана — создание программы комплексной утилизации (ПКУ) и экологической реабилитации, выполнение которой обеспечит достижение конечной цели (видения), — предопределила необходимость проектного подхода как методологической основы второго этапа разработки СМП. Для всех объектов были определены частные стратегические цели — конечные состояния, которых необходимо достигнуть при утилизации (примеры таких частных стратегических целей приведены в табл. 1). Следующим шагом стало составление детального перечня мероприятий, обеспечивающих достижение конечной цели для каждого объекта. Этот перечень известен как структура декомпозиции работ и строится по принципу вертикального планирования сверху вниз. При этом в каждом элементе структуры нижнего уровня детализируется содержание части объёма работ "родительского" элемента более высокого уровня. Такая методика позволяет избегать как пробелов, так и дублирования в планируемых работах. В самом начале детализации в качестве структурообразующего признака использована категория объекта утилизации, идентифицированная при анализе исходных данных на первом этапе разработки СМП. Это позволило определить 12 элементов второго уровня структуры декомпозиции работ — подпрограмм.

Дальнейшая детализация структуры декомпозиции работ программы комплексной утилизации осуществлялась до глубины, обеспечивающей возможность управления реализацией программы на стратегическом уровне. На стадии разработки СМП было признано, что достаточно не более пяти уровней структуры декомпозиции работ, но в ре-

Таблица 1. Частные стратегические цели — конечные состояния объектов утилизации ПКУ

Объект	Конечные цели
АПЛ и реакторные блоки (РБ)	Утилизация (выгрузка ОЯТ и разделка на металлолом) всех выведенных из состава ВМФ АПЛ и сформированных РБ до состояния специально подготовленных к длительному (70—100 лет) хранению реакторных отсеков (РО) и размещение их на специальной площадке в пункте долговременного хранения (ПДХ) "Сайда".
Суда атомного технологического обслуживания (АТО)	Утилизация (разделка на металлолом) всех выведенных из эксплуатации судов АТО (в том числе ПТБ "Лепсе", на которой должно быть выгружено ОЯТ) с созданием блоков хранения и их размещением в ПДХ РО "Сайда".
ПВХГ и ПВХА	Вывоз из обоих пунктов временного хранения (ПВХ) всего ОЯТ и РАО, очистка акваторий и реабилитация территорий ПВХ до состояния "коричневая лужайка", допускающего использование территории в промышленных целях в соответствии с рекомендациями, выработанными на основе результатов стратегического исследования СИ-1.
РАО	Ввод в эксплуатацию регионального центра кондиционирования и долговременного хранения РАО в губе Сайда.

альности в отдельных случаях потребовалась более глубокая детализация, появились элементы шестого и седьмого уровней. Элементы нижнего уровня каждой ветви структуры декомпозиции работ называются проектами. На момент завершения разработки СМП было идентифицировано свыше 230 проектов; в настоящее время их количество превышает 750 (включая выполненные).

Следующие этапы разработки программы комплексной утилизации таковы: идентификация логических связей "предшественник—последователь" между индивидуальными проектами; оценка длительности и стоимости работ по всем идентифицированным проектам, а затем их приоритизация для определения очерёдности выполнения. (Логические связи "предшественник—последователь" определяются в основном технологией выполнения работ, а учёт этих связей необходим для максимально равномерного использования выделяемых на программу утилизации ресурсов, в первую очередь финансовых.)

Для приоритизации проектов применялся адаптированный метод, разработанный Агентством по выводу из эксплуатации ядерных объектов Великобритании. Он основан на превращении всех факторов, влияющих на выработку решения, в исчисляемые величины. Базовая структура основных критериев приоритизации отражена на рисунке 9. Каждому критерию соответствует один или несколько факторов, для которых вырабатываются численные оценки. Соответственно, для каждого проекта необходимо получить независимые численные оценки множества факторов. Эксперты провели количественную оценку



Рис. 9. Базовые критерии приоритизации в СМП

группы детализированных показателей (метрик) по каждому отдельному фактору, а затем с помощью метода Дельфи была достигнута статистическая согласованность полученных значений и уже по ним определены приоритетные проекты. (Надо заметить, что использование экспертных оценок для выработки числовых значений во всём мире считается эффективным методом.)

На завершающей стадии разработки СМП (август 2007 г.) в процедуру приоритизации было включено 123 проекта программы комплексной утилизации, а исключены те, которые уже выполнялись и имели плановый срок завершения в пределах 2008 г.

Использование разработанной структуры декомпозиции работ с идентификацией логических связей между проектами, их ранжирование по уровню приоритетности, оценки длительности и стоимости выполнения работ, а также стандартные методы календарного планирования позволили составить перечень всех логически взаимосвязанных мероприятий, реализация которых должна была обеспечить достижение видения (рис. 10). Общее необходимое финансирование программы комплексной утилизации по оценке, приводимой в СМП, достигало ~2 млрд евро, а примерные сроки завершения ключевых этапов Программы при условии выделения необходимых ресурсов находились в интервале 2012–2025 гг. При отсутствии достаточных ресурсов эти сроки могут значительно сдвигаться в будущее. Детальную информацию о методиках, результатах исследований и процедурах, применявшихся при разработке СМП, можно найти в [30].

