



ИБРАЭ

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Труды ИБРАЭ

# ЧЕРНОБЫЛЬ И ФУКУСИМА. НЕРЕШЁННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

## **ТРУДЫ ИБРАЭ**

Под общей редакцией академика РАН  
*Л. А. Большова*

**Выпуск 17**

### **ЧЕРНОБЫЛЬ И ФУКУСИМА. НЕРЕШЁННЫЕ ПРОБЛЕМЫ**

Москва, 2024

УДК 621.039.586  
ББК 31.4  
Т78

### Рецензенты:

д.т.н. С. С. Абалин,  
д.ф.-м.н. В. Ф. Стрижов

**Труды ИБРАЭ РАН** / под общ. ред. академика РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН). — М., 2007 — .

**Вып. 17 : Чернобыль и Фукусима. Нерешённые проблемы** / А.А. Боровой, С.Л. Гаврилов, С.Н. Краснопёров, В.А. Хвоцинский / Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — 2024. — 152 с. : ил. — ISBN 978-5-907375-16-1 (в пер.).

В сборнике освещены вопросы, связанные с трудностями, возникающими при решении задач по окончательному преодолению последствий двух крупнейших в истории радиационных аварий — Чернобыля и Фукусимы.

Особое внимание авторы сборника уделяют анализу и прогнозированию возможного поведения ядерно и радиационно опасных топливосодержащих материалов (ТСМ), находящихся внутри объекта «Укрытие» в разрушенном 4-м блоке Чернобыльской АЭС, а также изучению влияния лесных пожаров в зоне отчуждения ЧАЭС на распространение радионуклидов в атмосфере, вопросам их мониторинга и минимизации рисков для населения прилегающих территорий.

В сборнике подробно обсуждаются методики исследований, направленных на изучение и анализ поведения ТСМ, образовавшихся в результате аварии на АЭС «Фукусима-1», а также актуальные проблемы, связанные с необходимостью утилизации огромных объемов радиоактивной воды, скопившихся на промплощадке АЭС «Фукусима-1» в период с 2011 года по настоящее время.

Книга предназначена для научных работников, сотрудников профильных организаций атомной отрасли, аспирантов и студентов, специализирующихся в области ядерной, радиационной и радиоэкологической безопасности, защиты окружающей среды, а также ориентирована на широкий круг читателей, интересующихся современными методиками преодоления последствий и предотвращения ядерных и радиационных аварий, сопровождающихся широкомасштабным радиоактивным загрязнением окружающей природной среды, проблемами экологической реабилитации территорий и морских акваторий.

**Proceedings of IBRAE RAS** /Ed. by L. A. Bolshov; Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN). — Moscow, 2007 — .

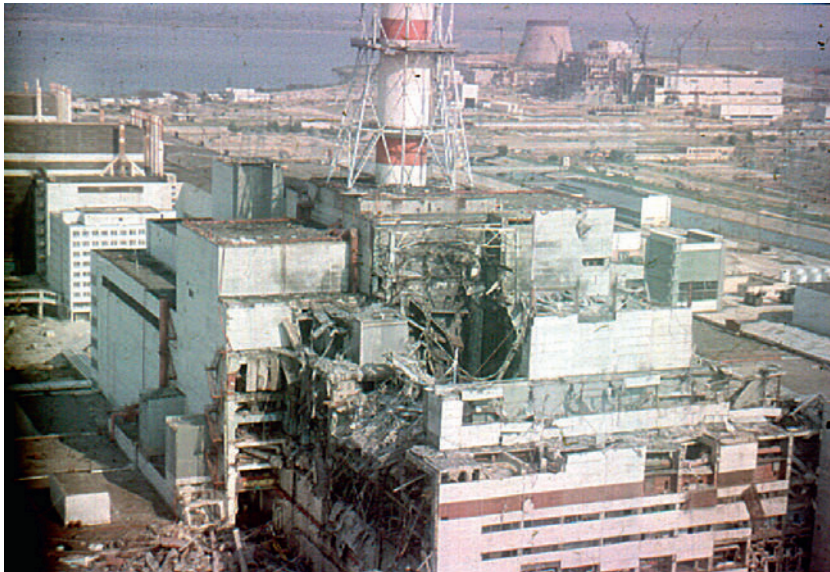
**Issue 17: Chernobyl and Fukushima. Unsolved problems** / Borovoy A.A., Gavrilov S.L., Krasnoperov S.N., Khvoshchinsky V.A. ; Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences — М. : 2024. — 152 p. : ill — ISBN 978-5-907375-16-1 (bound).

The collection highlights issues related to the difficulties encountered in solving the problems of finally overcoming the consequences of the two largest radiation accidents in history — Chernobyl and Fukushima.

The authors of the collection pay special attention to the analysis and prediction of the possible behavior of nuclear and radiation-hazardous fuel-containing materials (TCM) located inside the Shelter facility in the destroyed 4th block of the Chernobyl NPP and formed as a result of the accident at the Fukushima-1 NPP, as well as current problems related to the need for the speedy disposal of huge volumes of radioactive water accumulated at the Fukushima-1 NPP industrial site in the period from 2011 to the present.

ISBN 978-5-907375-16-1

© Продолжающееся издание «Труды ИБРАЭ РАН», 2007 (год основания), 2024  
© Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2024  
© А.А. Боровой, С.Л. Гаврилов, С.Н. Краснопёров, В.А. Хвоцинский, 2024



Разрушенный 4-й блок Чернобыльской АЭС, 1986 г.



Аварийные блоки АЭС «Фукусима-1» 30 марта 2011 г.,  
съемка компании ТЕРСО с БПЛА



### **Боровой**

#### **Александр Александрович**

д. ф.-м. н., советник почётного  
президента НИЦ «Курчатовский  
институт».

Участник ликвидации последствий  
аварии на ЧАЭС с 1986 года.

С 1992 по 2003 годы был  
директором, а позднее научным  
руководителем Отделения ядерной  
и радиационной безопасности  
МНТЦ «Укрытие» в г. Чернобыле.

Лауреат Государственной премии,  
награждён Орденом Мужества,  
правительственными грамотами.

Заслуженный деятель науки  
и техники



### **Гаврилов**

#### **Сергей Львович**

заведующий Отделением  
научно технических проблем  
развития комплексных систем  
мониторинга ИБРАЭ РАН.

Участник работ по ликвидации  
последствий аварии  
на ЧАЭС с 1988 года.

Член группы оказания экстренной  
помощи атомным станциям (ОПАС).



**Краснопёров  
Сергей Николаевич**

заведующий Отделением  
развития систем аварийной  
готовности и реагирования  
ИБРАЭ РАН.

Руководитель Центра  
научно-технической поддержки  
ИБРАЭ РАН (ЦНТП ИБРАЭ РАН).

С 2020 года — член группы  
оказания экстренной помощи  
атомным станциям (ОПАС).



**Хвощинский  
Валерий Александрович**

заместитель руководителя  
Отделения НИЦ  
«Курчатовский институт»  
Участник работ по ликвидации  
последствий аварии  
на ЧАЭС с 1986 года.

# Содержание

Принятые сокращения и обозначения .....	8
Предисловие .....	9
Чернобыль. Возможность и опасность ядерного инцидента	
<i>А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, В. А. Хвоцинский</i> .....	16
Введение .....	16
1. Скопления материалов, содержащих ядерное топливо .....	17
2. Ядерная безопасность модификаций ТСМ.....	23
3. Скопление ТСМ в пом. 305/2.....	30
4. Вероятность и опасность ядерного инцидента .....	36
Позиция ИБРАЭ РАН .....	38
Литература.....	39
Чернобыль. Разрушение чернобыльских лав	
<i>А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, В. А. Хвоцинский</i> .....	41
Введение .....	41
1. ЛТСМ в объекте «Укрытие» .....	42
2. Изучение процессов разрушения ЛТСМ до создания НБК .....	50
3. Микропроцессы, способные привести к разрушению лавы, защищённой НБК .....	62
Заключение.....	65
Литература.....	68
Чернобыль. Лесные пожары	
<i>А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, С. Н. Краснощёров, В. А. Хвоцинский</i> .....	71
Введение .....	71
1. История вопроса .....	72
2. Наш опыт.....	75
3. Некоторые выводы .....	78
Позиция ИБРАЭ РАН .....	80
Литература.....	81

Фукусима. Что известно об аварийном топливе	
<i>А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, В. А. Хвоцинский</i> .....	83
1. Топливосодержащие материалы, образовавшиеся при аварии .....	83
2. Результаты расчётов.....	84
3. Результаты мюонной томографии.....	86
4. Исследования с помощью роботов .....	89
Литература.....	121
Фукусима. Проблема сброса накопленной на промплощадке	
АЭС «Фукусима-1» воды в океан	
<i>А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, С. Н. Краснощёров, В. А. Хвоцинский</i> .....	125
Введение .....	125
История вопроса.....	126
Системы дезактивации .....	131
Выбор решения.....	137
Реакция международного сообщества.....	144
Позиция ИБРАЭ РАН по вопросу сбросов воды в океан	
с промплощадки АЭС «Фукусима-1».....	147
Литература.....	150



## Принятые сокращения и обозначения

а. з.	Активная зона реакторной установки
АЗФ	Фрагменты активной зоны
ББ-1	Бассейн-барботёр, первый этаж
ББ-2	Бассейн-барботёр, второй этаж
ЛТСМ	Лавообразные топливосодержащие материалы
ЛПА	Ликвидация последствий аварии
МЭД	Мощность экспозиционной дозы $\gamma$ -излучения
НБК	Новый безопасный конфайнмент
«ОР»	Нижняя плита биологической защиты
отм.	Отметка
ОУ	Объект «Укрытие»
ПРК	Парораспределительный коридор
пом.	Помещение
РБМК	Реактор большой мощности канальный
СУЗ	Система управления и защиты реактора
твэл	Тепловыделяющий элемент
ТП	Топливная пыль
ТСМ	Топливосодержащие материалы
ЦЗ	Центральный зал
ЧАЭС	Чернобыльская атомная электростанция
ЯОДМ	Ядерно опасный делящийся материал.
ТЕРСО	Токийская энергетическая компания
F-1	АЭС «Фукусима Дайичи» («Фукусима-1»)

## Предисловие

Прошло более 35 лет со времени аварии на Чернобыльской АЭС и более десятилетия с момента трагедии в Фукусиме. Всё это время велись масштабные работы по ликвидации последствий этих аварий и выводу станций из эксплуатации. Расходовались значительные национальные и международные средства, привлекались ведущие научно-технические организации различных стран.

Особое внимание уделялось обеспечению радиационной безопасности и состоянию разрушенного ядерного топлива. Конечную точку в этой работе — вывод АЭС из эксплуатации — можно будет поставить тогда, когда все топливосодержащие материалы (ТСМ) будут извлечены из аварийных блоков и отправлены на контролируемое хранение, а потом и на захоронение.

К сожалению, в обоих случаях, как Чернобыля, так и Фукусимы, этот результат может быть достигнут только спустя значительное время.

\*\*\*

Что касается ЧАЭС, то в 2019 г. в эксплуатацию был введён Новый безопасный конфайнмент — НБК, закрывший созданный в 1986 г. объект «Укрытие» (рис. 1, 2).

НБК должен обеспечить не только полную защиту окружающей среды от разрушенного реактора (по проекту на ~100 лет), но и возможность безопасной разборки радиоактивных развалин. Работа по демонтажу нестабильных конструкций уже была начата.

Но известные события — проведение Специальной военной операции — отодвинули сроки её выполнения, также как и дату окончательного вывода станции из эксплуатации (намеченную на 2080-е годы), на неопределённый срок.

Вместе с тем, в помещениях объекта «Укрытие» остаётся ~180 т отработавшего ядерного топлива, большая часть которого во время аварии образовала самые разные виды ТСМ (топливосодержащих материалов) и продолжает медленно эволюционировать. В нём происходят процессы, изменяющие его ядерную и радиационную безопасность.

Поэтому специалисты, которые приступят к окончательной разборке сооружения, могут столкнуться с непредвиденными трудностями, если они заранее не учтут происходящие с ТСМ изменения и не разработают безопасные методы проведения работ.

Одна из задач настоящего сборника состоит в обсуждении связанных с этим проблем.



Рис. 1. Объект «Укрытие». Введён в эксплуатацию в ноябре 1986 г.



Рис. 2. Новый безопасный конфайнмент. Введён в эксплуатацию в 2019 г.

Первая из них связана с тем, что наблюдение, которое постоянно велось за скоплениями ТСМ в помещении, находящемся под разрушенным реактором, выявило постоянное увеличение нейтронного потока. Это могло сигнализировать об уменьшении подкритичности этих скоплений. Сообщение вызвало ряд тревожных публикаций в научной прессе, в которых обсуждалась вероятность повторного возникновения ядерного инцидента.

Аналізу этого явления посвящена одна из статей в настоящем сборнике.

В статье также приводятся характеристики основных скоплений ТСМ в объекте с точки зрения их ядерной безопасности и ещё раз указывается на необходимость соблюдения необходимых защитных мер при разборке объекта «Укрытие».

Вторая проблема — анализ имеющейся информации о возможном разрушении чернобыльской лавы с течением времени.

Почему это важно знать при работах по окончательной разборке «Укрытия»?

