УДК 621.039.76

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ АРКТИКИ ЗАТОПЛЕННЫХ И ЗАТОНУВШИХ ОБЪЕКТОВ, СОДЕРЖАЩИХ РАДИОНУКЛИДЫ

(материалы доклада в форме расширенной презентации)

С. В. Антипов[1], А. В. Григорьев[2], М. Н. Кобринский[1], И. А. Савельев[3]

[1] ИБРАЭ РАН, г. Москва, Россия
[2] ГК «Росатом», г. Москва, Россия
[3] ЗАО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск, Россия

17 декабря 1958 г. от промышленности в состав ВМФ была принята ПЕРВАЯ советская атомная подводная лодка К-3 «Ленинский Комсомол». Недочетов было достаточно много. В том числе они касались атомных энергетических установок (АЭУ). При устранении неисправностей АЭУ неизбежно образовывались радиоактивные отходы (РАО). Их объемы становились настолько велики, что мощностей хранения судостроительных и судоремонтных заводов, а также береговых технических баз флота катастрофически не хватало. Поэтому было принято в то время, по всей видимости, единственно правильное решение – топить их во временных упаковках в местах, где отсутствует судоходство. Первые операции по затоплению начались в 1967 г. Завершилась такая практика только в 1991 г. В целом за этот период было проведено 80 операций. Было затоплено ~17 000 объектов, некоторые из которых содержали отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) разного уровня обогащения.

В 1982 г. результаты обследования показали, что содержание Cs-137 в южной части Баренцева моря достигало 20–40 Бк/м^3, что почти в 10 раз выше фона, обусловленного глобальными выпадениями.

Интенсивная промышленная деятельность в Арктике, развивающаяся в последние годы в результате разработки месторождений углеводородов, добычи различных минералов, нарастания транспортных потоков, развития береговой инфраструктуры и выполнения прочих видов промышленных работ, допустима только при наличии разумного долгосрочного баланса между экономическими выгодами и требованиями по защите окружающей среды.

Проблема затопленных ядерно- и радиационно опасных объектов (ЗЯРОО) существует, и она находится в центре внимания руководства страны и Госкорпорации «Росатом».

В ходе современных научных проработок по анализу различных сценариев гипотетических аварийных ситуаций был сделан вывод о том, что наличие на морском дне объектов с ОЯТ может стать источником не потенциальной, а реальной угрозы радиоактивного загрязнения. Из всех 17 000 объектов выделяют 6 наиболее опасных, но особую обеспокоенность вызывают атомные подводные лодки (АПЛ) К-27 и Б-159, которые могут стать источником радиоактивного загрязнения Баренцева, Карского, Белого морей и Северного Ледовитого океана.

АПЛ Б-159 не готовилась к затоплению, поэтому возможность выхода радиоактивных веществ за пределы корпуса реактора достаточно высока. Кроме этого, подводная лодка затонула недалеко от города Мурманска, а также на пути мореплавания и рыбного промысла. И в случае аварии местные подводные течения разнесут радиоактивные вещества не только по Баренцеву морю, но и в Белое море.

АПЛ К-27 была подготовлена к затоплению, поэтому внутри прочного корпуса были созданы дополнительные барьеры безопасности (заполнены отвердителем

на основе фурфурола) против попадания морской воды в активную зону. Однако в ходе подготовки к выгрузке ОЯТ из реактора другой АПЛ класса «Альфа», заводской номер 900, было установлено, что барьеры безопасности, аналогичные созданным на АПЛ К-27, были разрушены, и внутри полостей находился конденсат. Следовательно, подобная ситуация возможна и на затопленном объекте. Документально консервация АПЛ сейчас рассчитана на срок 50 лет, и в настоящее время, по прошествии 42 лет, этот срок начинает истекать. В 2020–2021 гг. проведенные работы показали, что в ситуации разрушения барьеров безопасности АПЛ К-27 для выхода реактора в критику достаточно чуть больше 1 л морской воды, а в активной зоне могут быть пустоты объемом до 18 л. Поэтому для АПЛ К-27 вероятность самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) не исключается, в том числе не исключается СЦР взрывного характера (зависит от скорости поступления воды в активную зону) – как гипотетический сценарий развития аварии).