Реализация Стратегического мастер-плана. Появление самых первых результатов разработки СМП, начавшейся в 2004 г., стимулировало резкий рост — примерно в 2 раза — финансирования Программы комплексной утилизации со стороны иностранных доноров. Стратегический мастер-план был одобрен Ядерным операционным комитетом Фонда ЭПСИ, утверждён ассамблеей доноров Фонда и введён в действие в качестве руководящего документа приказом руководителя Федерального агентства по атомной энергии Российской Федерации № 686 от 26.12.2007 г.

Наиболее значимые результаты реализации СМП получены в области утилизации АПЛ. По состоянию на 31.03.2018 г. из 123 АПЛ, выведенных из состава ВМФ, 120 утилизированы, отработавшее ядерное топливо из них выгружено и вывезено из региона. Из трёх неутраченных АПЛ одна затонула при транспортировке к месту утилизации, а две другие выведены из состава ВМФ лишь в 2015 г. Эти три объекта содержат ОЯТ в реакторах.

В 2006 г. сдана в эксплуатацию площадка долговременного хранения реакторных отсеков в Сайда-Губе, и на 31.03.2018 г. на ней установлено 108 таких отсеков. Ещё четыре многоотсечных блока размещено на твёрдом основании, и лишь 15 хранятся на плаву. При сохранении нынешнего уровня финансирования программы все реакторные отсеки из этих объектов к 2020 г. будут размещены в пунктах долговременного хранения. В дальнейшем хранение многоотсечных реакторных блоков на плаву предположительно будет исключено.

Четыре из 13 судов атомно-технологического обслуживания утилизированы, сформированные блок-упаковки установлены в пунктах долговременного хранения реакторных отсеков. Ещё 9 таких судов ожидают утилизации, в том числе плавучая техническая база "Лепсе", оказавшаяся, как и ожидалось, наиболее сложным объектом этой категории из-за большого количества находящегося на ней отработавшего ядерного топлива.

Значительно более сложными оказались береговые объекты – пункты временного хранения отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов в губе Андреева и посёлке Гремиха. Ещё в 2010 г. из губы Андреева были вывезены 294 отработавшие тепловыделяющие сборки, хранившиеся в контейнерах устаревшей конструкции.

В ёмкостях сухого хранения отработавшего ядерного топлива в том же пункте находится ~20 тыс. (примерно 100 активных зон) отработавших тепловыделяющих сборок. Для извлечения и вывоза этого отработавшего топлива была построена специальная инфраструктура и модернизированы инженерные сооружения общего назначения (дороги, энерго- и водоснабжение), что потребовало около 10 лет проектных и строительно-монтажных работ. В начале 2017 г. эта инфраструктура сдана в эксплуатацию, и к ноябрю того же года 691 сборка загружена в 13 транспортных контейнеров и вывезена на переработку. Ещё свыше 2000 отработавших тепловыделяющих сборок ожидают вывоза на переработку.

В 2009 г. из пункта временного хранения в посёлке Гремиха вывезено и переработано всё кондиционное отработавшее ядерное топливо водо-водяных реакторов первого поколения (532 сборки), а в 2011–2012 гг. и всё дефектное топливо. Этот пункт – единственный, где имеется инфраструктура для обращения с отработавшими выемными частями (активными зонами) реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. Три активные зоны таких реакторов уже разобраны, и высокообогащённое отработавшее ядерное топливо вывезено на переработку.