Дело в том, что в помещениях объекта находится около 1200 т скоплений высокорadioактивных лавоподобных ТСМ — ЛТСМ (рис 3).



Рис. 3. Потоки застывшей топливной лавы, вытекавшие из клапана в парораспределительном коридоре

Лавы, хоть и медленно, но постоянно разрушаются под действием как внешних, так и внутренних факторов. При этом происходит образование мелкодисперсной, так называемой «топливной пыли».

После создания НБК влияние внешних факторов на процессы разрушения многократно уменьшилось. Но внутренние продолжают действовать.

В результате в процессе разборки объекта «Укрытие» специалисты могут столкнуться с необходимостью извлечения огромного количества топливной пыли, что потребует как создания специальных технологий проведения работ, так и особых мер безопасности.

Аналізу процессов разрушения лавы посвящена вторая статья сборника.

Третья проблема связана с опасностью лесных пожаров в чернобыльской Зоне отчуждения (рис. 4). Этот вопрос привлекает всё большее внимание. Во-первых, из-за всё более сухого и жаркого климата и возрастающей запущенности лесов, во-вторых, из-за вероятности умышленных поджогов.

Масштабы возможного возгорания — десятки тысяч га (рис. 5). Дым от него может распространяться на десятки километров. Например, в 2020 г. задымление наблюдалось в Киеве и привело к возникновению паники среди населения.

В статье «Чернобыль. Лесные пожары» обсуждаются данные прямых измерений, проведённых специалистами Комплексной экспедиции НИЦ «Курчатовский институт», и сделаны выводы о необходимости применения защитных средств при тушении пожара и о его последствиях, касающихся «расползания радиоактивного пятна».



Рис. 4. Лесной пожар в Зоне отчуждения в 2020 г.



Рис. 5. Спутниковый снимок пожара в Зоне отчуждения, апрель 2020 г.

1 — место возникновения пожара 3 апреля; 2 и 3 — состояние на 8 апреля;  
4 — месторасположение ЧАЭС. Сплошная линия — граница Зоны отчуждения.  
Площадь возгорания ~ 20 тыс. га (!)

\* \* \*

Специалисты АЭС «Фукусима-1», пострадавшей в результате сильнейшего в истории Японии землетрясения и последовавшего за ним цунами, уже более 11 лет пытаются отыскать ТСМ, оставшиеся в трёх пострадавших блоках. Суммарная активность ядерного топлива в этих блоках перед аварией составляла  $\sim 3,2 \cdot 10^8$  Ки, а полная масса образовавшихся ТСМ может превышать 800 т.

Надо отметить, что методы исследования, применённые японскими специалистами, кардинально отличались от использовавшихся в Чернобыле. В последнем случае для обнаружения скоплений ТСМ использовались бурение скважин. С их помощью отбирались пробы материалов и подводилась к скоплениям различная измерительная аппаратура. На АЭС «Фукусима-1» пошли по пути создания сложных (и дорогих) роботов, оснащённых ТВ камерами, датчиками температуры и радиоактивности. Они проникали в контейнмент через технологические проходы.

В результате специалисты сталкивались со множеством трудностей, преодолеть которые так и не удалось.

Работы по поиску и исследованию образовавшихся ТСМ шли на всех пострадавших блоках, но наибольшее продвижение было достигнуто на втором (рис. 6).



Рис. 6. Отложения (предположительно ТСМ) на основании пьедестала 2-го блока АЭС «Фукусима-1» (2018 г.)

В результате только к 2018 г., через 7 лет после аварии, удалось обнаружить ТСМ. Но не взять пробы этих материалов, ни ответить, хотя бы приблизительно, на вопрос о полной массе содержащегося в них топлива не удалось. К 2023 г., несмотря на использование всё более и более сложных роботов, ситуация для всех трёх блоков практически не изменилась.

Проведённым исследованиям и дальнейшим перспективам работы посвящена статья сборника «Фукусима. Что известно об аварийном топливе».

Второй большой проблемой, стоящей перед японскими специалистами, ведущими работы на АЭС «Фукусима-1», стала проблема высокорadioактивной воды, накопившейся на территории станции и продолжающей постоянно поступать.

Общий объём её приближается к 1,5 млн кубометров, а число баков с водой превышает 1000 (рис. 7).

Если поиски топлива допускают существенную отсрочку, то начало эффективных работ по утилизации воды не терпит отлагательства, так как возможности её хранения на территории станции практически исчерпаны.



Рис. 7. Вид на АЭС «Фукусима-1» со стороны моря

13 апреля 2021 г. правительство Японии приняло решение о сливе этой воды в океан после предварительной очистки от радиоактивных изотопов. Оно было воспринято далеко не однозначно, как в самой стране, так и за её пределами. В завершающей сборник статье «Фукусима. Проблема сброса накопленной на промплощадке АЭС «Фукусима-1» воды в океан» рассматриваются следующие актуальные вопросы:

- Что привело к накоплению такого количества радиоактивной воды?
- Насколько эффективно работают существующие системы её очистки?
- Существуют ли альтернативные пути её хранения и захоронения?
- Как предполагается осуществлять контроль при сбросе воды в океан?
- Какую реальную экологическую опасность может представлять решение японского правительства?

В заключение следует отметить следующее.

Изучение опыта, полученного при работах на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1», не только приводит к появлению новых методов и средств ликвидации последствий возможных радиационных и ядерных инцидентов, но, что более важно, открывает новые возможности их предотвращения.

Проблемы, обсуждаемые в сборнике, уже поднимались в журнальных статьях авторов. Здесь они изложены с привлечением новой информации и более детально.



# Чернобыль. Возможность и опасность ядерного инцидента

А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, В. А. Хвоцинский

## Введение

В последние годы в работах Института проблем безопасности атомных электростанций (ИПБ АЭС) НАН Украины отмечается, что в одном из помещений разрушенного чернобыльского реактора (305/2), в скоплении материалов, содержащих ядерное топливо (ТСМ), выявлено постепенное увеличение потока нейтронов (рис. 1) [1]. Это может свидетельствовать о нарастании в нём числа реакций деления урана.

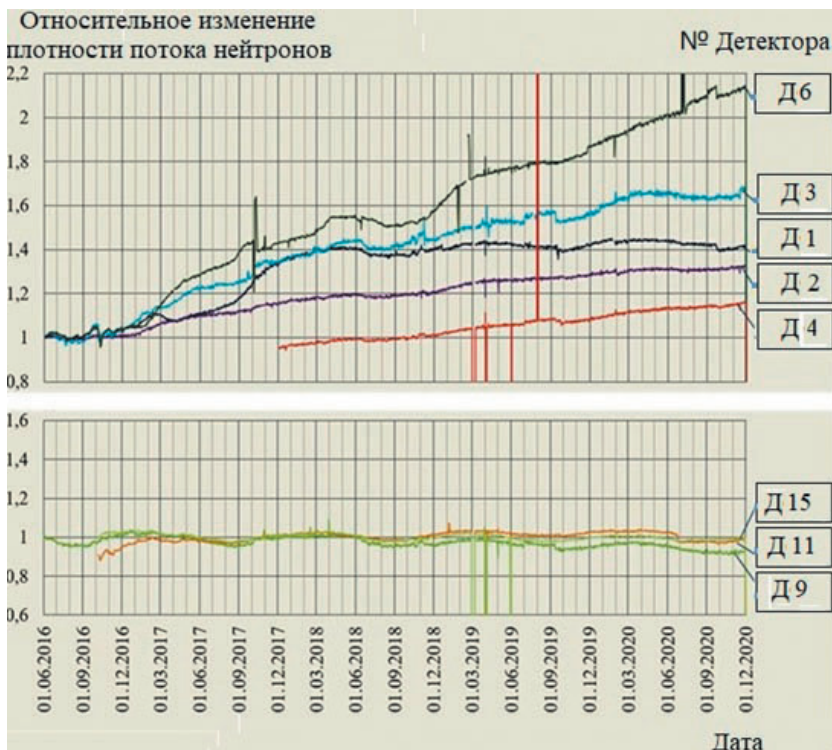


Рис. 1. Относительное изменение плотности потоков нейтронов. Верхний график — вблизи скопления ТСМ в подаппаратном пом. 305/2 объекта «Укрытие»; нижний — на отдалённой периферии

И это происходит после того, как разрушенный 4-й блок более 30 лет находится внутри созданного объекта «Укрытие». А после завершения в 2019 г. строительства поверх него крупномасштабного герметичного сооружения — Нового безопасного конфайнмента (НБК) — ещё и под его защитой. Казалось бы, ядерное топливо надёжно изолировано ото всех внешних воздействий, равно как и окружающая среда гарантированно защищена от влияния огромной радиоактивности, сосредоточенной внутри «Укрытия». Так в чём же дело?

Страсти подогрела появившаяся в мае 2021 г. в журнале Science статья «Это как угли в яме для барбекю. В Чернобыле снова тлеют ядерные реакции» [2]. В ней описывалась ситуация с возрастанием нейтронного потока от ТСМ в подапаратном помещении 305/2. В частности, в публикации говорилось: «...существует опасение, что реакция деления ускорится экспоненциально, что приведёт к неконтролируемому высвобождению ядерной энергии».

Т.е., к ядерному взрыву (!). Статья вызвала оживлённое обсуждение в средствах массовой информации и среди специалистов <sup>1</sup>.

Надо сказать, что сотрудники ИПБ АЭС после тщательного анализа динамики увеличения потока нейтронов и изменения тепловых параметров этого скопления уже предложили вероятную модель происходящего (см. работы Е. Д. Высотского и др., например, [3—6]). Однако невозможность прямого исследования материалов огромной активности и ограниченность систем диагностики не позволили однозначно оценить степень опасности этого явления.

В настоящей работе мы попытались кратко напомнить об имеющихся представлениях о скоплениях ядерного топлива в объекте «Укрытие», обсудить сложившуюся ситуацию и её возможные последствия.

## **1. Скопления материалов, содержащих ядерное топливо**

В результате произошедшей аварии часть ядерного топлива из реактора 4-го блока попала в окружающую среду [7—10]. Но основная его масса (~95% или ~180 т по урану) осталась в пределах будущего объекта «Укрытие».

---

<sup>1</sup> URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/609c14829a79473355da4e28> (12 мая 2021) РБК. Ученые на Украине объяснили новые ядерные реакции на Чернобыльской АЭС.

## ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ЗАЛ (ЦЗ) <sup>2</sup>

Взрыв (см. рис. 2) полностью разрушил кровлю центрального зала 4-го блока.

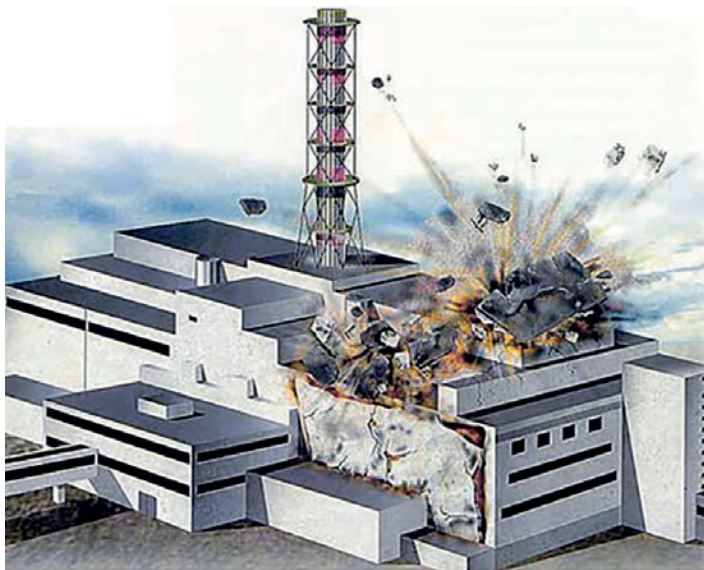


Рис. 2. Реконструкция взрыва реакторного корпуса 4-го блока ЧАЭС

Шахта реактора оказалась открытой и сверху, и снизу (рис. 3, 4). Плита биологической защиты, закрывающая её сверху (схема «Е») весом более 2000 т была подкинута взрывной волной, а затем упала назад и теперь стоит на ребре под углом 15° от вертикали. Из-за того, что кровля перестала существовать, материалы активной зоны были выброшены в ЦЗ, на площадки вентиляционной трубы, на кровли деаэрационной этажерки и машинного зала, 4-го и 3-го блока, на территорию станции. При этом в ЦЗ попали значительные количества фрагментов твэлов и топливная пыль.

Во время работ по ликвидации последствий аварии в мае — июне 1986 г. на шахту реактора с вертолётов было сброшено более 14 тысяч тонн твёрдых материалов: свинца, мраморной крошки, песка, доломита, цеолита, поглотителей нейтронов (соединений бора). Практически все материалы остались лежать в ЦЗ. В результате они покрыли выброшенное топливо слоем, толщина которого местами достигала нескольких метров (рис. 3).

<sup>2</sup> Центральный зал — пом. 914/2, в которое выходит верхняя часть шахты реактора. Сложившуюся в нём после аварии обстановку можно было наблюдать с вертолёта (правда, даже на высоте 200 м мощность дозы составляла сотни Р/ч).

