

## ПРОБЛЕМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АРКТИЧЕСКОЙ АКВАТОРИИ В УСЛОВИЯХ НАХОЖДЕНИЯ НА ДНЕ ЗАТОПЛЕННЫХ ЯДЕРНЫХ И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

С. В. Антипов, В. П. Биладенко, М. Н. Кобринский, П. А. Шведов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (Москва, Российская Федерация)

### Для цитирования

С. В. Антипов, В. П. Биладенко, М. Н. Кобринский, П. А. Шведов. Проблемы радиационной безопасности арктической акватории в условиях нахождения на дне затопленных ядерных и радиационно опасных объектов // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 1. — С. 85—97. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-1-85-97.

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2024 г.

*Рассматриваются необходимость и возможность реабилитации арктической акватории от затопленных ядерных и радиационно опасных объектов (ЗЯРОО). Приводятся данные о количестве, составе и состоянии затопленных радиационно опасных объектов. Описаны и проанализированы различные возможные варианты обращения с ними с целью минимизации исходящих от них угроз для человека и окружающей природной среды. Приведены результаты выполненного сравнительного анализа различных вариантов обращения с этими объектами. Даны рекомендации по снижению имеющихся рисков и минимизации угроз.*

**Ключевые слова:** Арктическая зона Российской Федерации, Северный морской путь, затопленные радиоактивные объекты, реабилитация акватории от ядерных и радиационно опасных объектов, варианты обращения с ЗЯРОО.

### Введение

Среди многочисленных амбициозных задач развития экономики нашей страны одной из важнейших и сложнейших является провозглашенное опережающее развитие Арктической зоны Российской Федерации. В свою очередь, это опережающее развитие невозможно без решения масштабных экологических проблем, что следует из ряда государственных документов доктринального уровня [1—4]. Одна из таких проблем заключается в том, что в арктической акватории вблизи маршрута Северного морского пути в свое время было затоплено большое количество различных радиоактивных объектов, включая объекты с отработавшим ядерным топливом и твердыми радиоактивными отходами (ЗЯРОО), которые и сегодня, находясь на дне Арктики, представляют

определенную опасность для судоходства, рыболовства, добычи полезных ископаемых и т. д. Следует заметить, что в основном это опасность не реальная, а потенциальная.

Здесь уместно пояснить значение терминов «реальный» и «потенциальный» в контексте исследований, касающихся радиационных объектов морского базирования, включая затопленные. Применительно к наземным объектам реальные и потенциальные опасности определяются действующими нормами. Есть превышение предельно допустимых норм — опасность реальная, нет превышения — потенциальная.

Для морских же объектов общепризнанные нормативы предельно допустимого содержания радионуклидов в морской воде отсутствуют, что делает понятия «реальные» и «потенциальные» опасности (и, соответственно, источники) не вполне определенными. Поэтому разделение ЗЯРОО ниже на рис. 1 и далее достаточно условно.

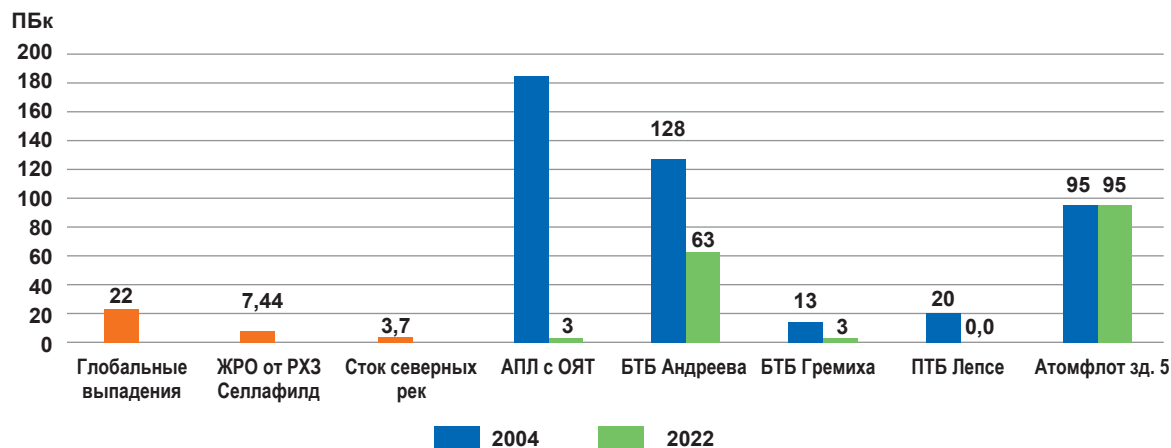


Рис. 1. Реальные и потенциальные источники техногенных радионуклидов в арктическом регионе. Расчеты авторов  
 Fig. 1. Real and potential sources of human-made radionuclides in the Arctic region. Authors calculations

Целью данной статьи является систематизированное описание ЗЯРОО, сравнительный анализ возможных способов обращения с ними для обоснования наиболее приемлемых в настоящее время способов обращения для каждого вида ЗЯРОО на основе сформулированных критериев безопасности, достижимости и эффективности, подразумевающих снижение существующих угроз без появления новых.

**Методы исследования**

В основе работы лежат комплексные аналитические исследования результатов ранее проведенных работ авторов и других ученых и специалистов по широкому спектру проблем радиационной безопасности арктических акваторий в условиях нахождения на дне затопленных ядерных и радиационно опасных объектов, включая отработавшие свой срок ядерные энергетические установки, атомные подводные лодки (АПЛ) и др.

**Результаты исследований и их обсуждение**

*История возникновения проблемы. Исходные данные*

Основной вклад в потенциальное радиоактивное загрязнение на Северо-Западе России был обусловлен отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), содержащимся в реакторах, выведенных из состава военного и гражданского флотов атомных подводных лодок, надводных кораблей и ледоколов с ядерными энергетическими установками (НК с ЯЭУ), а также в хранилищах судов атомного технологического обслуживания (АТО) и береговых технических баз (БТБ). На рис. 1 проиллюстрировано соотношение радиационных потенциалов главных реальных и потенциальных источников радиоактивного загрязнения Арктики. Видно, что активность потенциальных источников многократно превышала активность реальных.

Ликвидации или сокращения угроз от ряда ядерных объектов требовали и международные обязательства России по сокращению стратегических

наступательных вооружений и оружия массового уничтожения. Для выполнения этих обязательств и снижения угроз и рисков от ядерных и радиационно опасных объектов был разработан и реализован Стратегический Мастер-план утилизации атомных подводных лодок, надводных кораблей с ЯЭУ и экологической реабилитации обслуживающей их инфраструктуры на Северо-Западе России [5]. На достижение этой цели была также направлена подпрограмма «Утилизация атомных подводных лодок» федеральной целевой программы «Утилизация вооружений и военной техники». В итоге последовательной реализации нескольких этапов этой программы и благодаря технической и финансовой поддержке со стороны стран-участниц Глобального партнерства данная проблема в основном была решена. Результатом этой работы стали безаварийно проведенная в кратчайшие сроки утилизация 200 АПЛ Северного и Тихоокеанского флотов, сооружение нескольких крупных объектов по обращению с ОЯТ и радиоактивными отходами (РАО) (Сайда-Губа, бухта Андреева, Гремиха, Атомфлот), что позволило вывезти из регионов базирования атомного флота на переработку на Урал большую часть ОЯТ, осуществить кондиционирование большого количества РАО, разместить его в ожидании захоронения на длительное хранение в специально построенном хранилище в Сайда-Губе, начать реабилитацию ряда радиационно загрязненных объектов и территорий [6]. Реализация этих мероприятий позволила значительно снизить уровень потенциальных угроз от выведенных из состава флотов объектов.