Специалистами при подготовке к работам по чистке Арктики:

- *проведена инвентаризация затопленных объектов (составлена База данных и Карта);*
- *выбраны 6 наиболее опасных объектов из 17 000;*
- *рассмотрен 21 сценарий выхода нуклидов и воздействия на население и окружающую среду;*
- *определены предпочтительные сценарии обращения (подъем и утилизация или долгосрочное наблюдение);*
- *учтены такие значимые аспекты, как: природный, социально-экономический, стратегический, политический, безопасный.*

Возможные сценарии обращения с АПЛ обсуждаются, но, например, для К-27, предпочтительный вариант с экономической, технической, нормативной стороны разрабатываемой концепции – исключительно подъем и утилизация.

Доклад был представлен на Всероссийской конференции «Биосферная совместимость атомной энергетики» 12 марта 2024 г. (Екатеринбург, Россия).

Ключевые слова: атомфлот; радиоактивные отходы; отработанное ядерное топливо.

VI Всероссийская научно-практическая конференция
«Биосферная совместимость атомной энергетики» «БСАЭ-2024»

Оценки влияния на окружающую среду Арктики затопленных и затонувших объектов, содержащих радионуклиды

Антипов Сергей Викторович, заместитель директора ИБРАЭ РАН
Григорьев Анатолий Владимирович, руководитель проектов МТП Госкорпорации «Росатом»
Кобринский Михаил Натанович, заместитель заведующего отделом ИБРАЭ РАН
Савельев Иван Александрович, начальник научно-исследовательской лаборатории ядерно-радиационной безопасности АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

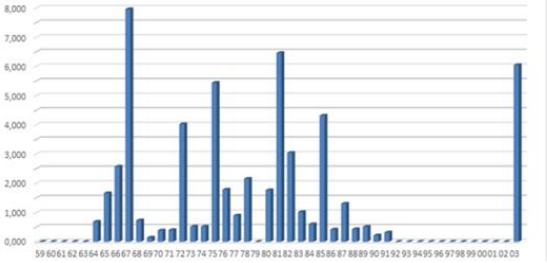
г. Екатеринбург, Россия
12–13 марта 2024 г.

Слайд 1

Ядерно- и радиационно опасные объекты на дне арктических морей

Было совершено 80 операций по затоплению в Арктике различных объектов: АПЛ, реакторных отсеков и судов, а также оборудования АЭУ и контейнеров с ТРО на отметки глубин от 20 до 300 м.

График операции в период 1959–1991 г. 2003 г *.



Места затопления объектов

Наименование	Было	Н. В.
АПЛ	3	5 ЯР
Реакторные отсеки	5	3 ЯР с ОЯТ
ЯР АПЛ зак.421	1	1
Экранная сборка а/л «Ленин»	1	1
Суда с ТРО	19	19
Радиоактивные конструкции	735	нет
Контейнеры с ТРО	17 тыс.	менее 1 тыс.

Общий объем ≈ 60 000 м^3
Общая активность ≈ 1 000 Кюри
Для сравнения: США с 1946 по 1970 г. сбросили в океан 86 758 контейнеров с радиоактивными отходами

Слайд 2

Основные этапы оценок рисков ЗЯРОО

По результатам Проекта ЕС «INSC/2013/ MC.04/13 – Технико-экономические исследования и разработка плана действий по безопасному и надежному обращению с радиационно опасными объектами, затопленными в Арктических морях»

- Составление и актуализация реестра ЗЯРОО;
- Определение наиболее опасных объектов;
- Разработка сценариев аварийных ситуаций;
- Составление и оценка возможных вариантов обращения;
- Выбор оптимальных вариантов обращения.

Слайд 3

Формирование исходных данных и их актуализация в период 1993–2016 гг.