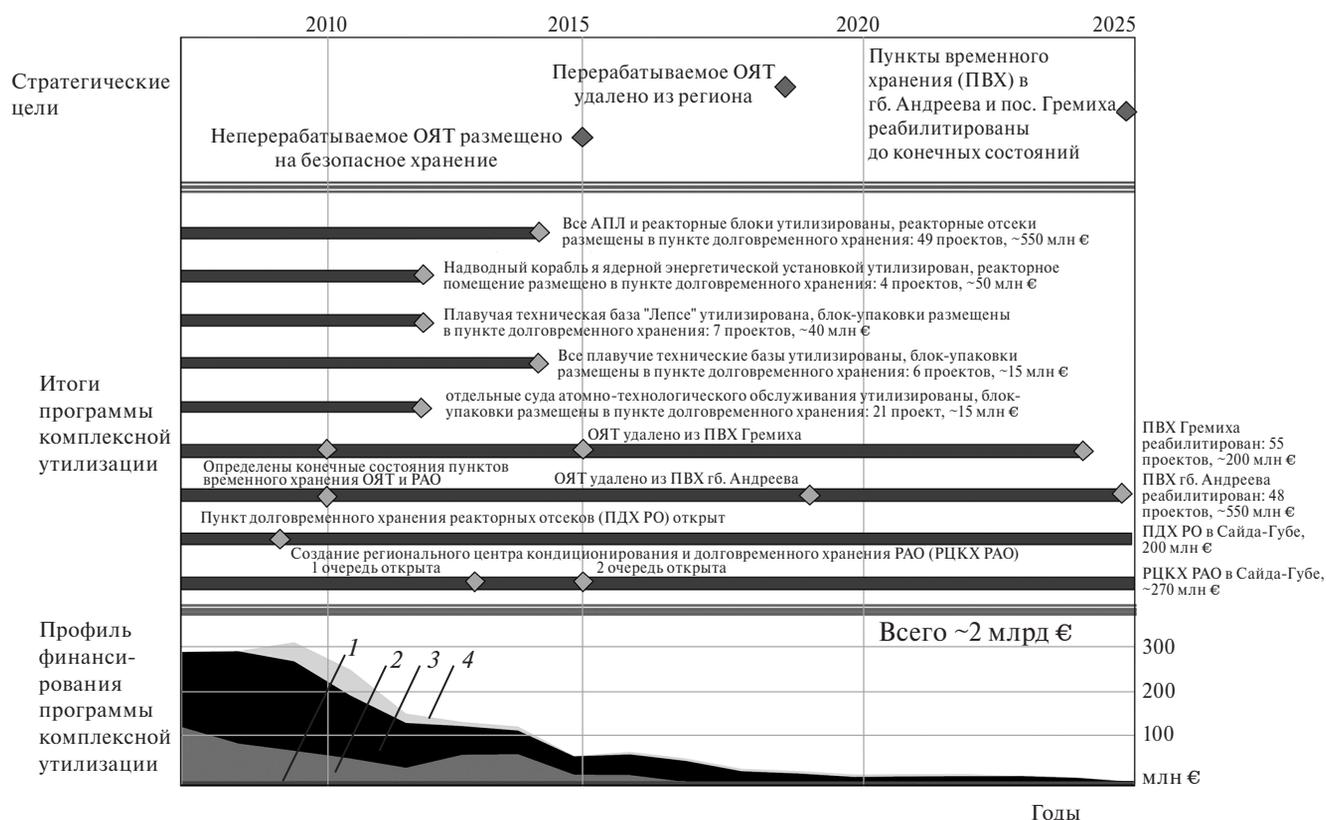


Рис. 10. Обобщённые результаты разработки СМП

1 – оценка стоимости жизненного цикла; 2 – существующее и запланированное финансирование; 3 – требуемое дополнительное финансирование; 4 – возможное дополнительное финансирование

на НПО "Маяк". В 2018 г. разобраны и вывезены ещё две активные зоны, а остальные будут утилизированы до 2020 г.

В Сайда-Губе при финансовой и технической помощи Германии построен и введён в эксплуатацию Региональный центр кондиционирования и долговременного хранения твёрдых радиоактивных отходов. Для перевозки больших объёмов отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов в Италии построено и передано ФГУП "Атомфлот" специализированное судно "Россита".

Информационно-аналитическое обеспечение реализации Стратегического мастер-плана. Ценность СМП как руководящего документа стратегического уровня критически зависит от полноты и достоверности информации, на основе которой план разрабатывается и реализуется, и её необходимо постоянно актуализировать. Для этой цели в качестве составной части СМП разработана информационная система управления. Она представляет собой программно-аппаратный комплекс, в основе которого лежит реляционная база данных сложной структуры, обеспечивающей интеграцию всей информации, важной для управления ходом выполнения программы комплексной утилизации, и представление этой информации в удобной для пользователя визуальной, текстовой или числовой форме.

Варьирование сроков выполнения отдельных проектов без потери логических межпроектных связей позволяет использовать информационную систему в качестве имитационной модели для анализа последствий принятия различных организационных решений. Некоторые примеры практического применения этой системы приведены в [31].

РАДИОИЗОТОПНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Для энергообеспечения различных автономных систем, в частности для электропитания средств навигации – оптических и радиомаяков, в СССР и России широко применялись радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ). Они были размещены в основном в Арктике для навигационного обеспечения движения по Северному морскому пути, а также на Камчатке, в Антарктиде и на Балтике. Первый РИТЭГ на основе радионуклида ^{90}Sr изготовлен в 1963 г., а последний сдан в эксплуатацию в 1996 г. Вдоль всего побережья СССР/России, а также в Антарктиде в разное время действовало 1019 таких генераторов.

В РИТЭГ используются радионуклидные источники тепла исходной активностью от $\sim 0,5$ до ~ 5 ПБк, причём в одном генераторе может содержаться от 1 до 6 источников. Активность генератора в зависимости от марки может составлять от 1,3 ПБк ("Бета-М") до 17 ПБк ("ИЭУ-М").

Суммарная активность эксплуатируемых РИТЭГов в 2007 г. составляла около 1 ЭБк. До 2005 г. 96 из них с суммарной активностью около 0,4 ЭБк были демонтированы. Следует отметить, что общая активность этих потенциально опасных объектов была сопоставима с оценкой выброса радионуклидов в атмосферу в результате Чернобыльской аварии. При разгерметизации или разрушении радиоактивного источника тепла ^{90}Sr может попасть в окружающую среду, что чревато локальным радиоактивным загрязнением за счёт выброса аэрозолей и пыли. Высокий уровень опасности для человека возникает при непосредственном контакте с разгерметизированным источником, когда мощность экспо-

Таблица 2. Частные стратегические цели — конечные состояния объектов утилизации ПКУ

Объекты затопления	Источники опасности на 1965–1992 гг.	Источники опасности на 2005–2018 гг.
3 атомные подводные лодки	5 реакторов с ОЯТ, 2 торпеды со специальными боевыми частями (СБЧ)	5 реакторов с ОЯТ, 2 торпеды с СБЧ
5 реакторных отсеков	3 реактора с ОЯТ	3 реактора с ОЯТ
1 ядерный реактор с АПЛ заказа № 421	1 реактор с ОЯТ	1 реактор с ОЯТ
1 контейнер с экранной сборкой а/л "Ленин"	$\sim 0,5$ реактора с ОЯТ	$\sim 0,5$ реактора с ОЯТ
19 судов с твёрдыми радиоактивными отходами (ТРО) на борту	19 судов с ТРО	19 судов с ТРО
735 радиоактивных конструкций и блоков	735 конструкций ТРО	Нет
Более 17 тыс. контейнеров с ТРО	Более 17 тыс. контейнеров с ТРО	Нет

зиционной дозы достигает 3 Зв/ч на расстоянии 1 м. Правда, за всё время эксплуатации (более 30 лет) в Арктике и Антарктике не отмечено ни одного случая отказа источника, сопровождавшегося выходом активности в окружающую среду. Тем не менее необходимо учитывать, что радиоактивные источники тепла с использованием ^{90}Sr снижают активность до безопасного уровня только через 900–1000 лет. Высокий уровень потенциальной опасности РИТЭГ связан главным образом с возможностью аварий при транспортировке, пожарах или злоумышленных действий с разборкой генератора в месте эксплуатации.