Пришло время рассмотреть возможности решения проблемы, связанной с ЗЯРОО.

На эту тему опубликовано много работ, в которых рассматриваются и предлагаются различные подходы к решению проблемы ЗЯРОО. Авторы данной статьи ранее также публиковали свои работы по различным аспектам этой тематики [7—9, см. также 10]. Настоящая же статья является попыткой обоб-

**Таблица 1. Суммарная активность техногенных радионуклидов, затопленных в виде РАО и затонувших с объектами, содержащими радиоактивные вещества, в 1946—1993 гг. в Арктике, Атлантике и Тихом океане**

**Table 1. Total activity of man-made radionuclides dumped as radioactive waste and sunk with objects containing radioactive substances in the Arctic, Atlantic and Pacific Oceans in 1946—1993**

Страна	Активность техногенных радионуклидов, ТБк				Доля суммарной активности, %
	α	β-γ	Сумма	Тритий	
<i>Арктические моря</i>					
СССР	Н. д.	38 011	38 011	Н. д.	44,87
Россия	Н. д.	0,7	0,7	Н. д.	—
Сумма	> 38 011,7			Н. д.	44,87
<i>Атлантический океан</i>					
Бельгия	29	2091	2120	787	2,50
Франция	8,5	345	353,5	Н. д.	0,42
Германия	0,02	0,18	0,20	Н. д.	< 0,01
Италия	0,07	0,11	0,18	Н. д.	< 0,01
Нидерланды	1,1	335	336,5	99	0,40
Швеция	0,94	2,3	3,24	Н. д.	< 0,01
Швейцария	4,3	4 415	4 419,3	3 902	5,22
Англия	631	34 456	35 087	10 781	41,42
США	Н. д.	2 942,2	> 2 942,2	Н. д.	3,47
Сумма	> 674,9	44 586,8	> 45 262,1	15 569	53,47
<i>Тихий океан</i>					
Франция	0,007	0,002	0,009	Н. д.	< 0,01
Япония	0,01	15,0	15,01	Н. д.	0,02
Южная Корея	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Новая Зеландия	0,01	1,05	1,06	Н. д.	< 0,01
Россия	Н. д.	1,39	> 1,39	Н. д.	< 0,01
СССР	Н. д.	874	> 874	Н. д.	1,03
США	Н. д.	554,5	> 554,5	Н. д.	0,65
Сумма	> 0,027	> 1 445,9	> 1 446	Н. д.	1,70
<i>Всего</i>	> 84 720			15 569	100,00

щитить и кратко изложить суть и состояние проблемы на сегодня, а также предложить по результатам сравнительного анализа доступные, безопасные и эффективные способы обращения с ЗЯРОО, которые позволят повысить безопасность персонала, населения и окружающей природной среды (ОПС).

Данная проблема возникла в 40-х годах прошлого столетия с началом атомной эры, когда человечество научилось и начало осваивать ядерную энергию в военных и мирных целях. Разработка и применение ядерных технологий принесли не только новый источник энергии, но и стали «поставщиками» вредных и опасных радиоактивных отходов, неизбежных спутников практически всех ядерных технологий. Поскольку полноценной инфраструктуры по безопасному обращению, хранению, переработке и захоронению РАО не было, начала распространяться практика сброса твердых радиоактивных отходов (ТРО) и слива жидких радиоактивных отходов в моря и океаны, считавшаяся допустимым способом захоронения этих отходов. Практически с начала атомной эры в течение 46 лет вплоть до 1993 г., когда Россия присоединилась к Лондонской конвенции 1972 г. по предотвращению загрязнения моря сбросами отходов и других материалов (ЛК-72), такие сбросы и сливы проводились многими странами, ведущими работы в ядерной сфере. В результате в океанах и морях были затоплены РАО общей активностью почти 85 ПБк. Подробные данные об активности техногенных радионуклидов и радиоактивных материалов, затопленных в виде РАО, приведены в табл. 1 [11, с. 413].

Сейчас, по завершении утилизации АПЛ и НК с ЯЭУ, настало время принимать решения о дальнейшем обращении с ЗЯРОО. В последние годы внимание к этой проблематике возросло. Это связано как с огромными запасами углеводородов и иных полезных ископаемых, разведанных в Арктике, так и с развитием транспортных возможностей Северного морского пути, на котором благодаря использованию мощных атомных ледоколов постоянно возрастает длительность периода навигации, а в ближайшие годы с вводом в строй новых ледоколов навигация станет круглогодичной.

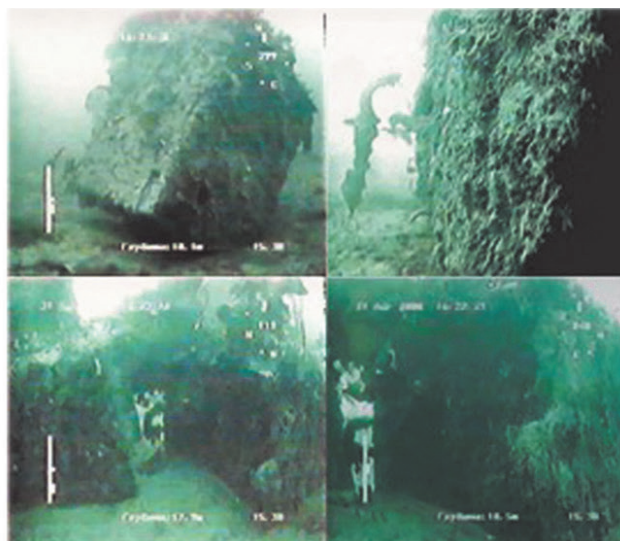


Рис. 2. Фото развалившихся контейнеров [11]  
 Fig. 2. Photo of degraded containers [11]

*Общая характеристика затопленных в акватории Арктики ЯРОО*

В соответствии с принятыми до 1993 г. решениями Советский Союз, а позже Российская Федерация затопили в выделенных районах Карского моря около 18 000 радиоактивных объектов, представляющих собой контейнеры с ТРО, крупногабаритные конструктивные элементы ядерных установок (парогенераторы, крышки реакторов), реакторные отсеки и трехотсечные реакторные блоки АПЛ, целые установки и даже целые суда и корабли с ЯЭУ. В настоящее время на акваториях Баренцева и Карского морей, включая заливы архипелага Новая Земля, находятся остатки тысяч ЗЯРОО. Наибольшая по количеству часть затопленных объектов (примерно 17 тыс. единиц из 18 тыс.) — это различные по размеру и толщине стенок контейнеры, изготовленные из разных материалов. Все они к настоящему времени не являются значимыми источниками радиационной опасности, поскольку их защитные барьеры под воздействием морской воды на протяжении десятков лет практически полностью разрушились, и это привело к вымыванию, растворению, разбавлению и естественной дезактивации поверхностных загрязнений (рис. 2).