Источники:

1. «Белая книга, 1993» 2. Отчет МАГАТЭ № 938, 1997 г. 3. Отчет МАГАТЭ № 1105, 1999 г.
4. Отчет Консорциума ЕК («Госкорпорация «Росатом») в 2016 г. 5. «Белая книга, 2000»

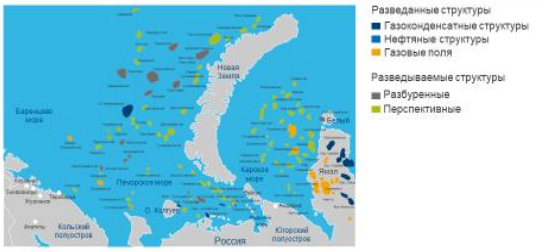
Анализ данных по радиоактивности показал:

- наличие строгой категоризация объектов;
- показатели активности:
- наличие отходов, содержащих ОЯТ;
- предположительные выбросы РАО.

Дополнительная информация:

- расстояние до берега;
- зоны рыболовства, добыча аквакультуры, нефтегазоносные районы, арктический туризм.

Схема нефтегазоносности Баренцево-Карского региона



Потенциальные пользователи

Доступ к согласованной базе данных можно получить в отчете (п. 4) при отображении файла Excel , который предоставляет возможность применения фильтров для фиксирования конкретных характеристик объектов и позволяет установить географическое положение места проведения каждой операции захоронения и категорию объектов.

Слайд 4

Определение наиболее опасных объектов

Оценка проводилась для объектов, внесенных в базу данных.
Использовалось два альтернативных метода:

1. Метод, основанный на концепции «прохода» радиоактивных загрязнителей от источника (затонувший объект) к целям (окружающая среда и население).
2. Метод, определенный приказом МЧС России № 105 от 28.02.2003 «Об утверждении требований по предупреждению чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения».

Перечень наиболее опасных объектов представлен в таблице

Название	Море, район	Год	Глубина	Тип объекта
Б-159	Баренцево	2003	249	Затонувшая АПЛ с 2 реакторами
К-27	Карское, залив Степового	1981	33	Затопленная АПЛ с 2 ЖМТ реакторами
К-19	Карское, залив Степового	1965	20	Затопленный РО с 2 реакторами
К-11	Карское, залив Абросимова	1966	20	Затопленный РО с 2 реакторами (1 с ОЯТ)
К-140	Карское, НЗ впадина	1974	300	Затопленный реактор
ЭС а/л "Ленин	Карское, залив Цивольки	1967	50	Затопленная экранная сборка с ~60 % ОЯТ

Результаты оценок по обоим методам совпали

Слайд 5

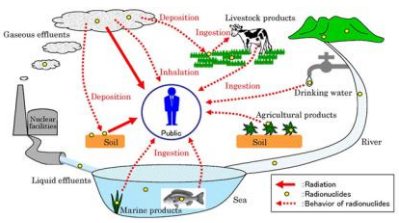
Перечень сценариев и схема оценок

Перечень сценариев для математического моделирования

№	Объект	Сценарии	Координаты (сев. широты/вост.длготы)	Глубина, м	Выброс, (ТБк/год)	
1	К-159	Взрыв на дне	69°22,4′ / 33°50,4′	249	50	100 / 570*
2		Взрыв на поверхности		0	50	100 / 570*
3		Утечка на дне		249	4	12
4	К-27	Взрыв на дне	72°24′31″ / 55°39′43″	33	8	80 / 210*
5		Взрыв на поверхности		0	8	80 / 210*
6		Утечка на дне		33	0,08	0,8
7	К-11 (285)	Взрыв на дне	71°56′20″ / 55°32′54″	20	0,9	9
8		Взрыв на поверхности		0	0,9	9
9		Утечка на дне		20	0,045	0,45
10	РО К-19 (901)	Взрыв на дне	71°56′20″ / 55°32′54″	20	8	8,4
11		Взрыв на поверхности		0	8	8,4
12		Утечка на дне		20	0,04	0,4
13	Реактор К-140 (421)	Взрыв на дне	72°40′ / 58°10′	300	0,2	2
14		Взрыв на поверхности		0	0,2	2
15		Утечка на дне		300	0,05	0,5
16	ЭС «Ленин»	Взрыв на дне	74°17′34″ / 58°53′40″	65	2	20
17		Взрыв на поверхности		0	2	20
18		Утечка на дне		65	0,12	1,2
19	Гремиха	Взрыв на поверхности	68°07′04″ / 39°37′51″	0	3	6
20	о-в Колгуев	Взрыв на поверхности	74°17′34″ / 46°23′23″	0	8	45
21	Карский пролив	Взрыв на поверхности	70°33′54″ / 58°09′55″	0	8	45