Благодаря исследованиям, проведённым Комплексной экспедицией НИЦ «Курчатовский институт» и специалистами МНТЦ, удалось частично восстановить расположение скоплений ТСМ в ЦЗ (рис. 5, 6).

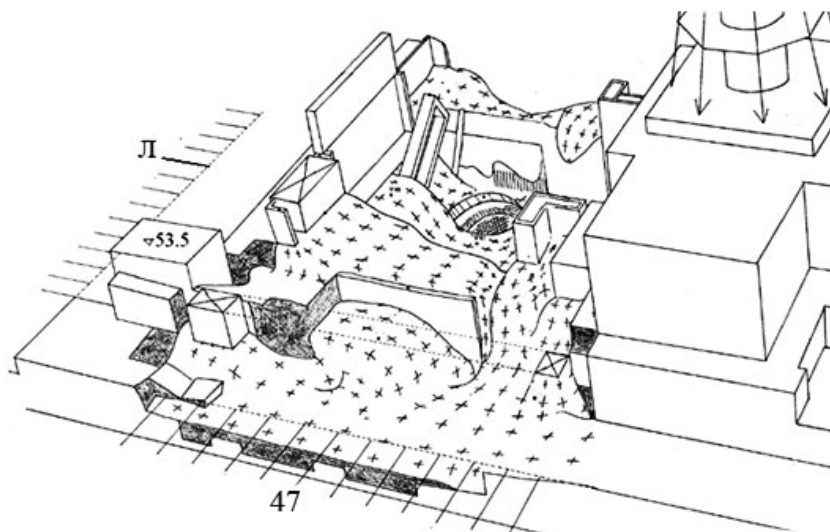


Рис. 3. «Холмы» материалов, засыпавших ЦЗ  
(центр шахты реактора лежит на пересечении Л — 47)



Рис. 4. Центральный зал после аварии. Съёмка с вертолёта

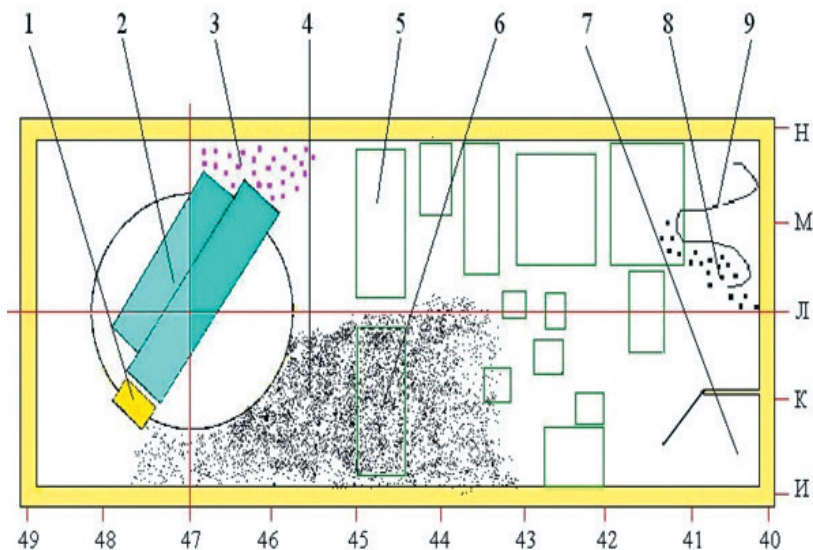


Рис. 5. Схема центрального зала после аварии.

Обозначения: 1 — железобетонная плита; 2 — схема «Е», выброшенная из шахты реактора; 3 — трубы водяных коммуникаций; 4 — завал из материалов, сброшенных с вертолётов; 5 — северный бассейн выдержки; 6 — южный бассейн выдержки (под завалом из сброшенных материалов); 7 — пультавая; 8 — фрагменты твэлов; 9 — смятая металлоконструкция

## ПОДАППАРАТНОЕ ПОМЕЩЕНИЕ 305/2

Взрыв вдавил плиту биологической защиты — схему «ОР», ограничивающую снизу шахту реактора. Она смяла массивный стальной крест, на котором стояла, и опустилась на ~ 4 м вниз в подаппаратное помещение 305/2 (рис. 6). При этом юго-восточная часть схемы «ОР», скорее всего, откололась, и на неё сползла значительная часть материалов активной зоны [8].

Ядерное топливо, нагретое до высокой температуры<sup>3</sup>, вступило во взаимодействие с окружающими материалами [9]: циркониевыми оболочками каналов, серпентинитовой засыпкой, сталью, песком, бетоном и т.п.

<sup>3</sup> При моделировании процессов образования лавы учитывались три источника тепла: остаточное тепловыделение топлива 4-го блока ЧАЭС; тепло от горения графита; тепло от парациркониевой реакции. Первый из них являлся определяющим.

В подапаратном помещении, как в огромной плавильной печи, началось образование своеобразной лавы<sup>4</sup>. В результате часть её вытекла из пом. 305/2, образовав три основных потока. Два вертикальных, которые через технологические трубы дошли до нижних отметок блока, и горизонтальный, попавший в помещение 304/3 через пролом (прожог) стены и в соседние с ним помещения на отметке 9 м (рис. 7).

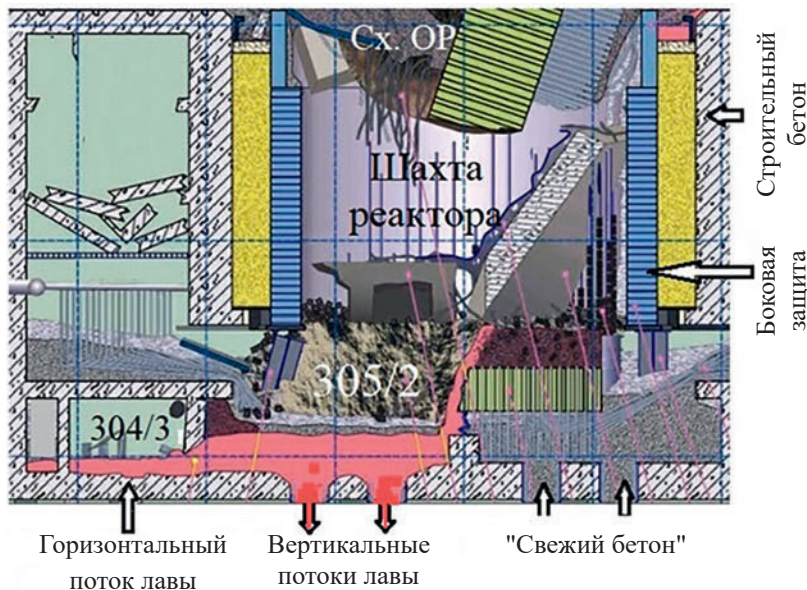


Рис. 6. Внутри 4-го блока (разрез). Распространение ЛТСМ из пом. 305/2 (красный цвет) после аварии

Основной массив информации о подапаратном помещении был получен в 1988—1991 гг. с помощью специально пробуренных скважин и использования дистанционных механизмов. Из-за больших радиационных полей разведывательные группы могли проникать в подапаратное помещение на крайне ограниченное время. В результате только после 1996 г. удалось организовать видеосъёмку и взять образцы ТСМ. Это позволило перейти к описанию отдельных скоплений топлива. В то же время значительные области подапаратного помещения продолжают оставаться «terra incognita».

<sup>4</sup> При контакте уран-циркониевой эвтектики с диоксидом кремния (главная составляющая лавы) образуется тройная система  $UO_2-SiO_2-ZrO_2$ . Минимальная температура плавления системы составляет  $\sim 1500^\circ C$ .

## ПОМЕЩЕНИЯ НА НИЖНИХ ОТМЕТКАХ РЕАКТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ

Как уже говорилось, образовавшийся в пом. 305/2 расплав распространялся по полу, достигал паросбросных клапанов, переливался внутрь и попал в нижние помещения, созданные для локализации пара при проектной аварии: парораспределительный коридор (ПРК) и два этажа бассейна-барботёра (ББ-2 и ББ-1), расположенные на отметках +6.00, +3.00 и 0.00 соответственно (рис. 7).

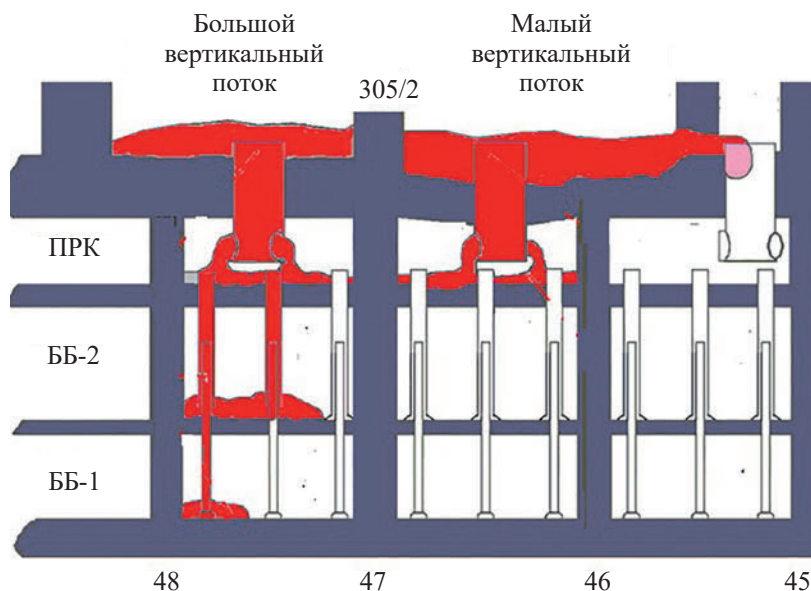


Рис. 7. Распространение ЛТСМ из пом. 305/2 (красный цвет) после аварии. Вертикальные потоки лавы протекли в парораспределительный коридор (ПРК) и два этажа бассейна-барботёра (ББ-1 и ББ-2)

Здесь существуют крупные скопления лавы: «слоновья нога», «кучи» на первом и втором этажах бассейна-барботёра и т.п. Как будет показано ниже, эти скопления не представляют интереса на кровли ядерной безопасности.

## 2. Ядерная безопасность модификаций ТСМ

(см. также обобщающие работы [10, 11 и др.]).

### МОДИФИКАЦИИ ТСМ

Процессы, происходившие в течение активной фазы аварии и описанные выше, привели к тому, что в 4-м блоке (позднее в объекте «Укрытие») образовались четыре основных модификации ТСМ:

- **Фрагменты активной зоны (АЗФ)**, большая часть которых выброшена при взрыве на верхние этажи блока, в частности, в центральный зал, часть находится в шахте реактора и пом. 305/2.
- **Мелкодиспергированное топливо (пыль) — горячие топливные частицы (ТП)**. Размеры частиц изменяются от долей микрона до сотен микрон. Они наблюдаются практически во всех помещениях объекта и в образцах почвы в ближней и дальней зоне.
- **Застывшие лаваобразные топливосодержащие материалы (ЛТСМ)**. Они образовались во время активной стадии аварии при высокотемпературном взаимодействии топлива с конструкционными материалами, распространились по подреакторным помещениям (возможно, находятся под завалами на верхних отметках).
- **Модификация ТСМ, содержащая растворимые формы урана, плутония, америция.**

Их обнаружили в скоплениях воды на нижних отметках блока.

Коэффициент размножения нейтронов для скопления ТСМ зависит от количества и степени выгорания урана, элементного состава (особенно важно количество нейтронных поглотителей и замедлителей, например, бора и воды), от геометрических параметров скопления, окружающих его материалов (отражателей), температуры и т.п.

Практически всё время после аварии, по мере накопления информации о скоплениях ТСМ, проводились работы по расчётным оценкам ядерной безопасности объекта «Укрытие». Привлекались всё более сложные нейтронные программы, разработанные для реакторных задач. Среди них WIMS, КРАБ-1, РИТМ, КРАТЕР, МСНР и другие. Позднее были сделаны расчёты методом Монте-Карло. При этом макроскопические параметры получались на основании изучения сотен тысяч вариантов «нейтронных судеб» в скоплениях. Такие работы были выполнены в России, в Беларуси, на Украине и в Германии.



## РАСТВОРИМЫЕ СОЛИ УРАНА В СКОПЛЕНИЯХ ВОДЫ

До создания Нового безопасного конфайнмента (НБК)<sup>5</sup> количество воды, поступающей за год из различных источников (в основном через неплотности в кровле) в «Укрытие» оценивалось как 3000—4000 м<sup>3</sup> [10]. Её потоки, перенося растворённые соли делящихся материалов<sup>6</sup> и мелкие частицы топлива, могут привести к нежелательному увеличению критичности в местах скопления жидкости.

При этом постоянное присутствие воды в основном наблюдается на отметках ниже +12.50. На более высоких отметках могут образовываться временные и небольшие скопления объёмами менее 50 л. Ситуация с нижними отметками подробно рассматривалась в работе [12], опубликованной в 2009 г. Ни по одному из параметров — количеству урана, выгоранию топлива, геометрическим параметрам скопления воды и донных отложений — они не приближаются к критериям ПБЯ-06-00-88, требующим особого внимания для ядерных объектов.

В настоящее время ввод в эксплуатацию НБК полностью перекрыл возможные пути проникновения внешней воды в скопления ТСМ.