На практике это означает, что из затопленных 18 тыс. объектов 17 тыс. уже не требуют никаких действий по реабилитации и их можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

Около 1000 радиоактивных объектов, оставшиеся на дне, весьма разнообразны по размерам, конструктивным материалам, величине содержащейся в них активности, степени загрязнения и т. п. Основной радиационный потенциал этой группы сосредоточен в семи объектах, содержащих ОЯТ, и представляющих наибольшую опасность в качестве потенциальных источников радиоактивного загрязнения ОПС. Конкретно это аварийно затонувшие

без специальной подготовки АПЛ Б-159 и «Комсомолец», специально подготовленные к затоплению (заполненные битумом, цементом, смесью на основе фурфурола) АПЛ К-27 с двумя реакторами, один из которых аварийный, и четыре объекта с ОЯТ. Потенциальную опасность меньшего уровня сохраняют также 19 судов с ТРО и 735 конструкций и блоков ЯЭУ без герметичной упаковки. В табл. 2 показаны оценки суммарной активности двух групп этих объектов по состоянию на 2000 и 2030 гг.

**Таблица 2. Оценки суммарной активности потенциально опасных ЗЯРОО по состоянию на 2000 и 2030 гг., Пбк**

**Table 2. Total activity estimates for the potentially hazardous DNRHO as of 2000 and 2030, PBq**

Группа объектов	На 2000 г.	На 2030 г.
Объекты с ОЯТ	10,0—13,0	5,0—6,5
Объекты с ТРО	0,6—0,7	0,3—0,35

Видно, что суммарная активность ЗЯРОО, содержащих ОЯТ, составляет более 90% всего радиационного потенциала ЗЯРОО.

*Сценарии гипотетических аварий с ЗЯРОО*

Экспедиционные обследования в районах затопления ЗЯРОО в Карском и Баренцевом морях к настоящему времени не выявили сколько-нибудь значительных выходов радионуклидов в ОПС. Тем не менее для обоснованного принятия того или иного решения о дальнейшей судьбе потенциально опасных ЗЯРОО необходимо иметь оценки возможных угроз и рисков, связанных с его реализацией.

Угрозы от ЗЯРОО заключаются в выходе радионуклидов, находящихся в объекте, в ОПС с дальнейшим распространением загрязнения воздуш-

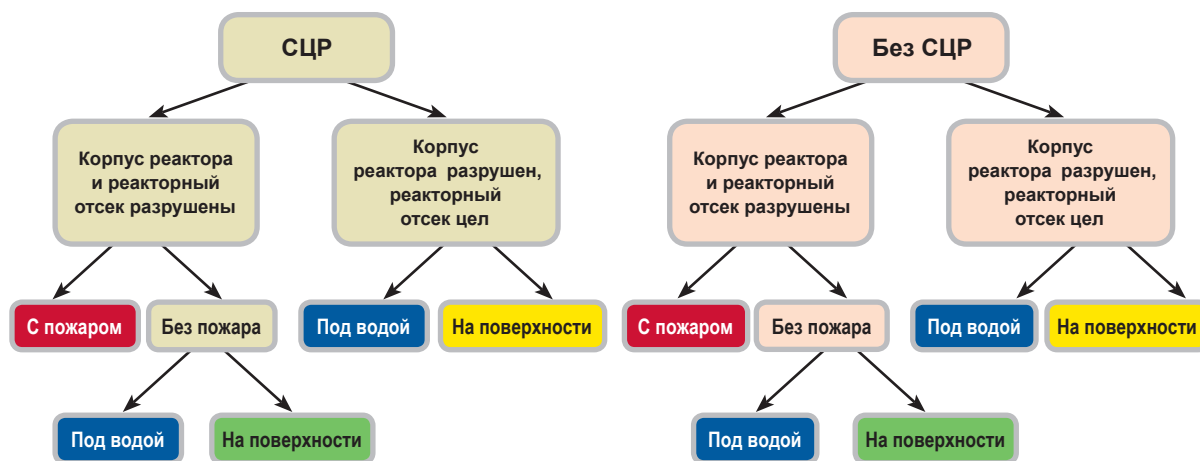


Рис. 3. Варианты гипотетических аварий ЗЯРОО. Составлено авторами  
 Fig. 3. Options of hypothetical DNRHO accidents. Compiled by the authors

ными и/или водными течениями и диффузионными процессами.

Выход радионуклидов за пределы объекта происходит в результате развития аварийных ситуаций, приводящих к разрушению защитных барьеров, изолирующих опасные радиоактивные материалы от ОПС [9].

Наиболее характерными сценариями гипотетических аварий с разрушением защитных барьеров ЗЯРОО являются:

- Разрушение защитных барьеров в результате коррозии конструкций за счет взаимодействия с морской водой.
- Разрушение защитных барьеров при аварии, вызванной внешним механическим воздействием (падение массивного стороннего объекта на рассматриваемый ЗЯРОО, вторичное затопление ЗЯРОО в ходе попытки его подъема на поверхность, акт диверсии и т. п.). В последнем случае возможно также возникновение пожара на объекте, что увеличит выход радионуклидов в атмосферу.
- Для объектов, содержащих делящиеся материалы, — возникновение самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) с полным или частичным разрушением активной зоны. Если СЦР происходит на поверхности при подъеме объекта, возможно также возникновение пожара.

Сценарии гипотетических аварий проиллюстрированы на рис. 3.

#### Возможные варианты и условия обращения с ЗЯРОО

Ясно, что затонувшие и затопленные объекты являются источниками угроз и рисков для человека и ОПС. Поэтому первое, что необходимо зафиксировать, это то, что уже имеющиеся угрозы и риски не должны возрастать ни при каких действиях, манипуляциях с ЗЯРОО, а новые риски не должны появиться. Есть одно исключение. Если для ликвидации или уменьшения имеющегося риска требуются действия, порождающие новый риск, то это допустимо только при условии, что суммарный результирующий риск

окажется меньше существовавшего ранее. Попробуем сравнить угрозы, сформулировав набор конкретных необходимых действий, составляющих каждый вариант обращения, и отметив положительные и отрицательные стороны вариантов, что позволит принять обоснованные решения. Общий концептуальный подход к выбору лучшего варианта обращения с затопленными ЯРОО с учетом анализа складывающейся ситуации в различные моменты времени можно сформулировать так:

**За реально доступные средства в разумные сроки мерами организационного и технического характера с использованием систем периодического и непрерывного мониторинга добиться удержания рисков, связанных с ЗЯРОО, в том числе для рыболовства и навигации в районе Северного морского пути, на приемлемом уровне. При этом недопустимо возрастание существующих угроз и появление новых взамен ликвидированных, если это не уменьшает суммарную угрозу.**

Существует множество вариантов обращения с ЗЯРОО, но все они по сути сводятся к трем обобщенным вариантам, которые рассмотрены ниже [12; 13]. Но прежде следует обсудить наиболее важный вопрос, от которого зависит вся дальнейшая деятельность в рамках рассматриваемой проблемы.