Схема оценок

Приоритет при оценках – человек



Слайд 6

Исходные данные для оценок аварийных ситуаций

POCATOM

Содержание активности

Наименование	Активность, ТБк
Б-159 (2 ЯР с ОЯТ)	2 600
ЭС а/л «Ленин»	1 200
К-27 (2 ЯР с ОЯТ)	390
РБ К-11	45
РБ К-19	42
РБ К-140	10

Выброс активности при СЦР

Наименование	Источник, ТБк	
	Умеренный	Максимальн
Б-159 (2 ЯР с ОЯТ)	50	100/570*
ЭС а/л «Ленин»	2	20*
К-27 (2 ЯР с ОЯТ)	8	80/210*
РБ К-11	0.9	9
РБ К-19	0.8	8
РБ К-140	0.2	2

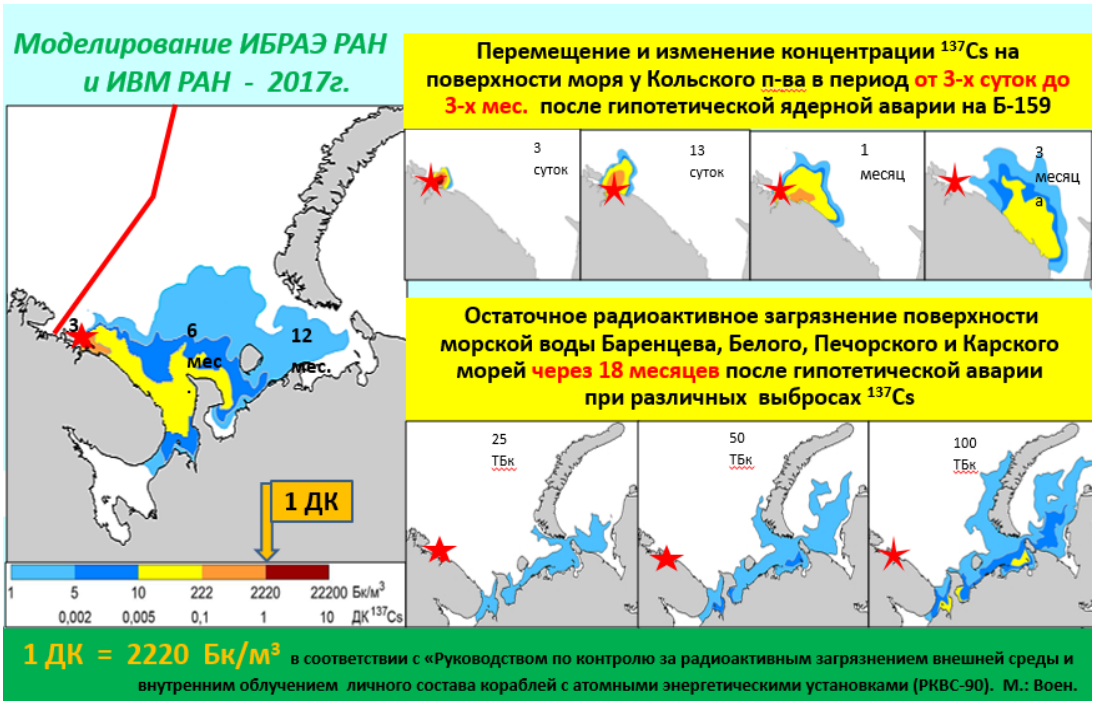
Варианты обращения с К-27 и Б-159

Варианты обращения К-11, К19, К140, ЭЗ Ленин

Слайд 7

Пример моделирования для Б-159

POCATOM



Слайд 8

Предпочтительные варианты обращения

ОБЪЕКТ	РЕЗУЛЬТАТ	РЕШЕНИЕ
К-159	Подъем с помощью понтонов	Вариант с подъемом К-159 выбран из-за большого количества радиоактивного содержимого подводной лодки, недостатка подготовки к затоплению, повреждения в процессе затопления и близости к населенным территориям и зонам экономической безопасности. В качестве оптимального метода подъема был выбран подъем с помощью понтонов, но для подтверждения его оптимальности необходимо получить дополнительные заключения экспертов.
К-27	Подъем с помощью понтонов	Был выбран вариант с подъемом К-27. Хотя экологических стимулов для этого варианта меньше, чем для К-159, есть сомнения относительно долгосрочной надежности наполнителя. В качестве оптимального метода подъема был выбран подъем с помощью понтонов, но для подтверждения его оптимальности необходимо получить дополнительные заключения экспертов.
К-11/К-19	Оставить на месте и наблюдать	Поскольку радиационные риски для населения и окружающей среды от медленного долгосрочного истечения ограниченного объема содержимого этих РО невелики, оптимальным вариантом обращения считается «оставить на месте и наблюдать».