Работы по снятию с эксплуатации и утилизации РИТЭГ начаты в 2001 г. с использованием средств международной технической помощи, предоставленной в разное время Норвегией, США, Канадой, Финляндией, Францией и Швецией. По состоянию на 2018 г. из 1019 РИТЭГов 892 полностью утилизированы, 114 ожидают утилизации на площадках временного контролируемого хранения, 12 находятся в эксплуатации (на суше) и 1 утерян. Таким образом, можно считать, что данная проблема обеспечения экологической безопасности Арктики практически решена.

ЗАТОПЛЕННЫЕ И ЗАТОНУВШИЕ ЯДЕРНО- И РАДИАЦИОННО- ОПАСНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Захоронение радиоактивных отходов в Мировом океане в 1960–1970-х годах было общепринятой практикой и считалось совершенно безопасным. Первыми такую операцию провели ещё в 1946 г.

США в северо-восточной части Тихого океана, затопив твёрдые отходы низкой активности в 80 км от побережья Калифорнии. Вскоре к такому способу прибегли Великобритания, Новая Зеландия, Япония, Бельгия и другие страны. В 1959–1992 гг. СССР/Россия проводили затопление радиоактивных отходов, причём только твёрдых и жидких, образовывавшихся при эксплуатации военного и гражданского атомного флота, в Баренцевом и Карском морях в специально выбранных районах вне зон интенсивного судоходства и рыболовства. Всего в водах Арктики СССР/Россией затоплено около 18 тыс. радиационно опасных объектов. Обобщённые данные по всем затопленным и затонувшим в Норвежском, Баренцевом и Карском морях ядерно и радиационно опасных объектах представлены в таблице 2.

Наибольшая по количеству часть затопленных объектов – это ~17 тыс. контейнеров, 19 судов с твёрдыми радиоактивными отходами, 735 радиоактивных конструкций и блоков. Все эти объекты к настоящему времени не являются значимым источником радиационной опасности, поскольку их защитные барьеры практически полностью разрушены, и произошла естественная дезактивация за счёт взаимодействия с морской водой. Основной же радиационный потенциал сосредоточен в 7 объектах, содержащих отработанное ядерное топливо и представляющих наибольшую опасность в качестве потенциальных источников радиоактивного загрязнения окружающей среды. Характеристики затопленных и затонувших объектов, содержащих ОЯТ, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Частные стратегические цели — конечные состояния объектов утилизации ПКУ

№ п/п	Наименование объекта	Район затопления	Год затопления	Глубина, м	Активность на 2015 г., ТБк
1	АПЛ "Комсомолец" (1 реактор ОК-650 с ОЯТ)	Норвежское море	1989	1655	~1900
2	АПЛ "Б-159" (2 реактора ВМА с ОЯТ)	Баренцево море	2003	250	~5100
3	АПЛ "К-27" (2 реактора РМ-1 с ОЯТ)	Залив Степового, Карское море	1981	33	~380
4	Реакторный отсек АПЛ заказа 901 (2 реактора ВМА с ОЯТ)	Залив Абросимова, Карское море	1965	20	~320
5	Реакторный отсек АПЛ заказа 285 (2 реактора ВМА, один с ОЯТ)	Залив Абросимова, Карское море	1966	20	~300
6	Реактор АПЛ заказа 421 (ВМ-2-4 с ОЯТ)	Новоземельская впадина, Карское море	1974	300	~110
7	Экранная сборка реактора ледокола "Ленин" (реактор ОК-150 с 60% ОЯТ)	Залив Цивольки, Карское море	1967	10–50	~750

В числе затопленных объектов с отработавшим ядерным топливом особое место занимает АПЛ проекта 645 (К-27), введённая в строй в 1963 г. В двух реакторах этой АПЛ впервые в мировой практике был использован тяжёлый жидкометаллический теплоноситель свинец-висмут. В 1968 г. на реакторе левого борта произошла авария с выносом в первый контур около 20% топлива. В 1981 г. после проведённой консервации обоих реакторов АПЛ была затоплена в заливе Степового (о. Новая Земля) на глубине не более 50 м.

Кроме плановых затоплений, прекращённых в 1993 г., в Арктике аварийно затонули две АПЛ. В 1989 г. в Норвежском море при движении в подводном положении в результате пожара затонула на глубине 1750 м АПЛ "Комсомолец" (К-278) — единственная лодка проекта 685 "Плавник" (третье поколение), которой принадлежит абсолютный рекорд глубины погружения. В 2003 г. в Баренцевом море в 3 милях от о. Кильдин на глубине около 230 м во время буксировки в г. Полярный для выгрузки топлива и последующей утилизации аварийно затонула АПЛ первого поколения Б-159 проекта 627. Оба корабля имели отработавшее топливо в активных зонах реакторов, а АПЛ "Комсомолец" также две торпеды с плутониевыми боезарядами.