#### Необходимость определения статуса затопленных объектов

Для реализации любого из названных или каких-либо других вариантов обращения с ЗЯРОО сначала необходимо определить, сформулировать и узаконить статус затопленных ядерных и радиационно опасных объектов. Статус любого радиоактивного объекта определяется в соответствии с федеральными законами «Об использовании атомной энергии» [14] и «Об обращении с радиоактивными отходами» [15]. Сегодня ЗЯРОО «выпали» из всей системы классификации и учета ядерных и радиа-

ционных объектов. Их нельзя отнести ни к объектам использования атомной энергии, так как они в большинстве случаев не имеют ни ведомственной принадлежности, ни эксплуатирующих организаций и, следовательно, никем не эксплуатируются. Они не относятся к какой-либо категории или виду РАО, так как не соответствуют критериям отнесения РАО к тем или иным видам или категориям в соответствии с законом «Об обращении с радиоактивными отходами». Это ни объекты размещения РАО (не определены границы размещения), ни объекты хранения (не определены проектные сроки хранения), ни объекты захоронения (в соответствии с законом). По причине «бесхозности и неопределенности» они не прошли первичную регистрацию и не попали в единый реестр РАО, т. е. по сути являются «фантомами».

Единственное, что документально зафиксировано, это местоположение (известно не для всех объектов). Ни свойства, ни состав, ни иные подробности неизвестны и не зафиксированы. МЧС ведет учет ЗЯРОО, заносит в «Реестр подводных потенциально опасных объектов во внутренних водах и территориальном море Российской Федерации» их координаты и требует от неустановленных собственников (владельцев, пользователей, распорядителей) заполнять паспорта на «несуществующие» затопленные объекты.

Поэтому для каждого ЗЯРОО прежде всего должен быть определен правовой, административный, имущественный, нормативный и т. п. статус. Представляется рациональным по аналогии с понятием «Особые радиоактивные отходы» ввести понятие «Затопленные радиоактивные объекты», сформулировав условия отнесения объектов к данной группе, назначив распорядителей этими объектами от имени государства и передаваемые им права и обязанности.

После такой «легитимации» затопленных радиационно загрязненных (или ядерных) объектов исчезнут многие бюрократические и организационные препятствия на пути к ликвидации угроз и рисков, исходящих от этих объектов.

В настоящее же время полномасштабному развертыванию работ по реабилитации акваторий и прилегающих территорий препятствует ряд факторов:

1. Отсутствие компетентного органа федеральной исполнительной власти, назначенного и отвечающего за решение проблемы реабилитации арктической акватории от радиоактивных объектов (государственного заказчика — координатора).

2. Неполнота нормативно-правовой базы по регулированию вопросов, связанных с захоронением находящихся на дне ЯРОО при невозможности их реабилитации путем удаления из районов нахождения (в том числе по причине появления новых угроз, что запрещено определением концептуального подхода).

3. Неполнота нормативно-правовой базы по нормам допустимого содержания техногенных радио-

нуклидов в морской воде (отсутствуют соответствующие федеральные и международные нормы, действуют только ведомственные нормы ВМФ России для АПЛ, НК с ЯЭУ, атомных ледоколов и судоремонтных заводов).

*Рекомендации МАГАТЭ и необходимые распорядительные действия для реабилитации арктической акватории*

Важный вопрос связан с необходимостью определения степени очистки акватории от загрязнения или установления референтных уровней облучения в определенном диапазоне. В терминологии Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) реабилитация (remediation) — это любые мероприятия, которые могут проводиться в целях снижения радиационного облучения, вызываемого имеющимся радиоактивным загрязнением, посредством мер, применяемых в отношении собственно радиоактивного загрязнения (источника) или путей поступления облучения к людям. По нормам МАГАТЭ в ситуации существующего облучения референтные уровни могут быть установлены в диапазоне 1—20 мЗв/год. При установке таких уровней должен использоваться рекомендованный МАГАТЭ принцип «ALARA» (As Low As Reasonably Achievable — столь низко, сколь разумно достижимо).

Если у некоторых из оставленных на дне объектов мощность излучения превышает определенную критериями реабилитации в соответствии с принципом ALARA, можно применить меры по ограничению времени пребывания в указанной ограниченной зоне или по запрету на приближение к объекту более чем на определенное расстояние, либо другие организационные меры. Такие меры, согласно подходам МАГАТЭ, также могут рассматриваться в качестве реабилитационных.

В целом наиболее рациональным подходом к реабилитации представляется углубленная оценка ядерного и радиационного статуса объектов, в том числе совокупная оценка радиационных рисков для акваторий их нахождения и организация периодического либо постоянного наблюдения с одновременной разработкой технологий укрытия (консервации на месте) и других технических решений. Но помимо таких решений в первую очередь необходимо выполнить ряд организационно-распорядительных действий (некоторые — на уровне правительства):

1. Поручить федеральному органу исполнительной власти (или приравненной к нему структуре) организацию решения проблемы реабилитации арктических акваторий от затонувших и затопленных радиоактивных объектов, возложив на него функции государственного заказчика-координатора работ по указанной проблеме и наделив его правом распоряжаться данными объектами.

2. При принятии решения о допустимом уровне остаточного радиоактивного загрязнения рекомендовать применение норм МАГАТЭ для ситуации существующего облучения в сочетании с принципом

ALARA — добиваться настолько низких остаточных уровней, насколько это разумно достижимо (тем более в отсутствие многих норм на уровне национального регулирования).

3. Разработать нормативно-правовую базу для применения к ЗЯРОО особых правил (по аналогии с особыми РАО), позволяющих вести обращение с такими объектами на морском дне.

Все логические цепочки работ по обращению с ЗЯРОО должны завершаться ликвидацией либо значительным снижением угроз, исходящих от затопленных объектов, в том числе возникших в ходе указанных работ, и «не порождать новое ядерное наследие» (угрозы) ни в акватории, ни на берегу.

*Выбор на основе многофакторного анализа вариантов обращения с ЗЯРОО*

С учетом всего сказанного можно выбрать наиболее подходящий для каждого объекта (группы объектов) вариант обращения. Выбор одного из перечисленных выше вариантов диктуется сочетанием факторов различной природы, определенных по итогам ряда исследований, обсуждений, экспертных заключений. Какие же выводы можно сделать для различных объектов?

Для каждого рассматриваемого потенциально опасного ЗЯРОО конечным состоянием может быть один из двух базовых вариантов оставления объекта на дне:

- сооружение защитного укрытия с включением объекта в программу долгосрочного наблюдения (мониторинга) и принятия плана аварийного реагирования, включающего необходимые организационные и/или технические меры, включая превентивные, направленные на снижение радиационных угроз.
- включение объекта в программу долгосрочного наблюдения (мониторинга) без вмешательства и принятие плана аварийного реагирования с необходимыми организационными и/или техническими мерами, направленными на снижение радиационных угроз.

Разобравшись со структурой затопленных объектов, рассмотрим существующие варианты обращения с ними с целью реабилитации. Можно выделить три основных варианта обращения:

- подъем, транспортировка объекта на завод [12], обращение с объектом на берегу: выгрузка ОЯТ [8], утилизация по штатной схеме, отправка ОЯТ на переработку, ТРО на кондиционирование, длительное хранение, на подготовку к захоронению и захоронение;
- оставление объекта на дне, сооружение над ним защитного укрытия, организация наблюдения и мониторинга, разработка плана аварийного реагирования;
- оставление объекта на дне без вмешательства, организация наблюдения, разработка плана аварийного реагирования.

Рассмотрим эти варианты подробнее [13].