К-140	Оставить на месте и наблюдать	Подъем подводной лодки представляет технические сложности, поскольку она лежит на большой глубине. Кроме того, нарушение герметичности РО и наполнителя для получения доступа к поврежденному топливу откроет новые пути облучения операторов, населения и окружающей среды. Оптимальным вариантом обращения считается «оставить на месте и наблюдать».
«ЛЕНИН»	Оставить на месте и наблюдать	Оптимальным вариантом будет оставить понтон на месте и наблюдать за его состоянием, поскольку у него хороший уровень радиационной защиты, особенно для населения и окружающей среды. При подъеме, маневрировании и переработке извлеченного объекта могут возникнуть дополнительные (потенциальные) условия отказа и пути облучения.

Слайд 9

Сводка основных результатов проекта

- **Инвентаризация затопленных объектов** (База данных и Карта)
- **Выбор шести наиболее опасных объектов из 17 000** (К-159, К-27, РО К-11, К-19, реактор К-140 и ЭЗ ледокола «Ленин»)
- **Рассмотрение 21 сценария выхода нуклидов и воздействия на население и окружающую среду**
- **Определены предпочтительные сценарии обращения** (подъем и утилизация + долгосрочное наблюдение)
- **Значимые аспекты:** природный, социально-экономический, стратегический, безопасностный
- **Определение последовательности технических мероприятий и вариантов для каждого объекта**
- **Оценка технологической инфраструктуры** (технически осуществимые варианты в РФ, кроме подъема)
- **Определение стоимостной и временной оценок для всех сценариев**
- **Оценка законодательной и нормативной базы** (улучшение правовой базы)

Слайд 10

Распорядительные государственные документы по проблеме ЗЯРОО

«Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года»

Указ Президента РФ от 5 марта 2020 г. № 164

«Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года»

Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645

«Единый план мероприятий по реализации Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года и Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года»

Распоряжение Правительства РФ от 15 апреля 2021 г. № 996-р

«План развития Северного морского пути на период до 2035 года»

Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115-р

Слайд 11

Выводы

- ✓ **Из 17 000 объектов наибольшую опасность представляют 6, содержащие ОЯТ, для которых возможна ситуация с разрушением барьеров безопасности, попаданием воды в активные зоны реакторов и СЦР, включая СЦР взрывного характера;**
- ✓ **При возможном выходе радиоактивных веществ серьезной опасности для окружающей среды и здоровья населения можно избежать;**
- ✓ **Российская Федерация принимает практические меры для подготовки к выполнению реабилитационных мероприятий для снижения ядерных угроз в Арктике;**

Слайд 12

Выводы

Решения по различным вариантам обращения с затопленными объектами целесообразно принимать на основе осознания:

- оставления/**неоставления** ядерно-радиационного наследия будущим поколениям;
- неизбежности радиационных последствий для АПЛ Б-159 и К-27 при их оставлении на месте затоплений, не исключая СЦР взрывного характера;
- радиофобии населения, рисков политических последствий, в том числе для СМП;
- необходимости в будущем принимать более тяжелые и сложные технические меры для подъема ЯРОО, включая АПЛ Б-159 и К-2;
- экономической и технической нецелесообразности оставления Б-159 и К-27 на месте затоплений.

Слайд 13

Сведения об авторах

Антипов Сергей Викторович, заместитель директора ИБРАЭ РАН, г. Москва

Григорьев Анатолий Владимирович, руководитель проектов МТП Госкорпорации «Росатом», г. Москва, Россия.

Кобринский Михаил Натанович, заместитель заведующего отделом ИБРАЭ РАН, г. Москва, Россия.

Савельев Иван Александрович, начальник научно-исследовательской лаборатории ядерно-радиационной безопасности АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск, Россия.

ASSESSMENT OF THE IMPACT ON THE ARCTIC ENVIRONMENT FLOODED AND SUNKEN OBJECTS CONTAINING RADIONUCLIDES

S.V. Antipov[1], A.V. Grigoriev[2], M.N. Kobrinskiy[1], I.A. Saveliev[3]

[1] IBRAE RAS, Moscow, Russia
[2] Rosatom State Corporation, Moscow, Russia
[3] SSC RF-FE", Obninsk, Russia

On December 17, 1958, the FIRST Soviet nuclear submarine K-3 "Leninsky Komsomol" was accepted into the Navy from the industry. There were quite a few shortcomings. Including those related to the nuclear power plants (NPP). When troubleshooting the NPP, radioactive waste was inevitably generated. Their volumes became so large that the storage capacities of shipbuilding and ship repair plants, as well as the coastal technical bases of the fleet, were catastrophically insufficient. Therefore, at that time, apparently, the only correct decision was made - to sink them in temporary packaging in places where there is no shipping. The first sinking operations began in 1967. This practice ended only in 1991. In total, 80 operations were carried out during this period. ~17,000 objects were sunk, some of which contained SNF of varying levels of enrichment

In 1982, survey results showed that the Cs-137 content in the southern part of the Barents Sea reached 20-40 Bq/m3, which is almost 10 times higher than the background caused by global fallout.

Intensive industrial activity in the Arctic, which has been developing in recent years as a result of the development of hydrocarbon deposits, the extraction of various minerals, the growth of transport flows, the development of coastal infrastructure and the implementation of other types of industrial work, is permissible only if there is a reasonable long-term balance between economic benefits and environmental protection requirements.

The problem of sunken nuclear and radiation hazardous sites exists, and it is at the center of attention of the country's leadership and the State Corporation Rosatom.

In the course of modern scientific studies on the analysis of various scenarios of hypothetical emergency situations, it was concluded that the presence of objects with spent nuclear fuel on the seabed can become a source of not a potential, but a real threat of radioactive contamination. Of all 17,000 objects, 6 are the most dangerous, but the nuclear submarines K-27 and B-159 are of particular concern, which can become a source of radioactive contamination of the Barents, Kara, White Seas and the Arctic Ocean. The nuclear submarine B-159 was not prepared for sinking, so the possibility of radioactive substances leaking outside the reactor vessel is quite high. In addition, the submarine sank near the city of Murmansk, as well as on the shipping and fishing route. And in the event of an accident, local underwater currents will carry radioactive substances not only across the Barents Sea, but also to the White Sea. The K-27 submarine was prepared for sinking, so additional safety barriers (filled with a furfural-based hardener) were created inside the pressure hull to prevent seawater from entering the core. However, during preparations for unloading SNF from the reactor of another Alpha-class submarine, serial number 900, it was