## ЗАСТЫВШИЕ ЛАВООБРАЗНЫЕ ТСМ (ЛТСМ) + ВОДА

Лавообразные ТСМ попали на нижние отметки блока (см. рис. 7). Это парораспределительный коридор, второй этаж бассейна-барботёра и первый этаж бассейна-барботёра. Перед этим лава прошла достаточно длинный путь (часто десятки метров) от места своего образования. Вещество в этих помещениях достаточно однородно. Сотни анализов не обнаружили в нём включений крупных фрагментов топлива. Основные параметры трёх типов лавы на нижних отметках, важные для расчётов по ядерной безопасности, приведены в таблице 1.

---

<sup>5</sup> Введён в эксплуатацию в 2019 г.

<sup>6</sup> В 1990 г. было обнаружено, что на поверхности лавы активно образуются соединения урана, растворимые в воде.

**Таблица 1. Некоторые свойства лавы на нижних отметках «Укрытия» [11].**

Параметры	Виды ЛТСМ		
	Коричневая керамика	Чёрная керамика	Полихромная керамика
Содержание U (весовых %)	$10 \pm 2$	$5,5 \pm 1,5$	$5,5 \pm 2,0$
Выгорание топлива в лаве, МВт×сут/кг (U) <sup>7</sup> .	$12,6 \pm 0,4$	$12,5 \pm 0,5$	$13,0 \pm 0,5$

Воспользуемся результатами расчётной работы [13], в которой рассмотрена величина коэффициента размножения нейтронов ( $K_{\infty}$ ) для бесконечной системы ( $UO_2 + SiO_2 + H_2O$ ). Эта работа является одной из наиболее консервативных по отношению к ядерной опасности.

На рис. 8 представлена диаграмма состояний системы в зависимости от двух параметров: количества топлива и его выгорания. Вода служит замедлителем и без неё возникновение критичности в ЛТСМ вообще невозможно. Поэтому предполагается, что содержание воды в каждой точке таково, что  $K_{\infty}$  — максимален (наиболее консервативный подход). Тёмная область — область, в которой возможна самоподдерживающаяся цепная реакция. Прямоугольник внизу — область параметров «чистой лавы» ( $SiO_2$ ).

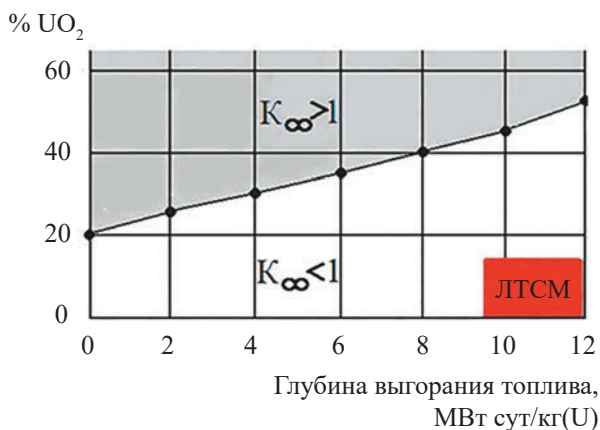


Рис. 8. Зависимость коэффициента размножения нейтронов от содержания урана и выгорания топлива в системе (ЛТСМ + вода) [13]

<sup>7</sup> Среднее выгорание урана для лавы больше, чем среднее выгорание топлива по всей зоне, равное 10,9 МВт×сут/кг (U).

Видно, что «чистая лава» в любой смеси с водой не способна к ЦСР<sup>8</sup>. Учёт любых других параметров (наличие различных химических элементов в составе лавы, присутствие поглотителей, конечные геометрические размеры и т.п.) только усиливает это утверждение.

Независимые расчёты для конкретных помещений нижних отметок «Укрытия», выполненные группой Г.А. Шароварова (ИРЭП) [14], полностью подтвердили эти результаты [13]. В качестве иллюстрации мы приведем данные для скопления, известного в литературе как «слоновья нога» и находящегося в пом. 217/2, отметка +6.00 (рис. 9).

Было показано, что даже в предположении гораздо большего, чем наблюдаемые, содержания топлива (до 18%) скопление ЛТСМ является полностью ядерно безопасным как в «сухом» состоянии, так и в случае залива водой в наиболее опасной её концентрации (см. таблицу 2). Эффективный коэффициент размножения нейтронов  $K_{эфф.}$  в системе много меньше единицы.

**Таблица 2. Результаты расчёта  $K_{эфф.}$  для «сухих» ЛТСМ и для случая их залива водой (наиболее неблагоприятная концентрация) с учётом пористости [14].**

Наименование помещения (скопление)	Содержание топлива (по U) 10% <sup>9</sup>		Содержание топлива (по U) 18%	
	Содержание воды		Содержание воды	
	нет	есть	нет	есть
207/2 («слоновья нога»)	0,21	0,32	0,29	0,57

### ФРАГМЕНТЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ (АЗФ)

Сразу после аварии опасение вызывал тот факт, что в разрушенном реакторе мог остаться неповреждённым значительный кластер уран-графитовой кладки. А когда обнаружилось, что схема «Е» была на какое-то время выброшена из реактора, возникло опасение, что фрагмент кладки попал в ЦЗ. Сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» оперативно были сделаны расчёты [15]<sup>10</sup>, которые показали, что в кластере, содержащем более 154 каналов РБМК (~1/10 часть кладки), возможно возникновение самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) в случае, если по каким-то причинам в нем нет поглощающих стержней. Среднее выгорание топлива принималось равным 10,3 МВт×сутки/кг (U) (реальное топливо 4-го блока).

<sup>8</sup> Со временем количество проанализированных проб «чистой лавы» достигло > 300, но их характеристики — содержание топлива и выгорание — не выходили за пределы указанных параметров.

<sup>9</sup> Значение, полученное для коричневой керамики. Для вещества «слоновья нога» оно составляет около 4.5% (для 25 исследованных проб).

<sup>10</sup> Первые расчёты были выполнены в начале мая 1986 г.



Рис. 9. Скопление ЛТСМ «слоновья нога» в помещении 217/2

Правда, первые наблюдения, сделанные с вертолётов, не подтвердили нахождения столь крупного кластера в ЦЗ. А специалисты отмечали, что после взрывов сохранение большого кластера реактора маловероятно, а время его гипотетической неуправляемой работы мало — кластер сильно нагреется, развалится, а вновь нарабатанная в нём радиоактивность будет на много порядков меньше, чем радиоактивность отработавшего топлива.

Тем не менее, в состав сбрасываемых в развал реактора материалов включили и поглотители нейтронов — соединения бора (в основном,  $B_4C$ ). Всего около 40 тонн<sup>11</sup>.

Позднее, в конце 1989 г., под кровлей «Укрытия» начала работать стационарная система пылеподавления (ССП). Её главной задачей было предотвращение выхода в окружающую среду радиоактивной пыли, скопления которой находились в ЦЗ. Это могло произойти через оставшиеся при строительстве объекта щели.

Над развалом в ЦЗ были смонтированы форсунки, которые позволили проводить периодическое распыление жидких пылеподавляющих составов<sup>12</sup> (см. рис. 10).

<sup>11</sup> Для примера: оценки показывают, что достаточно 10 кг карбида бора, равномерно распределённого по активной зоне РБМК, чтобы сделать его работу (т. е. возникновение СЦР) невозможной ни при каких условиях.

<sup>12</sup> В 2003—2004 гг. была проведена модернизация СПП.

С помощью ССП было решено создать ещё один барьер на пути возникновения СЦР, а именно, ввести в состав разбрызгиваемых растворов сильный нейтронный поглотитель — раствор азотнокислого гадолиния.

В центральном зале существует ещё одно место, которое привлекло внимание исследователей. Это южный бассейн выдержки отработавшего топлива. Согласно документам в нём на момент аварии находилось 129 кассет отработавшего топлива с глубиной выгорания, близкой к средней по загрузке. Визуальный осмотр помещения через скважину (через перископ) показал целостность кассет и видимое сохранение структуры их размещения. Вода в бассейне выдержки отсутствует, по-видимому, из-за нарушения его целостности при взрыве.

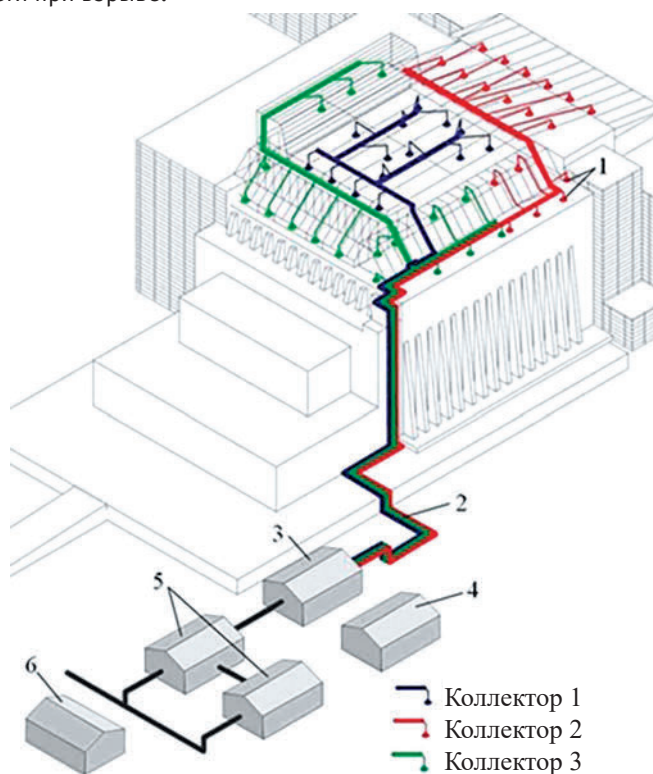


Рис. 10. Схема системы пылеподавления.

Условные обозначения: 1 — форсунки, закрепленные над развалом в ЦЗ;  
2 — напорный коллектор; 3 — насосное отделение; 4 — операторская;  
5 — реакторы (помещение для емкостей смесителей); 6 — склад химреагентов

В расчётах НИЦ «Курчатовский институт» для выгоревшего топлива в бассейне выдержки, наполненном водой, были получены значения коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде ( $K_{\infty}$ ) в зависимости от шага между пеналами. Во всех случаях  $K_{\infty}$  много меньше 1 и система остаётся глубоко подкритичной. То же самое можно отметить в случае разрушения подвесок, падения пеналов на дно, при их компактном расположении и заливе водой [10]. Подводя итог, следует сказать, что детекторы гамма-излучения, плотности потока нейтронов, тепловых потоков, находящиеся над развалом реактора, за время наблюдения (35 лет) не обнаружили никаких признаков повышения критичности топлива, выброшенного в ЦЗ. Это же подтверждали спектрометрические измерения проб воздуха, взятого над развалом в ЦЗ. Сколько-нибудь значимые количества короткоживущих продуктов деления в нём не наблюдались.

#### ФРАГМЕНТЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ + ЛТСМ + ВОДА

Смесь АЗФ и образовавшихся ЛТСМ присутствует в заметных количествах как в ЦЗ, так и в пом. 305/2. Расчёты критичности для неё (ЛТСМ + АЗФ + вода) впервые были сделаны в НИЦ «Курчатовский институт» [16]. Исходные данные для этих расчётов выбирались следующие:

- Изотопный состав топлива: 1%  $^{235}\text{U}$ , 0,2%  $^{239}\text{Pu}$ , выгорание  $\sim 10$  МВт·сут/кг (U).
- Состав ячейки: твэлы РБМК, вода, ЛТСМ; состав ЛТСМ:  $\text{UO}_2$  — 0,2 г/см<sup>3</sup>,  $\text{SiO}_2$  — 2 г/см<sup>3</sup>; Отражатель: бетон, 50 см.
- Количество воды: выбрано из условия, что  $K_{\infty}$  — максимален.

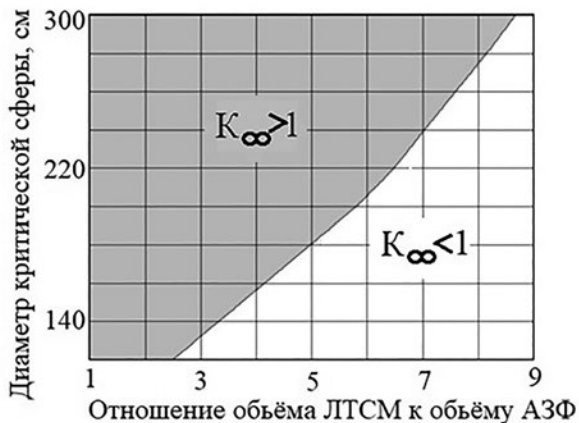


Рис. 11. Область возможных критических состояний системы (ЛТСМ + АЗФ + вода)

На диаграмме (рис. 11) приведена зависимость диаметра критической сферы<sup>13</sup> от отношения объёма, занятого твэлами, к объёму ЛТСМ.

Для топлива с меньшим выгоранием радиусы критических сфер уменьшаются. Если в воде содержится бор, то критические размеры и масса твэлов начинают возрастать. Позднее системы, состоящие из (ЛТСМ + АЗФ + вода) различной геометрии (включая многослойные модификации) были исследованы в других работах [17, 18 и др.].