*Вариант 1. Подъем и утилизация на берегу*

Любой из вариантов работ с ядерно и радиационно опасными объектами сопряжен с определенными рисками. Это риски ядерного или радиационного характера, химические и пожарные, различные технологические риски и т. д. Но самым большой из них — риск возникновения самоподдерживающейся цепной реакции деления. Может ли возникнуть СЦР при работах по реабилитации арктических акваторий? Может, но при разных условиях для разных ЗЯРОО. Попробуем разобраться, как минимизировать риск такого события, и сравним его с другими рисками, связанными с различными объектами и способами обращения с ними.

Начнем с Б-159. Эта АПЛ имеет водо-водяные реакторы, которые перед фатальной буксировкой на судоремонтный завод (СМЗ) «Нерпа» были заглушены, а все органы управления приведены в положение, исключающее запуск реакторов. В соответствии с заключением Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники им. Н. А. Доллежала (НИКИЭТ), одобренным Физико-энергетическим институтом им. А. И. Лейпунского (ФЭИ), возникновение СЦР при нахождении АПЛ на дне при любых обстоятельствах исключено. В то же время в отношении возникновения СЦР в процессе подъема и транспортировки объекта таких заключений нет.

В нынешних условиях возросшей террористической и военной угрозы нахождение ядерного объекта на берегу в производственной зоне рядом с жилыми зонами связано с большим риском, чем нахождение его под водой в необитаемой зоне. Риск — это произведение вероятности события на ущерб, который может быть нанесен этим событием. Возникновение СЦР при нахождении Б-159 на дне исключено, а в процессе подъема, транспортировки, размещения на судоремонтном заводе с учетом террористической или военной угрозы — возможно. При этом в случае возникновения СЦР на поверхности выброс радионуклидов произойдет в атмосферу. Следствием этого станет быстрый перенос радиации на большие расстояния, загрязнение больших территорий, сильное облучение людей и т. д. Следовательно, независимо от способа подъема на поверхность и обращения с поднятым ЗЯРОО на берегу этот вариант неприемлем, так как он порождает повышенные риски, во много раз превышающие существующие, и создает дополнительные новые угрозы.

Оценки возможных последствий выброса радионуклидов в атмосферу при аварии на СРЗ «Нерпа» с возникновением СЦР проводились в рамках проекта «INSC/2013/ МС.04/13 — Технично-экономические исследования и разработка плана действий по безопасному и надежному обращению с радиационно опасными объектами, затопленными в арктических морях» (далее ТЭИ), выполненного Консорциумом европейских стран с участием ИБРАЭ РАН по заказу Еврокомиссии. Бенефициаром проекта была

**Таблица 3. Отношение концентрации <sup>137</sup>Cs (Бк/кг или Бк/л) в основных продуктах питания при аварии с выбросом 50 ТБк на СРЗ «Нерпа» к максимально допустимому уровню**

**Table 3. Ratio of <sup>137</sup>Cs concentration (Bq/kg or Bq/l) to the maximum permissible level in staple foods in case of accident at the shipyard “Nerpa” accompanied by a 50 TBq release**

Продукт	Расстояние от места аварии, км									
	0,5	1	2	5	10	20	25	50	100	150
Фрукты	11,9E3	34,6E2	10,6E2	2,3E2	721	20	13	3	0,4	0,08
Зерно	22,3E3	65E2	19,8E2	4,4E2	134	38	25	5,5	0,75	0,15
Мясо	54,6E3	15,9E2	4,9E2	1,1E2	33	9,3	6	1,3	0,2	0,04
Молоко	20,3E3	59E2	18E2	4E2	122	35	22	5	0,7	0,14

ГК «Росатом». Результаты расчетов в приложении к заключительному отчету показывают в частности, что годовая эффективная доза для взрослых за счет внешнего облучения и аспирации при выбросе 50 ТБк при наиболее неблагоприятных погодных условиях на расстоянии 2 км от места аварии достигает 600 мЗв, снижаясь до 12 мЗв на расстоянии 10 км и до 2,5 мЗв на расстоянии 25 км (расстояние от СРЗ «Нерпа» до Мурманска).

В табл. 3 проведено сравнение концентрации <sup>137</sup>Cs (Бк/кг или Бк/л) в основных продуктах питания и максимально допустимых уровней концентрации в зависимости от расстояния от места аварии.

Таким образом, следуя провозглашенному выше концептуальному подходу, вариант 1 нужно отвергнуть как создающий дополнительные риски, превышающие существующие.

Обращаясь к АПЛ К-27, заметим, что возникновение СЦР в ее реакторах возможно как в положении на дне, так и на поверхности в случае разгерметизации защитных барьеров и поступления до 5—6 л воды в активную зону неповрежденного реактора [9]. Также как для рассмотренной выше АПЛ Б-159, последствия выброса в атмосферу будут значительно тяжелее, чем при аварии на дне, но на порядок ниже, чем для Б-159, из-за меньшей накопленной в ОЯТ активности (см. далее вариант 3). По той же причине, что для Б-159, этот вариант неприемлем.

Что касается четырех других ЗЯРОО с ОЯТ в реакторах (экранной сборки с частью топлива реактора атомного ледокола «Ленин», двух реакторных отсеков АПЛ К-11 и К-19, реактора АПЛ К-141), эти объекты были тщательно законсервированы перед затоплением. К тому же их реакторы относятся к типу водо-водяных, и попадание воды в их активные зоны само по себе не может служить причиной возникновения СЦР, а лишь ускорит деградацию топлива. Время, потребное для деградации всех защитных барьеров за счет коррозии для этих объектов оценивается [16] в несколько сотен или даже тысяч лет, так что основные дозообразующие нуклиды уже распадутся. Следуя принципу ALARA, вариант 1 и для этих объектов следует отвергнуть.

К тому же все ЗЯРОО с ОЯТ (кроме Б-159) содержат аварийное топливо, которое было невозможно извлечь до затопления. Это может оказаться невозможным и сейчас. Тогда поднятые объекты необходимо будет разместить в специально создаваемом хранилище [8], что потребует значительных дополнительных затрат времени и финансов, а это противоречит основному концептуальному подходу.

*Вариант 2. Консервация на дне*

При выборе этого варианта необходимы геологическое исследование дна под объектом и будущим укрытием для определения его несущей способности и возможности установки укрытия, а также создание системы мониторинга состояния сооруженного укрытия и радиационной обстановки внутри и вокруг него. Также требуется разработка плана аварийного реагирования на случай нарушения стабильности укрытия и утечки радиации.

Этот вариант целесообразно применить для обращения с К-27, так как сооружение защитного укрытия на дне добавляет для нее еще один защитный барьер безопасности на случай СЦР и избавляет от неизбежной необходимости строить пункт длительного хранения объектов с ОЯТ, что связано с большими затратами времени на поиск подходящего места, оформление многочисленных согласований, проектирование, строительство такого объекта и... взаимодействие с населением. А к тому же и серьезных финансовых ресурсов.

*Вариант 3. Оставление на дне без вмешательства с организацией периодического или постоянного мониторинга и разработкой плана аварийного реагирования*

При выборе варианта оставления объекта без вмешательства под наблюдением должны быть определены необходимость и объемы периодического контроля и непрерывного мониторинга, а также предусмотрены превентивные меры организационного и технического характера, включая план аварийного реагирования в случае разрушения защитных барьеров и утечки радиации.