Начало интенсивного освоения арктического шельфа повышает значимость рисков, связанных с затопленными ядерными и радиационно опасными объектами. Так, ряд объектов на дне Карского моря находится в зонах, где может происходить разведка и добыча углеводородов.

Особое внимание привлекают две аварийно затонувшие АПЛ — Б-159 и "Комсомолец" (в отличие от планово затопленных объектов они не были подготовлены к затоплению и не имеют дополнительных защитных барьеров, препят-

ствующих выходу радиоактивности в окружающую среду), а также АПЛ К-27. Это связано с тем, что из всех находящихся на дне арктических морей ядерно и радиационно опасных объектов названные АПЛ имеют наивысший радиационный потенциал. Кроме того, АПЛ "Комсомолец" и Б-159 в момент затопления ударились о дно и получили повреждения прочного корпуса, что может способствовать ускоренной деградации имеющихся защитных барьеров. На борту "Комсомольца" наряду с ОЯТ продолжают оставаться представляющие потенциальную опасность высокотоксичные плутониевые боеголовки. Дальнейшее нахождение АПЛ К-27 на дне, несмотря на консервацию, которая была проведена перед затоплением, связано с риском неконтролируемой цепной реакции в случае нарушения плотности защитных барьеров.

Для разработки научно обоснованной программы дальнейшего обращения с затопленными опасными объектами (включая обоснование конечных целей и стратегий их достижения) необходимо провести дополнительные специальные исследования подобно тому, как это было сделано в ходе разработки СМП. Эти исследования включают в себя натурные наблюдения для получения и уточнения исходных данных: состояние корпусных конструкций, уровень коррозии защитных барьеров, положение объектов на грунте и т.п., а также теоретические изыскания — моделирование процессов разрушения защитных барьеров, подъёма, транспортировки, утилизации и/или изоляции; анализ рисков, связанных с возможностью возникновения аварийных ситуаций с выходом активности в окружающую среду; оценку стоимости и необходимых ресурсов для осуществления различных вариантов стратегий обращения с каждым из опасных

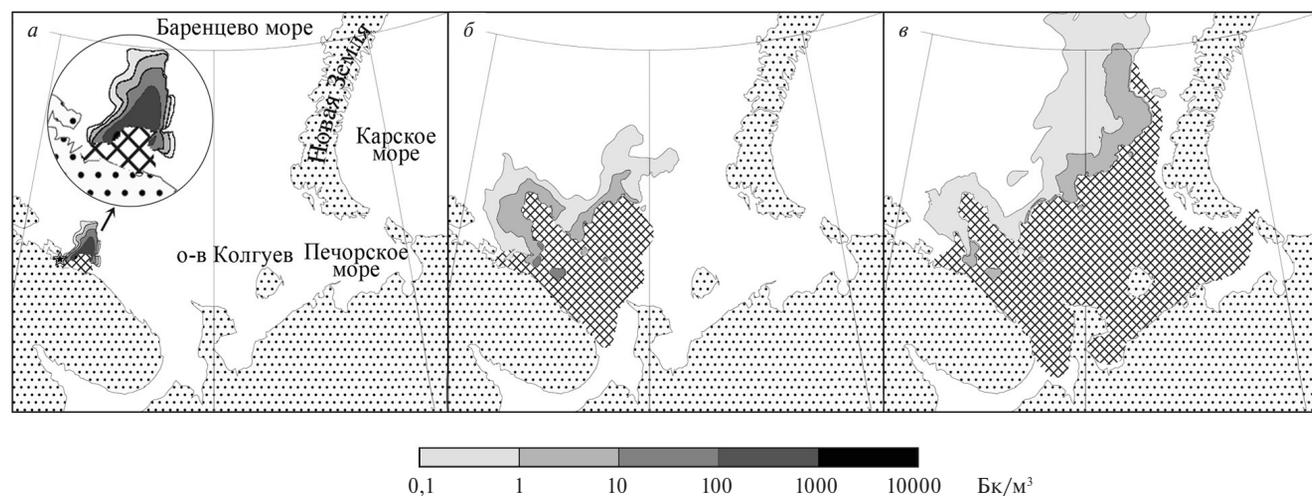


Рис. 11. Прогноз распространения ^{137}Cs относительно района гибели АПЛ "Б-159" в Баренцевом море на горизонте 200–210 м через 1 (а), 6 (б), 12 (в) месяцев

объектов. Подробная информация о полученных в результате уже проведённых исследований данных и оценках возможностей дальнейшего обращения с объектами, находящимися на дне Баренцева и Карского морей, систематизирована в монографии [32].

За 45 лет натуральных исследований состоялось более 40 экспедиций к местам затопления ядерных и радиационно опасных объектов в Карском и Баренцевом морях, в том числе пять международных. Основной целью почти всех этих экспедиций было изучение радиационной обстановки на объектах и в непосредственной близости от них. Однако не только никакой новой информации о состоянии несущих конструкций корпусов АПЛ в ходе экспедиций получено не было, но даже такая цель при организации экспедиций не ставилась.