### **3. Скопление ТСМ в пом. 305/2**

#### **АНОМАЛЬНОЕ НЕЙТРОННОЕ СОБЫТИЕ**

Из всех помещений «Укрытия» только в двух — ЦЗ и 305/2 — имелись достаточно большие скопления ТСМ, способные вызывать опасения. Обсуждавшаяся выше ситуация, сложившаяся в центральном зале, оставалась стабильной в течение всего времени наблюдений. Иначе обстоит дело в помещении 305/2, в котором, по оценкам, находится значительное,  $(85 \pm 15)$  т, количество топлива по U. В июне 1990 г. один из детекторов информационно-измерительной системы «Финиш» (канал 50), находящийся в пом. 304/3 вблизи от пролома в подаппаратное пом. 305/2, зарегистрировал увеличение плотности потока нейтронов<sup>14</sup>. Схема размещения нейтронных каналов системы «Финиш» представлена на рис. 12.

24.06.90 г. оператор, дежуривший на пульте системы «Финиш» во вторую смену, обратил внимание на повышение скорости счёта 50-го канала (примерно до 4,0 имп/с вместо обычных ~ 2,5 имп/с). Нейтронный детектор этого канала был установлен в помещении 304/3 непосредственно на поверхности ЛТСМ и подключён к системе «Финиш».

В дальнейшем (25—29 июня) скорость счёта в канале продолжала повышаться и превысила установившийся уровень приблизительно в 60 раз (рис. 13).

Была оперативно проведена полная проверка всего счётного тракта 50-го канала (в том числе с использованием калиброванного источника нейтронов). Она не выявила приборных неисправностей. В результате было принято решение о заливке помещения 304/3 раствором азотнокислого гадолиния, поглощающим нейтроны. Скорость счёта детектора постепенно уменьшилась, а затем вернулась к первоначальным значениям.

---

<sup>13</sup> Области с размерами, допускающими возникновение ЦП при достижении остальных критических параметров.

<sup>14</sup> Детектор представлял собой камеру деления КНТ-31, окружённую замедлителем из оргстекла толщиной около 15 мм и помещённую в стальной корпус. Всего система включала 5 детекторов. Два были установлены в реакторном пространстве, по одному детектору находилось в подаппаратном помещении 305/2, в ПРК и в помещении 304/3 (канал 50). Все детекторы были установлены в специально пробуренных скважинах.

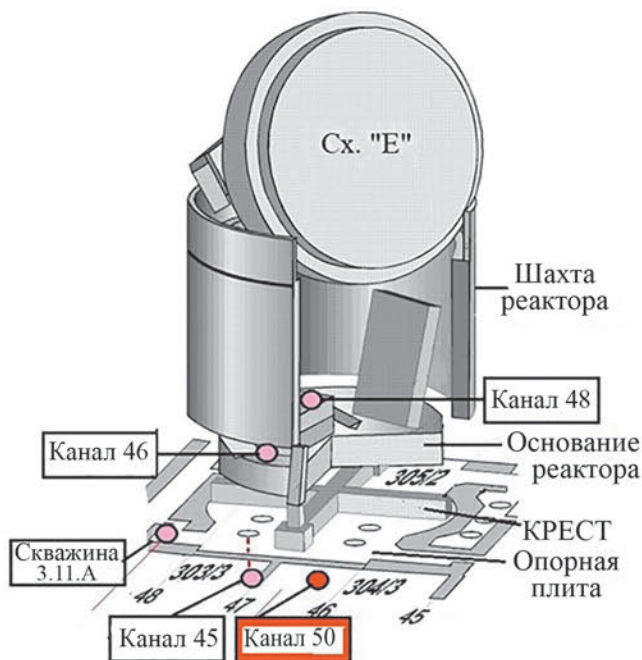


Рис.12. Схема расположения детекторов нейтронных каналов системы «Финиш» летом 1990 г.

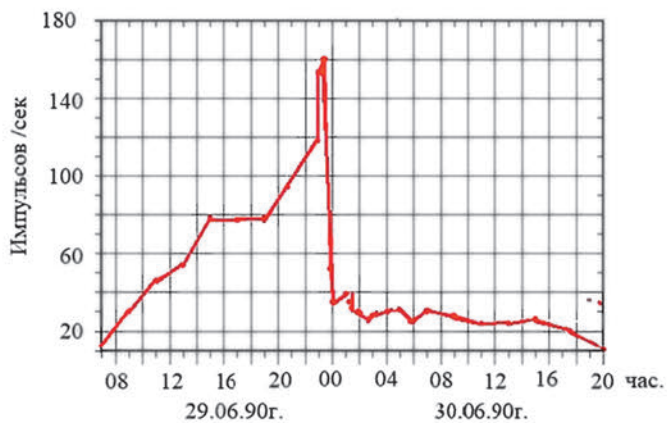


Рис. 13. Временная зависимость счёта 50-го канала системы «Финиш» 29 и 30 июня 1990 г.



Всё это время другие каналы системы «Финиш» регистрировали обычную плотность нейтронного потока.

Наиболее подробное и авторитетное исследование причин аномального события в помещении 304/3 в июне 1990 г. было проведено специальной комиссией ИБРАЭ РАН [19]. В нём было показано, что наиболее вероятным объяснением произошедшего является увеличение числа делений в скоплении ТСМ (АЗФ + ЛТСМ), находящемся в юго-восточном квадранте пом. 305/2 вблизи от пролома в пом. 304/3. Причиной такого повышения могло стать увеличение поступления воды (замедлителя) в скопление, например, вследствие аномально дождливой погоды<sup>15</sup>.

Для того чтобы в таком скоплении при попадании в него воды значительно увеличивался эффективный коэффициент размножения нейтронов ( $K_{эфф.}$ ), необходимо, чтобы объём ТСМ составлял несколько кубометров, а содержание в них урана (при среднем выгорании) значительно превышало обычное его содержание в составе ЛТСМ [16, 20]. В этом случае скопление скорее всего представляет собой смесь лавы с непереплавленными фрагментами активной зоны.

Ещё дважды в 1996 г. после особенно дождливых дней было зафиксировано возрастание счёта в нейтронных каналах диагностических систем, контролировавших пом. 304/3. Продолжалось это несколько часов, в течение которых плотность потока нейтронов увеличивалась в ~ 3 раза, а затем возвращалась к прежним значениям.

В документах, относящихся к этим событиям, отмечается, что их причиной, скорее всего, является попадание значительного количества воды в помещения объекта «Укрытие» (дожди, талая вода), что может привести как к аппаратурным помехам, так и к увеличению показаний детекторов за счёт смягчения спектра нейтронов и небольшого повышения  $K_{эфф.}$ .

Дальнейшее наблюдение за плотностью потока нейтронов, вплоть до введения Нового безопасного конфаймента, не обнаруживало каких-либо заметных отклонений, кроме небольших сезонных колебаний. Не показывали значимого присутствия короткоживущих изотопов и анализы воздуха внутри объекта. Тем не менее, в «Анализе безопасности объекта «Укрытие» и прогнозных оценках развития ситуации» [10] указывается на возможное существование в объекте «Укрытие» зоны с потенциальной ядерной опасностью<sup>16</sup>. Остановимся подробнее на том, что достоверно известно об этой зоне.

---

<sup>15</sup> В заключении комиссии, в частности, рассматривалась возможность увеличения скорости счёта детектора из-за смягчения спектра нейтронов при заливе помещения водой. Расчёты показали, что для камеры, окружённой замедлителем из оргстекла, этот эффект приведёт к увеличению скорости счёта в ~ 2 раза.

<sup>16</sup> По определению **ядерно опасная зона** — часть территории, в пределах которой существует риск повышенного облучения персонала в результате СЦР.

## ЧТО ИЗВЕСТНО О СКОПЛЕНИЯХ ТСМ В ПОМЕЩЕНИИ 305/2

Как уже говорилось выше, попытки получить информацию о скоплениях ТСМ в подаппаратном пом. 305/2 вплоть до 1988 г. оставались безуспешными из-за больших значений МЭД в нём (сотни Р/час) и частично залившего «Укрытие» «свежего бетона»<sup>17</sup>.

В конце 1987 г. по предложению академика С.Т. Беляева исследования стали проводиться с помощью скважин, пробуренных в опорной плите<sup>18</sup> из относительно чистых и дезактивированных помещений. Это позволило максимально приблизиться к скоплениям, не попадая непосредственно в них, поскольку извлечение высокоактивных кернов из самих скоплений оказалось практически невыполнимым из-за высокого уровня радиации.

Но ещё первые визуальные исследования опорной плиты снизу (на потолке помещений парораспределительного коридора — ПРК) показали, что её бетон в юго-восточном квадранте просел и частично прожжён. Это указывало на существование в этом квадранте наверху, в пом. 305/2, мощного источника тепла — скопления ТСМ. Его тепло разрушило (проплавило) бетон плиты. Последующие измерения температуры и МЭД в скважинах, пробуренных в этой плите с юга на север и с востока на запад<sup>19</sup>, это подтвердили и позволили установить, что таких скоплений два — около пролома в помещении 304/3 и чуть севернее (рис. 14, 15).

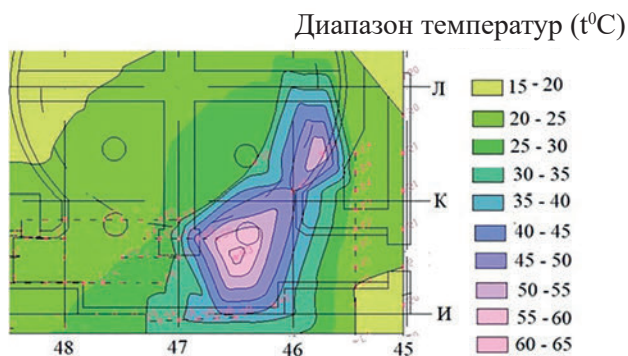


Рис.14. Распределение температуры в подреакторной плите (ноябрь 1988 г.). Видны два скопления ТСМ

<sup>17</sup> «Свежий бетон» — тысячи тонн бетона, попавшие в помещения при строительстве «Укрытия».

<sup>18</sup> Эта плита служит опорой для колодца шахты реактора и нижним перекрытием помещения 305/2. Она представляет собой железобетонный монолит, расположенный между отметками 8.000 и 10.000. На плите размещён бетонный крест фундамента опоры реактора. Крест визуально делит массив плиты на квадранты.

<sup>19</sup> Измерения МЭД в скважинах проводились весной и летом 1990 г.

Возможная модель размещения скопления (ЛТСМ + АЗФ) возле провала (прожога) между пом. 305/2 и 304/3 приведена в работе «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации» [10] (см. рис. 15). Внешний вид скопления из пом. 305/2 можно видеть на фото (рис. 16), сделанном с помощью робота.

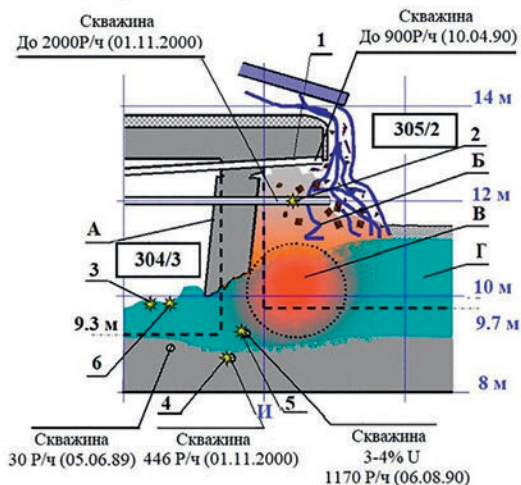


Рис. 15. Сечение по оси 46+2800. Обозначения: А — разделительная стена; Б — завал; В — область возможного расположения скопления ЛТСМ + АЗФ с большим содержанием U; Г — ЛТСМ с 4–6% U. 1–6 — детекторы

## ПОВЕДЕНИЕ ТСМ В ПОМ. 305/2 ПОСЛЕ СОЗДАНИЯ НБК

После окончания строительства НБК (2016 г.) и ввода его в эксплуатацию (2019 г.) кардинальным образом изменилась ситуация с возможностью проникновения дождевой и талой воды во внутренние помещения объекта «Укрытие». Казалось бы, недостаток замедлителя должен привести к снижению нейтронной активности ТСМ в пом. 305/2. Но графики, приведённые в начале этой статьи, доказывают обратное.

Как уже говорилось, специалисты ИПБ АЭС НАН Украины после тщательного анализа ситуации предложили (см. [5]) возможный сценарий происходящих процессов.



Рис. 16. Юго-западный квадрант пом.305/2. У пролома (прожога) в пом.304/3. Пол перед завалом покрыт «свежим бетоном»

Вода, залившая скопление ТСМ, расположенное в пом. 305/2, привела к началу роста в нём вынужденных делений за счёт замедления нейтронов (1990 г.) Общий поток их увеличился, что и зафиксировал детектор. Однако в дальнейшем при продолжении залива поглощение нейтронов водой стало возрастать и установилось некоторое равновесное значение их потока. После окончания строительства НБК скопление стало высыхать, терять воду, а число делений — снова возрастать.

Приведём слова авторов: «...динамика нарастания потока нейтронов на периферии зоны проплавления, наблюдаемая после установки НБК, определяется вводом положительной реактивности в процессе потери воды переувлажненной (при повторной критичности 1990-го года) размножающей средой — ядерно опасным скоплением».