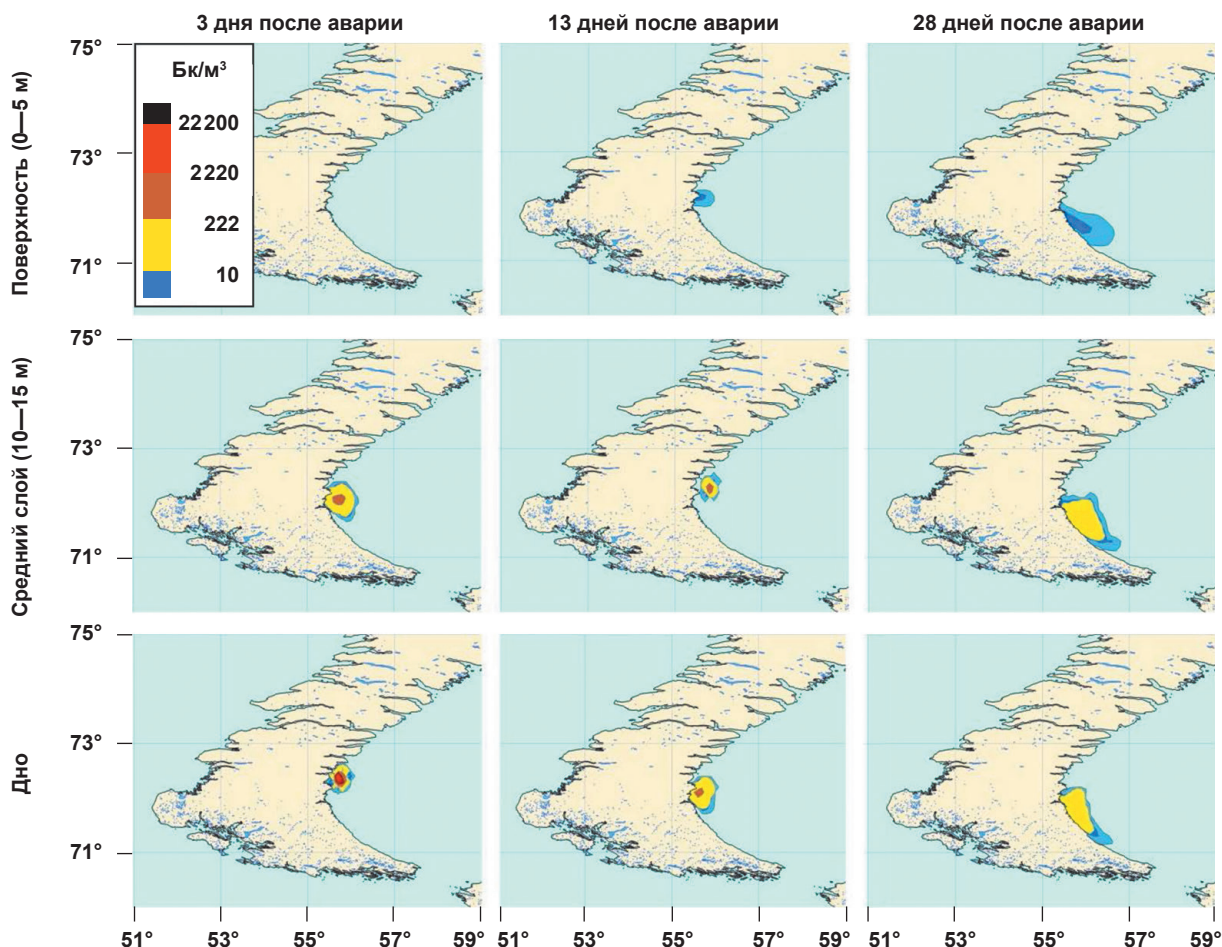


Рис. 4. Распространение загрязнения в результате СЦР с выбросом 6 Тб на АПЛ К-27 при нахождении ее на дне.  
Расчет авторов

Fig. 4. Short-term forecast of contamination propagation in result of UCR with release 6Tb  $^{137}\text{Cs}$  at K-27 at the bottom.  
Authors calculations

Конечным состоянием рассматриваемых ЗЯРОО является один из вариантов (2-й или 3-й) в зависимости от принятого решения о сооружении укрытия.

Выбор конкретного способа и технологии реабилитации может быть сделан лишь после углубленного комплексного инженерного и радиационного обследования объектов и получения ответов на вопросы о возможности изоляции ЗЯРОО на дне.

Из трех описанных выше способов обращения с ЗЯРОО первый вариант был отвергнут из-за возросшего риска террористического или военного акта («Крымский мост», «Северный поток-2», порт Усть-Луга и т. д.). Из оставшихся двух возможностей — сооружения укрытия или оставления объекта без вмешательства под наблюдением сооружение укрытия оправдано только для К-27 (реакторы на промежуточных нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем — ЖМТ). Остальные ЗЯРОО — это водо-водяные реакторы. Они специально были подготовлены для затопления так, чтобы СЦР не возникла. Единственная не подготовленная к затоплению АПЛ — Б-159. Для нее была проведена оценка ядерной безопасности на

предмет возможности возникновения СЦР и дано заключение НИКИЭТ о невозможности такого события при нахождении на дне без вмешательства. Что касается не мгновенного выброса из-за СЦР, а медленного истечения активности в положении на дне, то проведенное моделирование показало, что вытекающая активность поднимется к поверхности через четыре недели и даст уровень загрязнения не выше допустимого по нормам ВМФ. Таким образом, четыре объекта с установками ВВР могут быть оставлены на дне без вмешательства и под наблюдением.

По К-27 кроме специальной подготовки к затоплению и моделирования последствий возникновения СЦР целесообразно заказать подготовку заключения о состоянии ядерной безопасности АПЛ при ее нахождении на дне. Результаты моделирования возможных последствий возникновения СЦР показали, что последствия могут быть неприятными, но не катастрофическими. Все эти результаты в сжатой форме приведены на рис. 4 и 5.

В случае выхода активности из ЗЯРОО в ОПС, какой бы характер этот выход ни носил (медленное