Данные, полученные в ходе выгрузки отработавшего топлива из реактора АПЛ "Альфа" № 900, подготовленной к затоплению по той же технологии консервации, что и К-27, показали, что надёжность консерванта на основе фурфурола не так высока, как предполагалось ранее [33]. Между тем проникновение сравнительно небольшого количества воды в активную зону реактора с жидкометаллическим Pb-Bi теплоносителем и высокообогащённым по ^{235}U ядерным топливом может привести к возникновению самоподдерживающейся цепной реакции [34] с разрушением защитных барьеров и выбросом радионуклидов в окружающую среду.

В ИБРАЭ РАН проводятся теоретические исследования различных процессов разрушения защитных барьеров радиационно опасных объектов в морской среде и выхода радионуклидов в окружающую среду. Процессы коррозионного разрушения рассматривались в работах [35, 36], а в [37, 38] проводились оценки выхода радионуклидов в результате различных аварийных ситуаций.

Недавно выполненное исследование ИБРАЭ РАН, Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и НИЦ "Курчатовский институт" [39] – пример модельного изучения возможных последствий тяжёлой аварии на АПЛ Б-159 с выходом активности в окружающую среду. После анализа различных сценариев аварии был выбран наиболее экстремальный из них, с возникновением самоподдерживающейся цепной реакции и разрушением активной зоны. Оценён максимально возможный выброс радионуклидов в окружающую среду (около 50 ТБк) и проведены расчёты распространения возникшего загрязнения в морской среде (рис. 11). Эти расчёты проводились в рамках модели Мирового океана, разработанной совместно Институтом

вычислительной математики РАН и Институтом океанологии РАН [40].

В настоящее время в интересах ГК "Росатом" по заказу Еврокомиссии консорциумом, образованным экспертами из Италии, Норвегии, Германии, Великобритании и Франции, выполняется проект "Технико-экономические исследования и разработка плана действий по безопасному и надёжному обращению с радиационно опасными объектами, затопленными в арктических морях". С российской стороны в работе консорциума принимает участие ИБРАЭ РАН.

Серьёзным препятствием на пути решения проблемы затопленных ядерных и радиационно опасных объектов в Арктике оказывается недостаток необходимой нормативно-правовой и организационно-распорядительной документации, а также отсутствие инфраструктуры, обеспечивающей подъём радиоактивных объектов и последующее обращение с ними. В современной нормативно-правовой базе в нашей стране и за рубежом нет документов, содержащих количественные критерии допустимого радиоактивного загрязнения морской среды. Не содержат их также рекомендации МАГАТЭ и Международной комиссии по радиационной защите. Без таких критериев невозможна практическая работа не только по эксплуатации военного и гражданского атомного флотов, но и по реабилитации радиоактивно-загрязнённых акваторий и полному освобождению Арктики от радиационного наследия холодной войны.

В организационном плане несомненным позитивным шагом стала утверждённая в 2013 г. Президентом РФ "Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года", для реализации основных положений которой в том же году была разработана и утверждена Правительством РФ соответствующая программа, о чём упоминалось в начале статьи. Однако эти документы нельзя рассматривать как обеспеченную в материальном и правовом отношении реальную программу действий. Скорее, они имеют характер декларации о намерениях, так как для организации полноценной скоординированной работы, связанной с затопленными в Арктике ядерными и радиационно опасными объектами, принятых решений совершенно недостаточно. Кроме отмеченных выше обстоятельств – отсутствия нормативно-правовой базы в области загрязнения морской среды радионуклидами и недостатка необходимой для проведения работ инфраструктуры, – остаётся нерешённым ряд ключевых организационных вопросов:

- не принята комплексная программа, обеспечивающая полное решение проблемы; не ре-

щён вопрос о правовом статусе затопленных объектов;

- не определён федеральный орган власти, ответственный за координацию работ по реабилитации арктических морей от ядерных и радиационно опасных объектов;

- не определены источники финансирования научных, проектно-конструкторских и практических работ по реабилитации арктических морей.

* * *

Проблема вывода из эксплуатации и утилизации российских АПЛ решалась при содействии стран-участниц Глобального партнёрства. Эти работы ознаменовались беспрецедентным по своей эффективности международным сотрудничеством в области ликвидации радиоэкологических последствий холодной войны в Арктическом регионе.

Затонувшие и затопленные объекты, содержащие отработавшее ядерное топливо и радиоактивные отходы, продолжают оставаться наиболее масштабными составляющими радиоэкологического загрязнения северо-запада Арктического региона. Выполненные натурные исследования свидетельствуют, что в настоящее время эти объекты не представляют реальной радиоэкологической опасности для населения и окружающей природной среды. Вместе с тем их следует рассматривать как источники потенциальной опасности, масштабы и последствия которой будут зависеть от состояния защитных барьеров, отделяющих радиоактивные вещества от морской среды, механизмов переноса этих веществ в воде и воздействия их на биоту.

Наличие ядерных материалов в практически неконтролируемых условиях в мелководных районах делает данную проблему ещё более актуальной из-за террористической опасности.

Дальнейшее нахождение большого числа радиационно опасных объектов на дне такого уникального объекта, как Арктический бассейн, без систематического радиоэкологического контроля, а также комплексной программы последующего обращения с ними неприемлемо.

Для обоснования приоритетных действий необходимы разработка и анализ возможных сценариев развития процессов, влияющих на радиоэкологическую обстановку, рассмотрение различных вариантов обращения с затопленными и затонувшими объектами, в том числе подъёма некоторых из них, с учётом радиоэкологических, технико-экономических, социально-политических факторов, а также экологической этики.