Предлагается следующая модель этого скопления (рис. 17).

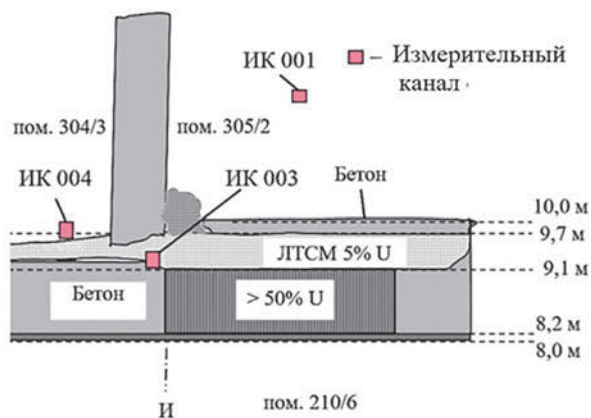


Рис. 17. Модель размещения ядерно опасного скопления в юго-западном квадранте пом.305/2, согласно работе [5]

«Скопление представляет собой двухслойную композицию, скрытую под слоем «свежего 1986 г.» бетона. Верхний слой — чёрные ЛГТСМ с массовой долей топлива 5% урана... Нижний слой — критическая масса керамики с долей топлива от 50% урана, являющаяся продуктом взаимодействия расплава топлива (кориума) с бетоном опорной плиты» [5].

Возможны различные варианты такой модели. Однако, основной вопрос: представляет ли скопление ТСМ в пом. 305/2 реальную опасность при самых консервативных предположениях — для окружающей среды и людей, находящихся на площадке станции (местная авария)<sup>20</sup>, или только для проведения работ внутри объекта НБК — «Укрытие» (локальная авария).

#### 4. Вероятность и опасность ядерного инцидента

Цепочка событий, которая может возникнуть при инциденте в пом. 305/2 выглядит следующим образом:

**рост числа делений в скоплении → выделение большого количества тепла<sup>21</sup> → выкипание воды → разрушение скопления → прекращение инцидента.**

<sup>20</sup> Различаются три типа аварий: локальная авария — выход радионуклидов в пределах помещений объекта «Укрытие» (1 по шкале INES); местная авария — выход радионуклидов в пределах санитарно-защитной зоны ЧАЭС (2, 3 по шкале INES); общая авария — выход радионуклидов за пределы санитарно-защитной зоны (выше 3 по шкале INES).

<sup>21</sup> Для примера, если полное число делений при инциденте составит  $10^{15}$ , то полное энерговыделение превысит  $3 \cdot 10^4$  Дж.

Поскольку инцидент возникнет в помещении, находящемся практически в центре здания с мощными железобетонными стенами и перекрытиями, частично залитыми бетоном, то ожидать сильного разрушения соседних помещений не придется. По тем же причинам опасность сопутствующего излучения (нейтроны, гамма-излучение) будет локализована. Выход при подобном инциденте радиоактивных газов за пределы собственно объекта «Укрытие» (до создания НБК) оценивался в работе [20]. Величина ингаляционной дозы при крайне консервативном рассмотрении для персонала, находящегося вблизи «Укрытия», не превысит десятых долей мЗв.

За пределы НБК радиоактивные газы не выйдут.

**Опасное увеличение активности воздуха на площадке, о котором, после взятия ЧАЭС под контроль российскими войсками, уже начали говорить украинские масс-медиа, может быть связано только с преднамеренной диверсией.**

Всё это справедливо до того момента, пока, согласно существующим планам, не развернутся работы по окончательному преобразованию объекта в экологически безопасную систему. Некоторое время назад уже началась подготовка к разборке нестабильных внутренних конструкций, обрушение которых надо предотвратить.

В дальнейшем, согласно долгосрочным планам, предстоит организовать извлечение радиоактивных материалов и ТСМ, обеспечить их промежуточное контролируемое хранение и, наконец, принять решение об окончательном захоронении. Правда, существует точка зрения, что последние работы (извлечение и т.п.) можно отложить на десятки лет, поскольку расчётный срок функционирования НБК  $\geq 100$  лет. Такую точку зрения высказывал, например, представитель Министерства по чрезвычайным ситуациям Украины [21]. Однако против подобного решения существуют и серьёзные возражения ([22]).

В любом случае разборка нестабильных внутренних конструкций потребует проведения работ внутри «Укрытия». Обеспечение их безопасности невозможно без постоянного и всеобъемлющего контроля за скоплениями ТСМ. В этой связи следует прислушаться к замечаниям и рекомендациям, высказанным в работе [23]. В том числе и следующим:

«Эффективность мониторинга «южного» скопления ЯОДМ<sup>22</sup> в помещении 305/2 недостаточна и не соответствует нормам, регламентируемым «Правилами ядерной безопасности».

---

<sup>22</sup> ЯОДМ — ядерно опасный делящийся материал.

## **Позиция ИБРАЭ РАН**

Как для свежего, так и для отработанного ядерного топлива характерно наличие реакций деления с образованием нейтронов. Было всегда известно, что в любом хранилище ядерного топлива есть потоки нейтронов за счёт спонтанного деления.

В отдельных местах топливных образований (масс) под чернобыльским реактором периодически наблюдается достаточно медленный рост интенсивности реакций деления. Это возможно по следующим основным причинам:

1) Постепенно, со временем, изменяются геометрия и общее физическое состояние топливных образований. Сами топливные образования неоднородны по своему составу и плотности, в каких-то местах их плотность больше, из-за этого возможно увеличение потока нейтронов.

2) Интенсивность реакций деления на нейтронах зависит от наличия замедлителя. В данном случае замедлителем является вода, которая может поступать с дождевыми или грунтовыми потоками. Вода замедляет нейтроны, что способствует повышению интенсивности реакций деления в топливных массах.

Также под воздействием ионизирующего излучения и в случае иссушения топлива оно меняет свою структуру, что также может влиять на интенсивность ядерного деления в нём, однако эти процессы, по-видимому, недостаточно глубоко изучались.

Аналогичные ситуации периодически наблюдались и ранее в местах хранения топлива, когда за счёт попадания воды в контейнеры с ОЯТ также наблюдался незначительный рост числа ядерных делений.

Что касается объекта «Укрытие», то до возможного перерастания ситуации к состоянию, требующего вмешательства, может пройти ещё много лет.

## Литература

1. О состоянии ядерной безопасности объекта «Укрытие» // ИПБ АЭС НАН Украины. <https://www.ispnpp.kiev.ua/ru/shelter-object-safety-ru/>.
2. R.Stone. It's like the embers in a barbecue pit. <https://www.sciencemag.org/news/2021/05/nuclear-reactions-reawaken-chernobyl-reactor>.
3. Е. Д. Высотский, В. А. Краснов, А. С. Лагуненко и др. Топливо в помещении 305/2 4-го блока ЧАЭС. Критмассовые зоны. Уточнение сценария образования лавообразных топливосодержащих материалов // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, 2007, — Вип. 8, — С. 77 — 93.
4. Моделирование массовых и геометрических параметров скопления топливосодержащих материалов в юго-восточной части помещения 305/2 разрушенного 4-го блока ЧАЭС. В.А. Бабенко, Е.Д. Высотский, А.А. Ключников и др. // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, 2008, — Вип. 9, — С. 36 — 41.
5. Особенности контроля ядерной безопасности объекта «Укрытие» в период сооружения нового безопасного конфайнмента / Е. Д. Высотский, А. И. Довыдьков, В. А. Краснов, В. Н. Щербин // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, 2011, — Вип. 17, — С. 91 — 97.
6. Динамика нейтронной активности и подкритичность ядерно-опасного скопления в условиях комплекса НБК-ОУ. Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, 2018, — Вип. 30, — С. 78 — 86.
7. Bogatov S., Borovoi A., Gavrilov S. et al. Half an hour after the beginning of the accident. OKPRINT, Moscow, 2005. — 22 p.
8. Боровой А.А., Лагуненко А.С., Пазухин Э.М. Оценка количества топлива в подаппаратном помещении 305/2 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. 1998, — Т. 84, — Вып. 4. — С 356 — 361.
9. Богатов С.А., Боровой А.А., Лагуненко и др. Образование и растекание чернобыльских лав. // Радиохимия, 2008, — Т. 50, — Вып. 6, — С. 565 — 568.
10. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: Отчет о НИР (заключит.) МНТЦ «Укрытие» НАН Украины; отв. исполнитель Боровой А.А. // Арх. № 3836. Чернобыль, 2001. — 337 с.
11. Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А.А. Боровой, Е. П. Велихов, А. А. Ключников. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС // Москва, Наука, 2010, 249 с.



12. *А.А. Боровой*. Ядерная безопасность скоплений воды в объекте «Укрытие» // Атомная энергия, — Т. 107, — Вып. 2, август 2009 г., — С. 91 — 95.
13. *Бродкин Э.Б., Хрусталева А.В.* Расчеты размножающих свойств гомогенных смесей. Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова. Инв. № 30/1-1030-90. — Москва, 1990, — 19 с.
14. Анализ ядерной безопасности объекта «Укрытие». Отчет ИЯЭ АН БССР. Инв. № 1449. — Минск, 1990. — 80 с.
15. *Бурлаков Е.В., Занков Ю.Н., Кватор В.М.* О возможности возникновения СЦР после аварии. Докладная записка руководству ИАЭ им. И.В. Курчатова, рукопись, Москва, 07.05.86 г., 5 стр.
16. *Бродкин Э.Б.* Проведение расчетов и корректировка расчетных критпараметров для различных типов ТСМ, находящихся в помещениях «Укрытия». Отчет по 3 этапу х/д 115, пункт 2.1.7. технического задания ИНИН УО ВЛ, 1993, — 8 с.
17. *Гмаль Б., Мозер Е.Ф., Претти Г., Кваде У.* Анализ и оценка «Технического обоснования ядерной безопасности объекта «Укрытие». Поведение критичности ТСМ на объекте «Укрытие». Отчет GRS по проекту SR – 2075/8 –1, рабочий пункт 1, GRS –А – 2414, 1997, — 44 с.
18. *Верцимаха О.Я., Павлович В.А., Бабенко В.А. и др.* Некоторые вопросы ядерной безопасности объекта «Укрытие» // Ядерная и радиационная безопасность, Т. 1, — Вып. 2, — 1998, — С. 52–67.
19. Заключение экспертной комиссии о причинах аномального события в помещении 304/3 объекта «Укрытие» в июне 1991 г. // ИБРАЭ РАН, 1992, — 67 с.
20. *Боровой А.А.* Оценка состояния ядерной безопасности объекта «Укрытие» и последствия гипотетического ядерного инцидента на объекте «Укрытие». Препринт ИАЭ-6283/3, Москва 2003, — 36 с.
21. Топливо из ЧАЭС начнут извлекать через 30 лет.  
<http://atomnews.info/?T=0&MID=1&Jid=53&NID=2640>.
22. *А.А. Боровой, Е.П. Велихов.* Чернобыль и Фукусима. Некоторые итоги // НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2021 г., — 76 с.
23. *Р.Л. Годун, А.А. Дорошенко, Д.А. Муляр.* Оценка эффективности регламентной системы контроля ядерной безопасности комплекса НБК-ОУ // ВАНТ. Проблемы современной ядерной энергетики. 2020. — №2 (126), — С. 71 — 80.

# Чернобыль. Разрушение чернобыльских лав

*А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, В. А. Хвощинский*

## Введение

В 2019 г. в эксплуатацию был принят Новый безопасный конфейнмент (далее НБК) объекта «Укрытие» ЧАЭС. Он позволяет на значительный срок (~ 100 лет) полностью защитить окружающую среду от воздействия радиации и приступить к окончательному преобразованию объекта в экологически безопасную систему.

Одним из наиболее сложных и долговременных этапов такого преобразования станет извлечение из сооружения ядерных материалов, их хранение и захоронение.

В результате процессов, происходивших во время аварии, ядерное топливо, находившееся в активной зоне (а. з.) реактора (всего ~ 180 т по урану), образовало в «Укрытии» несколько видов топливосодержащих материалов (ТСМ):

- макроскопические фрагменты а. з.;
- «горячие частицы», часто называемые «топливная пыль», содержащие диспергированное топливо и (или) другие соединения урана, например,  $(Zr, U) O_2$ ;
- растворимые соли урана в скоплениях воды, находящихся в «Укрытии»;
- застывшая своеобразная «лава», образовавшаяся в результате высокотемпературного взаимодействия топлива с материалами а. з. и блока (лавоподобные топливосодержащие материалы — ЛТСМ).

Согласно предварительным планам, подготовка и само извлечение ТСМ будет занимать несколько десятилетий, а с учётом происходящих сейчас событий этот срок ещё может значительно увеличиться. За это время свойства топливосодержащих материалов могут претерпеть серьёзные изменения, которые надо учитывать при разработке безопасной технологии проведения работ. В первую очередь это относится к лаве.

Цель настоящей работы — анализ имеющейся информации о возможном разрушении чернобыльской лавы с течением времени.

Она включает в себя три основные части.

**В первой** приводятся общие свойства ЛТСМ, находящихся в помещениях «Укрытия»

**Во второй** — результаты наблюдений процессов разрушения ЛТСМ в «Укрытии» до создания НБК, а также некоторая информация о стабильности остеклованных отходов, состав которых близок к составу ЛТСМ.