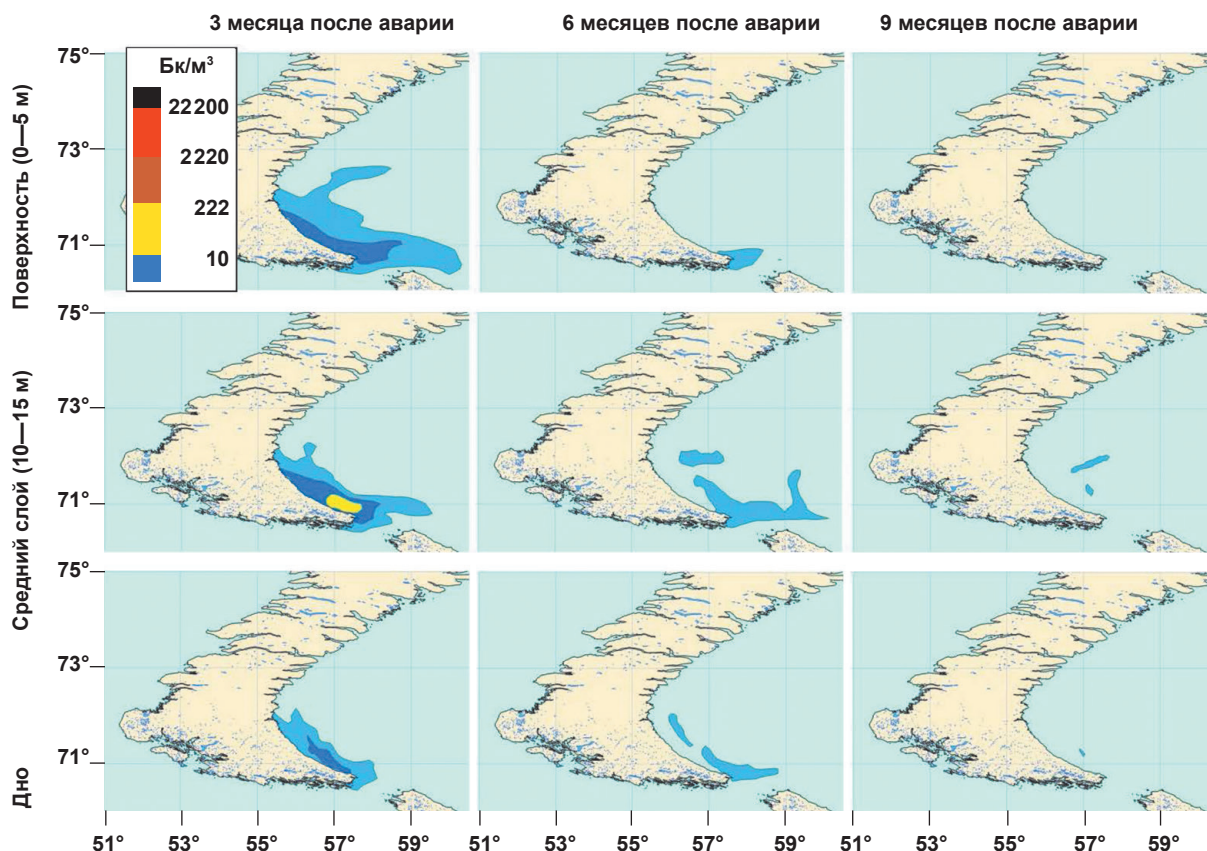


Рис. 5. Среднесрочный прогноз распространения загрязнения при максимальном залповом выбросе 6 Тбк <sup>137</sup>Cs из находящейся на дне АПЛ К-27. Расчеты авторов  
 Fig. 5. Medium-term forecast of contamination propagation in result of UCR with release 6 Tb <sup>137</sup>Cs, at K-27 at the bottom. Authors calculations

длительное истечение или импульсный взрывной характер), распространение радионуклидов, вышедших в атмосферу, будет быстрее и на большие площади, чем в случае выхода их во время нахождения объектов на глубине в толще воды. Значит, в последнем случае и негативные последствия выхода нуклидов в воду будут меньше, чем при выходе в атмосферу. Выход же в атмосферу возможен только при подъеме и нахождении на суше.

При этом пятно загрязнения при нахождении АПЛ на дне выходит на поверхность только через две недели после аварии. Затем оно смещается на юг вдоль побережья Новой Земли. При этом концентрация радионуклидов в течение первого месяца не достигает 100 ПДК, являющейся опасной концентрацией. Краткосрочный прогноз распространения загрязнения при максимальном залповом выбросе 6 Тбк <sup>137</sup>Cs из находящейся на дне АПЛ К-27 с ЖМТ ЯЭУ при аварии с возникновением СЦР приведен на рис. 4.

Среднесрочный прогноз распространения загрязнения при максимальном залповом выбросе 6 Тбк <sup>137</sup>Cs из находящейся на дне АПЛ К-27 с ЖМТ ЯЭУ при аварии с возникновением СЦР проиллюстрирован рис. 5.

### Заключение

ЗЯРОО, содержащие отработавшее ядерное топливо и радиоактивные отходы, продолжают оставаться наиболее масштабными составляющими радиозэкологического загрязнения северо-запада арктического региона.

Выполненные натурные исследования свидетельствуют, что в настоящее время эти объекты не представляют реальной радиозэкологической 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 еще более актуальной из-за террористической опасности.

Дальнейшее нахождение большого числа радиационно опасных объектов на дне такого уникального объекта, как Арктический бассейн, без систематического радиозэкологического 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 ЗЯРОО, в том числе возможного подъема некоторых из них при условии стабилизации внешнеполитической обстановки, пресечения нарастания террористической активности и провокационной агрессивности некоторых стран.

### Благодарность

Цикл исследований по обращению с ЗЯРОО проводился по инициативе и при участии ушедшего из жизни академика Ашота Аракеловича Саркисова. Авторы выражают благодарность своему научному руководителю, многие годы возглавлявшему исследования по данной проблеме в ИБРАЭ РАН и привлечшему к ней внимание и интерес мировой общественности, а также коллегам по ИБРАЭ, НИКИЭТ, НИЦ «Курчатовский институт», ФЭИ и ГК «Росатом» за доброжелательную критику, творческие обсуждения и конструктивные предложения по подготовке, обоснованию и организации исследований в целях реабилитации арктической акватории от затопленных ядерных и радиационно опасных объектов.

### Финансирование

Данная работа была выполнена при поддержке гранта № 20-19-00615-П Российского научного фонда.

### Литература/References

1. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. — Утв. указом Президента РФ от 19 апреля 2017 г. № 176. The Strategy for Environmental Safety of the Russian Federation for the period until 2025. Approved by the Decree of the President of the Russian Federation dated 19.04.2017 no. 176.

2. Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации до 2025 года. — Утв. указом Президента РФ от 13 октября 2018 г. № 585. Basic Principles of State Policy of the Russian Federation in the Field of Ensuring the Nuclear and Radiation Safety of the Russian Federation until 2025. Approved by the Decree of the President of the Russian Federation dated 13.10.2018 no. 585.

3. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. — Утв. Президентом РФ 26 октября 2020 г. № 645. The Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring the National Security until 2035. Approved by the President of the Russian Federation dated 26.10.2020 no. 645.

4. План развития Северного морского пути на период до 2035 года. — Утв. распоряжением Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115-р.

The Plan for the Development of the Northern Sea Route until 2035. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 01.08.2022 no. 2115-p.

5. Саркисов А. А., Большов Л. А., Антипов С. В. Разработка «Стратегического Мастер-плана утилизации выведенного из эксплуатации российского атомного флота и реабилитации радиационно-опасных объектов обслуживающей его инфраструктуры» / The National Academies Press. — Washington, D.C., 2005. — 25 с.

Antipov S., Bolshov L., Sarkisov A. 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. The National Academies Press. Washington, D.C., 2005, pp. 65—80.

6. Саркисов А. А., Большов Л. А., Антипов С. В. Итоги пятилетней реализации и перспективы дальнейшего использования СМП // Изв. РАН. Энергетика. — 2013. — № 2. — С. 4—13.

Sarkisov A. A., Bolshov L. A., Antipov S. V. Results of Five-Year Implementation and Prospects for Further SMP Use. Izvestiya RAN. Power Engineering, 2013, no. 2, pp. 4—13. (In Russian).

7. Саркисов А. А., Антипов С. В., Высокый В. Л. и др. Реабилитация арктической акватории от затопленных ядерных и радиационно опасных объектов — актуальная задача развития Арктики // Мор. вестн. — 2020. — Спец. вып. № 1 (14). — С. 116—120.