Полное завершение радиоэкологической реабилитации российской Арктики требует поли-

тической воли руководства страны и разработки комплекса необходимых для решения этой задачи правительственных актов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 17-19-01674 "Разработка методических подходов и математических моделей для прогнозирования воздействия на окружающую среду в случае аварий на атомных плавучих объектах, моделирование распространения радиации в Арктической акватории при аварийных ситуациях".

ЛИТЕРАТУРА

1. *Конторович А. Э., Эпов М. И., Бурштейн Л. М. и др.* Геология, ресурсы углеводородов шельфов арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 7–17.
2. Ядерные испытания СССР / Под ред. В. Н. Михайлова. Т. 1. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997.
3. *Vakulovsky S., Nikitin A., Chumichev V., Malyshev S.* Radioactive contamination of the Barents and Kara Seas // International Meeting on Assessment of Actual and Potential Consequences of Radioactive Waste into Arctic Seas (Oslo, Norway, 01–05 February 1993). Working Materials of the International Atomic Energy Agency. Vienna, 1993.
4. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1993 г. / Под ред. К. П. Махонько. Обнинск: НПО "Тайфун", 1994.
5. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1996 г. СПб.: Гидрометеоздат, 1998.
6. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1997 г. СПб.: Гидрометеоздат, 1998.
7. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1998 г. СПб.: Гидрометеоздат, 2000.
8. *Андрианов К. Н., Сафронов В. Г.* Радиоэкологическое состояние Центрального полигона РФ / Новая Земля. Т. 3. / Под общ. ред. П. В. Боярского. М.: РНИИ культурного и природного наследия, 1994. С. 68–75.
9. *Касаткина Н. Е.* Адсорбция радионуклидов цезия на донных отложениях и оценка радиоэкологической ситуации в бассейнах Баренцева и Азовского морей. Иваново: ИГХТУ, ММБИ КНЦ РАН, 2008.
10. *Сыч Ю. Г., Дубинко Л. В.* Радиоэкологическая обстановка на архипелаге Новая Земля // Арктика: экология и экономика. 2012. № 1(5). С. 48–59.
11. *Усаягина И. С.* Распределение и пути миграции искусственных радионуклидов в экосистеме Баренцева моря. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2012.
12. *Dubasov Yu. V., Baranov Yu. I., Katsarov S. V. et al.* Investigation of radionuclide content in the gulfs and Chernaya Bay of archipelago Novaya Zemlya // Environmental Radioactivity in the Arctic (Proc. of

- the 4th Intern. Conf, Edinburgh, Scotland, 20–23 Sept. 1999) / Ed. by P. Strand, T. Jolle. Osteras, 1999.
13. A State of the Arctic Environmental Report. / Arctic Pollution and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 1998.
 14. *Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б.* О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западноевропейских радиохимических заводов // Атомная энергия. 1985. Т. 58. Вып. 6. С. 445–449.
 15. *Yiou F., Raisbeck G.M., Zhou Z.Q. et al.* Improved Estimates of Oceanic Discharges of ^{129}I from Sellafield and La Hague // Second International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic. August 21–25, 1995, Oslo, Norway.
 16. 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.
 17. *Kuznetsov Yu., Rakov N., Tishkov L.W.* An Assessment of the Contribution by Different Contamination Sources into the Total Radioactive Contamination of the Kara Sea. St. Petersburg: Radium Institute, 1994.
 18. *Pavlov V.K.* Oceanographic Description of the Kara and Barents Seas. Working Materials of the International Arctic Seas Assessment Project (IASAP). Reproduced by the International Atomic Energy Agency as IAEA-IASAP-2. Vienna: IAEA, 1994.
 19. *Gao Y., Drange H., Johannesen O.M., Petersson L.H.* Sources and pathways of ^{90}Sr in the North Atlantic-Arctic region: present day and global warming // J. of Environmental Radioactivity. 2009. V. 100. P. 375–395.
 20. *Васильев А.П., Васюхно В.П., Нетеча М.Е. и др.* Радиологическое состояние территории и акватории губы Андреева // Атомная энергия. 2006. Т. 101. Вып. 1. С. 49–95.
 21. Nuclear Submarine Decommissioning and Related Problems / Ed. L.G. LeSage and A.A. Sarkisov. Kluwer Academic Press, 1996; Проблемы вывода из эксплуатации и утилизации атомных подводных лодок / Под ред. А.А. Саркисова. М.: ИБРАЭ РАН, 1999.
 22. Analysis of Risks Associated with Nuclear Submarine Decommissioning, Dismantling and Disposal / Ed. Ashot A. Sarkisov and Alan Tournyol du Clos. Kluwer Academic Press, 1999; Анализ рисков, связанных с выводом из эксплуатации, хранением и утилизацией атомных подводных лодок / Под ред. А.А. Саркисова. М.: ИБРАЭ РАН, 1999.
 23. Remaining Issues in the Decommissioning of Nuclear Powered Vessels / Ed. Ashot A. Sarkisov and Alan Tournyol du Clos. Kluwer Academic Press, 2003; Научные проблемы и нерешённые задачи утилизации кораблей с ЯЭУ и экологической реабилитации обслуживающей инфраструктуры / Под ред. А.А. Саркисова. М.: ИБРАЭ РАН, 2004.
 24. Scientific and Technical Issues in the Management of Spent Fuel of Decommissioned Nuclear Submarines / Ed. L.G. LeSage and A.A. Sarkisov. Springer, 2006; Научные и технические проблемы обеспечения безопасности при обращении с ОЯТ и РАО утилизируемых АПЛ и НК с ЯЭУ. В 2-х томах / Под ред. А.А. Саркисова. М.: ИБРАЭ РАН, 2007.
 25. Концепция комплексной утилизации атомных подводных лодок и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками. М.: Минатом России, 2001.
 26. Руководство к Своду знаний по управлению проектами. Newton Square Pennsylvania, USA: Project Management Institute, 2004.
 27. Стратегический мастер-план утилизации и экологической реабилитации выведенных из эксплуатации объектов флота на Северо-Западе России. Итоговый отчёт по 1-й фазе. М.: РНЦ КИ, ИБРАЭ РАН, НИКИЭТ, 2003.
 28. *Богатов С.А., Высоцкий В.Л., Саркисов А.А. и др.* Анализ рисков радиоактивного загрязнения окружающей среды, обусловленного выведенными из эксплуатации объектами атомного флота на Северо-Западе России // Атомная энергия. 2006. Т. 101. Вып. 1. С. 23–34.
 29. *Антипов С.В., Ахунов В.Д., Высоцкий В.Л. и др.* Обоснование приоритетов при комплексной утилизации и экологической реабилитации объектов атомного флота // Атомная энергия. 2006. Т. 101. Вып. 1. С. 11–17.
 30. *Антипов С.В., Арутюнян Р.В., Большов Л.А. и др.* 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.
 31. *Антипов С.В., Кобринский М.Н., Шведов П.А.* Использование ИСУП СМП для принятия управленческих решений в работах по комплексной утилизации АПЛ // Известия РАН. Энергетика. 2013. № 2. С. 53–58.
 32. *Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Никитин В.С.* Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиоэкологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей. М.: ИБРАЭ РАН, 2015.
 33. *Пантелеев В.Н.* Выгрузка топлива из реактора АПЛ класса "Альфа" и разборка активной зоны. Хельсинки. Материалы КЭГ МАГАТЭ. 2012.
 34. *Сомов И.Е.* О подъёме АПЛ "К-27" для снижения ядерного и радиационного риска в Северо-Западном регионе. Осло. Материалы КЭГ МАГАТЭ. 2011.
 35. *Билашенко В.П., Сотников В.А.* Деградация защитных барьеров затопленных радиационно