Наконец, **в последней части** рассматриваются микропроцессы, которые могут привести к разрушению лавы, находящейся сейчас под защитой НБК.

Следует отметить, что образование лавы характерно для крупных аварий, произошедших с повреждением активной зоны. Так произошло на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США) и на АЭС «Фукусима-1» (Япония). В последней её обнаружили во всех трёх разрушенных блоках (см., например, рис. 1). Вопросы временных изменений состояния ЛТСМ с точки зрения ликвидации последствий этой аварии также актуальны.



Рис. 1. ЛТСМ во 2-м блоке АЭС «Фукусима-1». Среди застывших лавоподобных отложений видна ручка контейнера топливных стержней

## **1. ЛТСМ в объекте «Укрытие»**

### **1.1. Образование и растекание лавы [1—4]**

В результате взрыва реактора 4-го блока верхняя плита биологической защиты (схема «Е») была выброшена в центральный зал и, упав назад, встала почти вертикально, опираясь на стенки шахты (см. рис. 2). Нижняя плита (сх. «ОР») была расколота и на ~ 4 м «вдавлена» вниз в подаппаратное помещение 305/2. При этом она смяла свою опору — массивный металлический крест.

В результате фрагменты разрушенной кладки активной зоны попали частично в центральный зал, а основная их часть оказалась в пом. 305/2. Здесь происходило образование ЛТСМ при высокотемпературном взаимодействии материалов а. з. с конструкционными материалами реактора, в том числе с серпентинитовой засыпкой, песком, бетоном и т.п. В результате в состав образовавшейся стекловидной матрицы ЛТСМ и в не растворившиеся в ней включения, кроме урана, циркония, кремния, магния, железа и кислорода, вошли относительно небольшие примеси других элементов. При проведении анализа их оказалось около двух десятков (см. таблицу 1).

Подавляющая часть ЛТСМ, которые обнаружили в помещениях блока, имеет схожий химический состав. Это может объясняться тем, что процесс образования расплава сопровождался перемешиванием за счёт газовыделения и конвективных процессов.

Тем не менее, в потоках застывшей лавы можно выделить две основных модификации: чёрную керамику (горизонтальный и малый вертикальный поток) и коричневую керамику (большой вертикальный поток)<sup>23</sup> (см. рис. 2).

Полагают, что они образовались в различных частях подаппаратного помещения, поскольку коричневая модификация наблюдается главным образом в юго-западном и юго-восточном квадрантах этого помещения.

Растекание потоков лавы по блоку шло следующим образом (рис. 2). Образовавшийся в пом. 305/2 расплав достиг паросбросных клапанов. По трубам, предусмотренным для сброса пара в случае проектной аварии, он попал на нижние отметки 4-го блока — в помещения парораспределительного коридора (ПРК) (отм. +6.000) и двух этажей бассейна-барботёра (ББ-1 и ББ-2), расположенных на отметках +3.000 и 0.000 соответственно.

**Таблица 1. Элементный состав 25 проб ЛТСМ из скопления «слоновья нога».**  
**Массовая доля в % (остальное — кислород)**

<i>Si</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Zr</i>	<i>Cu</i>	<i>Na</i>	<i>Ba</i>	<i>U</i>
31,1	6,1	$1,6 \times 10^{-1}$	4,3	$1,5 \times 10^{-3}$	4,1	$1,3 \times 10^{-1}$	4,4
<i>Al</i>	<i>Mn</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>B</i>
4,6	3,0	$4,4 \times 10^{-3}$	0,56	2,3	$2,2 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$

<sup>23</sup> Позднее было обнаружено небольшое количество ещё одной модификации ЛТСМ, названной «полихромная керамика».

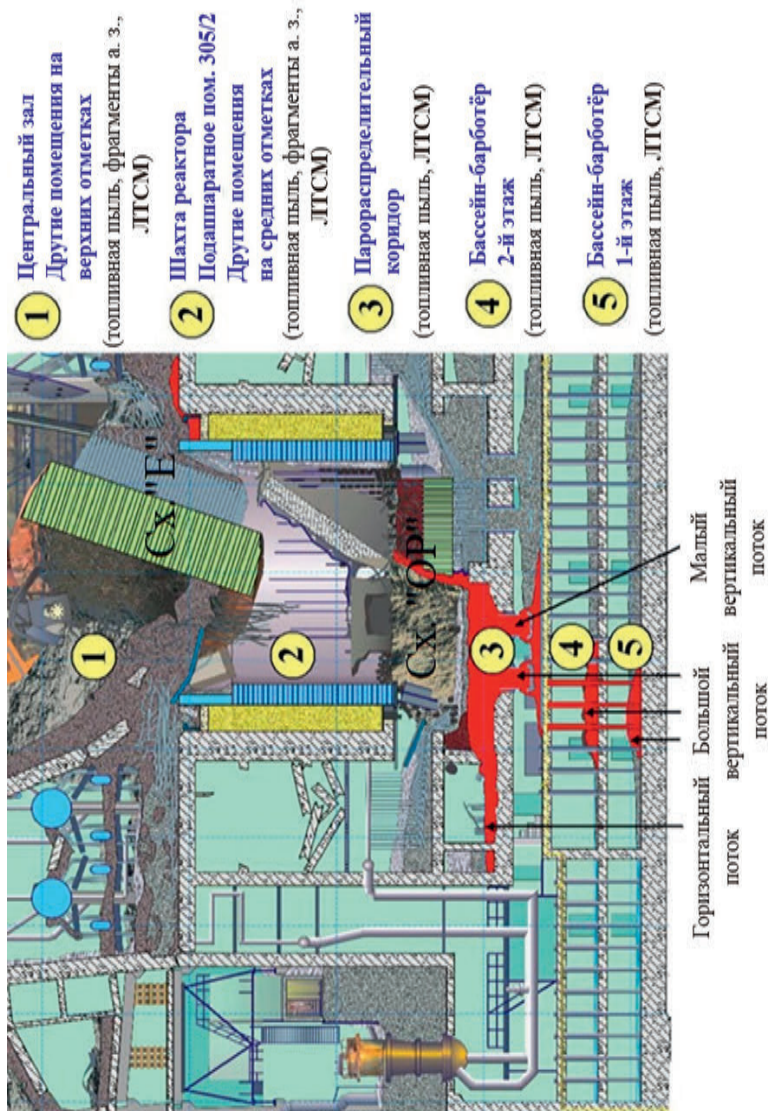


Рис. 2. Фрагмент разреза объекта «Укрытие». Показаны зоны расположения основных скоплений ТСМ и основные потоки ЛТСМ

В горизонтальном направлении поток ЛТСМ распространялся благодаря пролому, образовавшемуся при взрыве в стене, разделяющей подапаратное помещение 305/2 и пом. 304/3. Пройдя по горизонтальным коридорам, лава проникла на нижние отметки, образовав, в частности, большое скопление — так называемую «слоновью ногу».

Определённое на основании экспертных оценок полное количество ядерного топлива, входящее в состав ЛТСМ, составляет не менее 80 т (по урану).

- В центральном зале под завалами сброшенных материалов находится более 20 т топлива (по урану)<sup>24</sup>, в том числе и ЛТСМ;
- В пом. 305/2 — около 60 т ЛТСМ (предельно консервативная оценка);
- В горизонтальном потоке — около 11 т;
- В ПРК —  $(11.4 \pm 5.3)$  т;
- В ББ-2 —  $(8 \pm 3)$  т;
- В ББ-1 —  $(1.0 \pm 0.5)$  т.

Из этих оценок видно, что разрушение более тысячи тонн ЛТСМ (содержание урана приведено в таблице 2) и превращение их в «топливную пыль» может создать значительные трудности при извлечении этой пыли из разрушенного блока при разборке «Укрытия».

## 1.2. Макро- и микрохарактеристики ЛТСМ

Макросвойства основных типов лавы [5] приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Некоторые свойства основных типов лавы**

Тип лавы	Внешний вид. Краткое описание	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание урана, вес. %	Выгорание топлива, МВт×сут./кг U
Коричневая керамика	Цвет — коричневый. Поверхность чаще всего блестящая (рис. 3, 4) Имеет поры и трещины	2,5—3,0	10±2	12,6±0,4
Чёрная керамика	Цвет — угольно-чёрный. Поверхность матовая. Большое количество пор и трещин (рис. 5, 6)	0,7—2,7	5,5±1,5	12,5±0,5

<sup>24</sup> Без учёта топливной пыли.

**Размер видимых пор в лаве простирается от микрон до десятков сантиметров. В ней обнаружены и наноразмерные поровые каналы. Они образовались в результате накопления радиационных дефектов от альфа-распада трансурановых элементов, присутствующих в ЛТСМ (подробнее — см. ниже).**



Рис. 3. Коричневая лава из парораспределительного коридора



Рис. 4. Полированный препарат коричневой лавы. Изображение было получено в обратно-рассеянных электронах. Видны разнообразные включения в матрицу, при этом светлые пятна — включения урановых и уран-циркониевых фаз



Рис. 5. Чёрная лава в пом. 304/3. Начало «горизонтального потока»

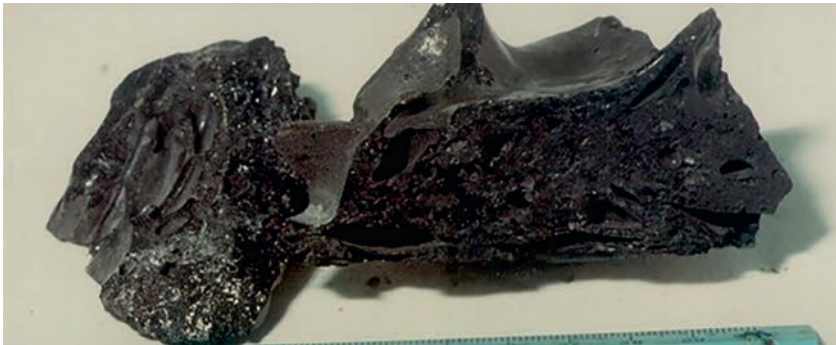


Рис. 6. Чёрная лава из бассейна-барботёра

Матрица ЛТСМ представляет собой силикатное стекло, в котором наблюдаются элементы кристаллизации. В ней имеются включения различного происхождения и размеров — от единиц до десятков мкм (см., например, рис. 4 и 7). Это гранулы металлов и сплавов, генетически не связанные с расплавом, а также кристаллиты, микролиты и новообразованные минералы, которые генетически связаны непосредственно с самой лавой.

Среди последних соединения урана: оксиды ( $UO_x$ ), оксиды урана, содержащие цирконий ( $UO_x \text{ с } Zr$ ), уран-цирконий-кислородная фаза ( $U_x Zr_y O_2$ ), силикат циркония, содержащий уран — «чернобылит» ( $Zr_{1-x} U_x$ )  $SiO_4$  и др. Объём включений составляет несколько процентов от общего объёма ЛТСМ.

Отметим важное обстоятельство. Диоксид урана — нестехиометрическое соединение, имеющее состав от  $UO_{1,6}$  до  $UO_{2,5}$  (вещество тёмно-коричневого цвета). Дополнительные (сверх стехиометрии) атомы кислорода удержи-



ваются в промежутках кристаллической решетки в результате внедрения атомов кислорода в решетку  $UO_2$ . По результатам рентгеновского фазового анализа структура большей части включений ЛТСМ в 1997 г. соответствовала оксиду  $UO_{2,25}$ .

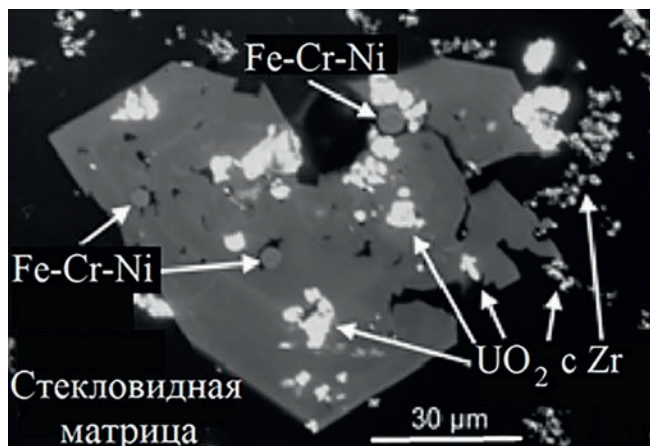


Рис. 7. Пример микрофотографии образца коричневой лавы из ПРК. На фоне стеклоподобной матрицы (чёрный фон) видны включения, содержащие  $UO_2$  и Zr, и гранулы нержавеющей стали (Fe-Cr-Ni). Фото Б. Е. Буракова, 1990 г.

В процессе дальнейшего окисления при достижении коэффициентом «х» при кислороде значения 2,66 оксид урана во включениях полностью переходит в закись — окись урана  $U_3O_8$  (цвет может меняться от зелёного до чёрного). При этом его плотность снижается до  $8.39 \text{ г/см}^3$ , а объём должен возрасти более, чем на 20%.

При продолжении окисления образуется оксид урана  $UO_3$  (цвет от жёлтого до красного).

Возрастание объёма включений после застывания лавы сдерживается матрицей. Это одна из причин возникновения в ней внутренних напряжений, снимающихся увеличением имеющихся и образованием новых трещин.