Sarkisov A. A., Antipov S. V., Vysotsky V. L., Nikitin V. S., Sosunov G. S. Rehabilitation of the Arctic aquatic area from dumped nuclear and radiation hazardous objects — an urgent task of the development of the Arctic. Morskoi vestnik, 2020. Special issue № 1 (14), pp. 116—120. (In Russian).

8. Антипов С. В., Кобринский М. Н., Шведов П. А. и др. Особенности обращения с затопленной в Арктике АПЛ «К-27» с ядерным топливом в реакторах после ее возможного подъема // Арктика: экология и экономика. — 2020. — Т. 10, № 1. — С. 37—44. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-37-44.

Antipov S. V., Kobrinsky M. N., Shvedov P. A., Kulikov K. N., Nizamutdinov R. A., Lodochnikov S. V. Special Features of Handling Non-defueled K-27 Nuclear Submarine Dumped in the Arctic Following Its Prospective Lifting. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 1 (37), pp. 37—44. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-37-44. (In Russian).

9. Саркисов А. А., Антипов С. В., Биляшенко В. П. и др. Оценка выхода радионуклидов в окружающую среду при потенциальной аварии в ходе подъема и транспортировки затопленной АПЛ «К-27» // Изв. Акад. наук. Энергетика. — 2015. — № 2. — С. 16—29.

Sarkisov A. A., Antipov S. V., Bilashenko V. P. et al. Assessment of radionuclide release into the environment

in result of potential emergency in course of lifting and transportation of the dumped nuclear submarine “K-27”. *Izvestiya Akademii nauk. Energetika*, 2015, no. 2, pp. 16—29. (In Russian).

10. Саркисов А. А. К вопросу о ликвидации радиоактивных загрязнений в Арктическом регионе // *Вестн. РАН*. — 2019. — Т. 89, № 2. — С. 107—124. — URL: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873892107-124>.

Sarkisov A. A. The Question of Clean-Up of Radioactive Contamination in the Arctic Region. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 1, pp. 7—22. DOI: 10.1134/S1019331619010106.

11. 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. — 699 с.

Sarkisov A. A., Sivintsev Yu. V., Vysotskiy V. L., Nikitin V. S. Nuclear Legacy of the Cold War at the Arctic Bottom. Radio-ecological, technical and economic problems of radiation rehabilitation of the seas. Moscow, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, 2015, 699 p. (In Russian).

12. Краморенко А. В., Асминин В. В., Чумаров Р. И. и др. Технология подъема затопленных в Арктике ядерно и радиационно опасных объектов, основанная на применении гидравлических тросовых домкратов // *Арктика: экология и экономика*. — 2018. — № 1 (29). — С. 116—124. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-116-124.

Kramorenko A. V., Asminin V. V., Chumarov R. I. The technology of lifting nuclear- and radiation-hazardous fa-

cilities dumped or sunken in the Arctic based on the use of hydraulic cable jacks. *Arctic: Ecology and Economy*, 2018, no. 1 (29), pp. 116—124. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-116-124. (In Russian).

13. Саркисов А. А., Антипов С. В., Билашенко В. П., Высоцкий В. Л. Стратегические подходы к планированию обращения с затопленными объектами атомного флота // *Изв. РАН. Энергетика*. — 2013. — № 2. — С. 86—89.

Sarkisov A. A., Antipov S. V., Bilashenko V. P., Vysotskiy V. L. Strategic Approach to Planning Management with Dumped Objects of the Nuclear Fleet. *Izvestiya Akademii nauk. Energetika*, 2013, no. 2, pp. 86—89. (In Russian).

14. Федеральный закон «Об использовании атомной энергии» от 11 ноября 1995 г. № ФЗ-170.

Federal Law “On the Use of Atomic Energy” dated November 11, 1995 no. FZ-170.

15. Федеральный закон «Об обращении с радиоактивными отходами» от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ.

Federal Law “On the Management of Radioactive Waste” dated July 11, 2011 no. 190-FZ.

16. Антипов С. В., Билашенко В. П., Высоцкий В. Л. и др. Оценка и прогноз состояния защитных барьеров объектов, затопленных в Арктике // *Безопасность ядер. технологий и окружающей среды*. — 2012. — № 4. — С. 19—27.

Antipov S. V., Bilashenko V. P., Vysotskiy V. L., Sotnikov V. A., Khokhlov I. N. Assessment and prediction of protection barrier state of the objects dumped in the Arctic. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologii i okruzhayushchei sredy*, 2012, no. 4, pp. 19—27. (In Russian).

### Информация об авторах

**Антипов Сергей Викторович**, доктор технических наук, заведующий отделом, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: santipov@ibrae.ac.ru.

**Билашенко Вячеслав Петрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: bilvp@ibrae.ac.ru.

**Кобринский Михаил Натанович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: mnk@ibrae.ac.ru.

**Шведов Павел Алексеевич**, заместитель заведующего отделом, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: spa@ibrae.ac.ru.

## RADIATION SAFETY ISSUES IMPOSED BY SUNKEN NUCLEAR AND RADIATION HAZARDOUS OBJECTS AT THE ARCTIC WATER AREA BOTTOM

**Antipov, S. V., Bilashenko, V. P., Kobrinsky, M. N., Shvedov, P. A.**

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on November 18, 2024

### For citing

*Antipov S. V., Bilashenko V. P., Kobrinsky M. N., Shvedov P. A.* Radiation safety issues imposed by sunken nuclear and radiation hazardous objects at the Arctic water area bottom. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 85—97. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-1-85-97. (In Russian).

### Abstract

The paper raises the issues of necessity and possibility of the Arctic water area remediation from sunken nuclear and radiation hazardous objects (DNRHO). Information about amount, composition and condition of dumped/sunken radiation hazardous objects is given in the paper along with descriptions and analysis of various possible management options in order to minimize the threats to humans and the environment. The authors consider the comparative analysis results of various options for managing these objects. Recommendations are given to reduce the existing risks and minimize the threats.

**Keywords:** *Arctic zone of the Russian Federation, Northern Sea Route, dumped radioactive objects, remediation of water areas from dumped nuclear and radiation hazardous objects, DNRHO management options.*

### Funding

The Russian Science Foundation grant supported the study (project no. 20-19-00615-П “Research into radioecological problems of the Russian Arctic to enhance radiation and ecological safety of humans and the environment in the conditions of intensive use of offshore and coastal nuclear power plants for the advanced development of the region”).

### Acknowledgements

The authors express their gratitude to our research supervisor, the late academician Ashot Arakelovich Sarkisov, who for many years headed this investigation direction at IBRAE RAN and attracted attention and interest of the world community to this problem. The authors also thank their colleagues at IBRAE RAN, NIKIET, NRC KI, IPPE and the State Corporation Rosatom for their friendly criticism, creative discussions and constructive proposals for organizing the work on the remediation of the Arctic seas from dumped nuclear and radiation hazardous objects.

---

### Information about the authors

*Antipov, Sergey Victorovich*, Doctor of Engineering Science, Head of Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, Russia, 115191).

*Bilashenko, Vyacheslav Petrovich*, PhD of Engineering Science, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, Russia, 115191).

*Kobrinsky, Mikhail Natanovich*, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, Russia, 115191).

*Shvedov, Pavel Alekseevich*, Deputy Head of Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, Russia, 115191).

© Antipov S. V., Bilashenko V. P., Kobrinsky M. N., Shvedov P. A., 2025