- опасных объектов, методы оценки и прогноза их состояния // Известия РАН. Энергетика. 2013. № 2. С. 90–97.
36. Саркисов А.А., Антипов С.В., Билашенко В.П. и др. Математическая модель для оценки технического состояния и прогнозирования разрушения защитных барьеров затопленных радиационно опасных объектов // Атомная энергия. 2018. Т. 124. Вып. 2. С. 99–104.
37. Саркисов А.А., Антипов С.В., Билашенко В.П. и др. Оценка выхода радионуклидов в окружающую среду при потенциальной аварии в ходе подъёма и транспортировки затопленной атомной подводной лодки "К-27" // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 2. С. 16–29.
38. Антипов С.В., Билашенко В.П., Высоцкий В.Л. и др. Оценка выхода радионуклидов в окружающую среду в случае возникновения аварии на затонувшей атомной подводной лодке Б-159 // Атомная энергия. 2015. Т. 119. Вып. 4. С. 222–229.
39. Антипов С.В., Билашенко В.П., Высоцкий В.Л. и др. Прогноз и оценка радиоэкологических последствий гипотетической аварии на затонувшей в Баренцевом море атомной подводной лодке Б-159 // Атомная энергия. 2015. Т. 119. Вып. 2. С. 106–113.
40. Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В. Вихреразрешающая 1/10 модель Мирового океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. № 48(1). С. 45–55.

RADIOACTIVE CONTAMINATION MITIGATION IN THE ARCTIC REGION

© 2019 A.A. Sarkisov

Nuclear Safety Institute, RAS, Moscow, Russia

E-mail: sarkisov@ibrae.ac.ru

Received: 21.06.2018

Revised version received: 20.09.2018

Accepted: 24.10.2018

This article discusses the most significant sources of large-scale radioactive contamination to which the Arctic has been exposed since the middle of the last century, which are identified as 1) radioactive fallout and deposition from nuclear weapon testing; 2) plum waste from the Sellafield radiochemical plant (United Kingdom) and Cap de la Ag (France) nuclear fleet operation; 3) radioisotope thermoelectric generators; and 4) submerged and sunken radioactive objects. The article assesses the comparative contribution and associated radioecological risks of these sources, and special attention is focused on the “nuclear legacy” of the USSR/Russian nuclear fleet and the search for solutions. The article describes the content and implementation results of the “Development of a Strategic Master Plan for Disposition of Decommissioned Russian Nuclear-Powered Fleet and Rehabilitation of Hazardously Radioactive Sites and Facilities of Its Support Infrastructure” which was developed with broad international cooperation. Attention is drawn to remaining environmental problems associated with submerged and sunken objects that contain spent nuclear fuel and radioactive waste in the Arctic, and the article presents generalized data on such objects and associated risks of water contamination as identified by analyses of model studies of possible accident consequences.

Keywords: arctic, nuclear submarine, nuclear reactor, core, uncontrolled self-sustaining chain reaction, radioactive substances, human-made radionuclides, nuclear tests, global deposition, contamination, environment.