established that the safety barriers similar to those created on the K-27 submarine were destroyed, and condensate was inside the cavities. Therefore, a similar situation is possible on the sunken object. According to the documents, the submarine preservation is currently calculated for a period of 50 years, and at present, after 42 years, this period is beginning to expire. In 2020-2021, work showed that in the situation of destruction of the K-27 submarine safety barriers, a little more than 1 liter of seawater is enough for the reactor to go into critical mode, and there may be voids in the core with a volume of up to 18 liters. Therefore, for the K-27 submarine, the probability of a self-propelled chain reaction is not excluded, including a self-propelled chain reaction of an explosive nature (depending on the rate of water inflow into the core, as a hypothetical scenario for the development of an accident).

Possible scenarios for handling the submarine are being discussed, but, for example, for isolating the K-27 from the environment, the preferred option from the economic, technical, and regulatory side of the concept being developed is exclusively lifting and disposal.

• An inventory of sunken objects was conducted (a Database and a Map were compiled);

• 6 of the most dangerous objects out of 17,000 were selected;

• 21 scenarios for the release of nuclides and the impact on the population and the environment were considered;

• Preferred scenarios for handling were determined (lifting and disposal or long-term observation);

• Such significant aspects as natural, socio-economic, strategic, political, and safety were taken into account.

Key words*: nuclear fleet, radioactive waste, spent nuclear fuel.*

УДК 519.22:539.12.08

ЭПР-ДОЗИМЕТРИЯ КАК СРЕДСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ РАДИАЦИОННЫХ СИТУАЦИЯХ

(материалы доклада в форме расширенной презентации)

Е. А. Шишкина

ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России, г. Челябинск

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) – резонансное поглощение электромагнитного излучения неспаренными электронами. Метод однозначно различает примесные ионы, изоморфно входящие в кристаллическую решетку, а также органические свободные радикалы и позволяет получить детальные сведения о ионе в структуре окружающих атомов и молекул (валентность, гибридизация электронов, химические связи и т. д.). Возможность измерять методом ЭПР радиационно-индуцированные радикалы – это основа ЭПР-дозиметрии. Стабильность радиационно-индуцированных радикалов – главное условие выбора дозиметра при восстановлении доз облучения post factum (при неконтролируемых радиационных ситуациях). Сегодня методы ЭПР-дозиметрии разрабатываются как для экстренного реагирования на неконтролируемые радиационные инциденты, так и для ретроспективных оценок доз.

Одним из самых надежных биологических ЭПР-дозиметров оказались и кальцифицированные ткани и в особенности эмаль зубов. Метод ретроспективной ЭПР-дозиметрии на эмали зубов широко используется во всем мире для дозиметрии внешнего облучения. Однако у метода есть серьезные сложности: доступность образцов зубов и отсутствие метрологического стандарта для биообразцов.

Другая проблема – присутствие в эмали остеотропных радионуклидов. В частности, в эмали зубов жителей Уральского региона, проживавших на радиоактивно загрязненных территориях, присутствовал ^{90}Sr. В работе приведен обзор методов и подходов, позволивших преодолеть метрологические проблемы и учесть дозу внутреннего облучения эмали. Показано, что даже при высоких неопределенностях оценок малых и средних доз метод ЭПР-дозиметрии – хороший инструментом ретроспективных исследований. ЭПР-дозиметрия может также стать инструмент экспертизы для подтверждения факта облучения при отсутствии/утере юридически значимых документов.

Доклад был представлен на Всероссийской конференции «Биосферная совместимость атомной энергетики» 1 марта 2022 г. (Екатеринбург, Россия).

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс; дозиметрия.