Химический состав собственно стеклообразных матриц (без включений) основных типов ЛТСМ приведён в таблице 3.

Из приведённых данных видно, что матрица ЛТСМ не представляет собой какого-либо уникального стекла и достаточно близка по своим свойствам к известным природным и искусственным стёклам.

**Таблица 3. Результаты рентгеноспектрального микроанализа матрицы основных типов ЛТСМ. Доля  $\text{SiO}_2$  — (60 ÷ 65)%**

Элемент	Коричневая керамика	Чёрная керамика
$\text{K}_2\text{O}$	1,5	1,7
$\text{CaO}$	6,8	7,2
$\text{MgO}$	5,8	4,9
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,2	5,3
$\text{ZrO}_2$	3,2	2,8
$\text{FeO}$		8,6
U	2,4	2,1

Содержание урана в матрице меньше, чем в лаве в целом (таблицы 1 и 3). В работе [5] сделаны оценочные расчёты содержания урана и циркония во включениях в силикатную матрицу для различных типов лавы — коричневой и чёрной (рис. 8).

Можно ли считать, что распределение радионуклидов, которые содержались в топливе перед аварией, пропорционально содержанию в них урана?

Есть данные, что и радиоактивные изотопы, в том числе и трансурановые элементы (основные  $\alpha$ -излучатели), сосредоточены во включениях [5]. В то же время, в работе [6] принимается однородная модель их распределения в ЛТСМ.

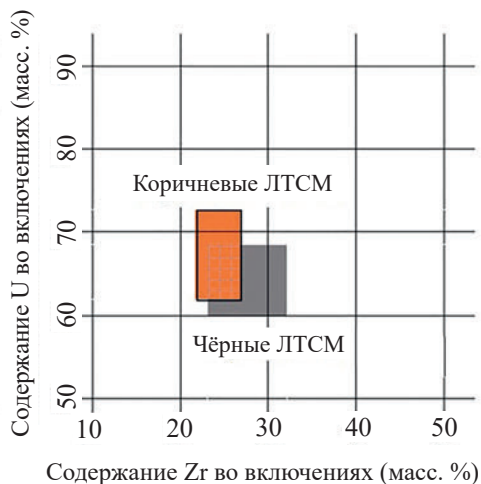


Рис. 8. Результаты оценочных расчетов содержания урана и циркония во включениях [5]

## 2. Изучение процессов разрушения ЛТСМ до создания НБК

### 2.1. Разрушение ЛТСМ, находящихся в «Укрытии» и в хранилищах

Активное разрушение лав началось в момент, когда их вертикальные потоки достигли нижних отметок блока [7]. Здесь, при контакте расплавленной лавы с водой, ранее заполнявшей первый и второй этажи ББ, образовались ещё два подвида керамики: «Пемза» и «Шлак». Первый из них, «Пемза», имел серо-коричневый цвет и представлял собой хрупкий, неоднородный материал с многочисленными порами, который легко рассыпался при сжатии и имел удельный вес меньше единицы. С течением времени «Пемза» практически вся рассыпалась, особенно в местах контакта с щелочными блочными водами, превратившись в некое подобие кашицы, которая при высыхании являлась источником пыли<sup>25</sup>.

«Шлак» образовался при контакте воды и водяного пара с большими скоплениями ЛТСМ. Такие скопления — «кучи» — находятся в конце большого вертикального потока на первом и втором этажах ББ. Они представляют собой застывшие массы, покрытые стеклообразной коркой (рис. 9). При первых исследованиях (1988 г.) обнаружилось, что под коркой «кучи» состоят из стеклообразных гранул неправильной формы с вариацией цвета от серо-розового до тёмно-коричневого.

Со временем свойства шлакообразных ЛТСМ значительно изменились. Корка растрескалась и стала хрупкой.

Сами «кучи» шлака утратили свою монолитность, гранулы с хрустом рассыпались под давлением инструмента.

---

<sup>25</sup> Образцы пемзы, помещённые в хранилища, сохранились существенно лучше [5].



Рис. 9. «Куча» гранулированных ЛТСМ на полу второго этажа бассейна-барботёра

Быстрое разрушения «Пемзы» и «Шлака», наблюдавшиеся в первое время, исследователи связывают с воздействием воды. Однако, после создания «Укрытия» её проникновение внутрь сооружения ограничилось оставшимися щелями и многие из помещений объекта стали высыхать.

К сожалению, в последующие годы целенаправленных и документированных наблюдений за поведением лавы во всех скоплениях ТСМ не проводилось. Их состояние регистрировалось время от времени в ходе разведывательных походов. Приведём некоторые зафиксированные факты (см. [7]).

### **Чёрная лава**

Впервые изменения чёрной лавы в виде появления так называемых «жёлто-зелёных пятен» были обнаружены на поверхности ЛТСМ в пом. 305/2 и 210/6 в 1990 г. Анализ новообразований позволил установить, что они содержат карбонат шестивалентного урана  $UO_2CO_3$ , что свидетельствует об окислении четырехвалентного урана до состояния окисления 6<sup>+</sup><sup>26</sup>. Более детальные исследования выявили присутствие в «желтых пятнах» таких соединений урана, как  $(UO_2)CO_3$  (резерфордин),  $UO_3 \cdot 2H_2O$  (эпипантинит) и др. [8].

В декабре 1990 г. ярко-жёлтые пятна новообразований покрывали часть поверхности чёрной лавы паросбросного клапана в пом. 210/6 (рис. 10, 11). К 2011 г. вся эта поверхность была покрыта плотным слоем оксикарбонатов урана достаточно большой толщины. При этом цвет её стал из ярко-жёлтого тёмно-зелёным.

<sup>26</sup> Напомним, что жёлто-зелёный цвет характерен для смеси  $U_3O_8$  и  $UO_3$ .

В 1995 г. жёлтые и зелёные пятна были найдены на поверхности некоторых стен помещений на отм. +9.000<sup>27</sup>.

В то же время в помещении 304/3 куски чёрной лавы не претерпели заметных изменений и остались такими же, какими были при первых обследованиях (1988—1990 гг.).

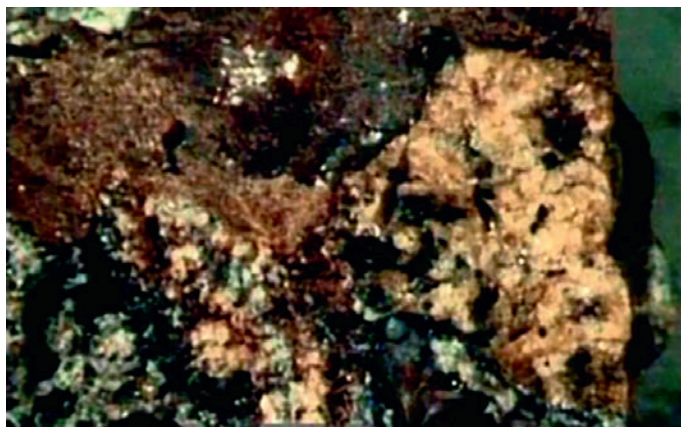


Рис. 10. Жёлтые пятна новообразований на поверхности чёрной лавы паросбросного клапана

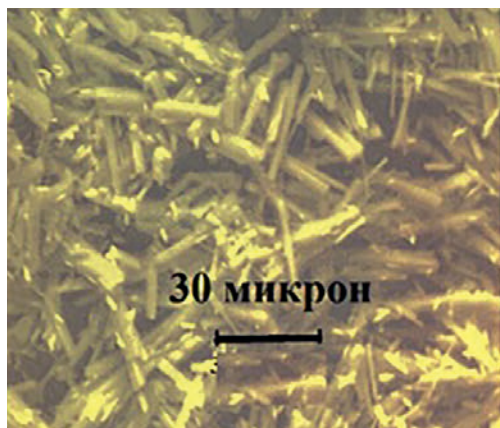


Рис. 11. Микроструктура новообразований

---

<sup>27</sup> Содержание изотопов плутония в новообразованиях в сотни раз ниже, а массовая доля урана в несколько раз выше, чем в ЛТСМ.

Высказывалась точка зрения, что появление пятен и наблюдавшееся относительно быстрое разрушение поверхности ЛТСМ связаны с тем, что в этих помещениях в стекловидную матрицу лавы легче проникали воздух и вода. Под воздействием кислорода четырёхвалентный уран, входящий в состав включений, частично перешёл в состояние 6+ и изменил цвет. При этом, как уже говорилось, увеличился объём включений, что и стало «спусковым механизмом» для разрастания и появления трещин, а дальше вода довершила разрушение лавы.

Произошла и деградация поверхности лавы «слоновьей ноги» (рис. 12).

В 1992 г. для отбора проб пыли с её поверхности использовали марлевый тампон, пропитанный клеевым составом. При попытке оторвать его вместе с тампоном легко отделилась часть поверхностного слоя в виде фрагментов с размерами до нескольких сантиметров (см. фото на рис. 13). Результат был неожиданным, поскольку ранее (1987 г.) для взятия образцов этого скопления из-за высокой твёрдости поверхности ЛТСМ пришлось использовать стрелковое оружие.



Рис. 12. Помещение 217/2. Скопление ЛТСМ — «Слоновья нога»

В то же время, за период наблюдений свойства «сталактитов» (рис. 14), которые находятся в том же помещении, что и «слоновья нога», практически не изменились. Это связывали с тем, что при строительстве «Укрытия» бетон, стекавший в это помещение застыл, образовав своеобразную крышу, которая не позволяла воде входить в контакт со «сталактитами».

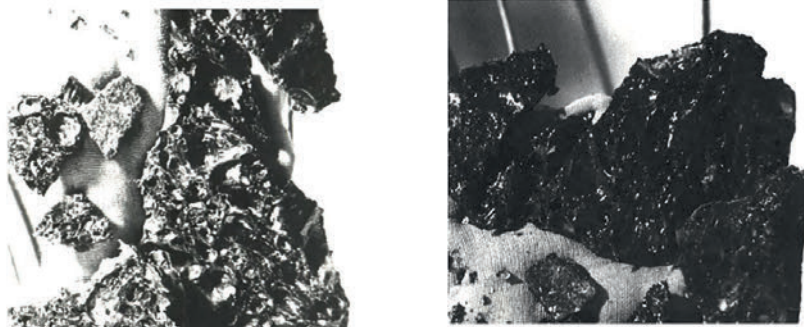


Рис. 13. Фрагменты ЛТСМ «слоновья нога», легко отделившиеся от поверхности



Рис. 14. «1» — натёк ЛТСМ в пом. 217/2, один из «сталактитов»

Образцы чёрной лавы в хранилищах РИ им. В.Г. Хлопина, ИПБ АЭС НАНУ и в НИЦ «Курчатовский институт» в течение более чем 20 лет (до 2009 г.) сохранили свой первоначальный вид.

### **Коричневая лава**

Что касается коричневой лавы, то особых её изменений в помещениях «Укрытия» не наблюдалось.

То же относится и к образцам, которые хранились в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина и в НИЦ «Курчатовский институт». Кроме того, большое количество проб коричневой лавы находилось в ИПБ АЭС НАНУ. При этом ни крупные образцы в Радиевом институте, ни достаточно мелкие пробы в ИПБ АЭС НАНУ за период более 20 лет не изменились.

Общий вывод, который был сделан исследователями к началу двухтысячных годов — главной внешней причиной макроскопического разрушения ЛТСМ в помещениях «Укрытия» является вода. Она, вместе с растворёнными солями и газами, попадает на поверхность и внутрь лавы, заполняет открытые поры и трещины, вызывает их увеличение за счёт целого ряда химических и физических процессов<sup>28</sup>. Это способствует разрушению, в первую очередь, внешних слоёв ЛТСМ, которые обладают меньшей прочностью из-за более быстрого охлаждения в процессе образования скоплений ЛТСМ.

## **2.2. Эксперименты по разрушению ЛТСМ в лабораторных условиях [7, 8]**

Несколько экспериментов по разрушению ЛТСМ были выполнены в лаборатории.

В двух циклах исследований измерялась скорость ветровой эрозии и разрушения лавы раствором, имитирующим «блочную воду».

Понятно, что оценки, полученные для небольших образцов в лаборатории, в лучшем случае, имеют качественный (порядковый) характер.

Приведём одну из таких оценок (подробнее см. [7]):

«Суммарное годовое пылеобразование в объекте «Укрытие» за счёт ветровой эрозии, при разумных предположениях о площади поверхности ЛТСМ, даёт не менее  $\sim 7 \cdot 10^{11}$  Бк по  $\alpha$ -активности и  $\sim 4 \cdot 10^{13}$  Бк по  $\beta$ -активности. Соответствующий пересчёт на удельную активность ЛТСМ приводит к следующей порядковой оценке — ежегодно в объекте превращается в пыль несколько десятков килограммов топлива».

При общей массе ЛТСМ более 1000 т, это — незначительная величина.

Исследования разрушения лавы раствором, имитирующим «блочную воду» привели к аналогичным результатам.

При определении времени растворения в «блочных» водах объекта «Укрытие» фрагментов ЛТСМ размерами 3—5 мм оценки дали значения  $>1000$  лет. Однако, при этом порядка 0,1—0,2 весовых % коричневых и чёрных ЛТСМ растворяются в первые сутки контакта с водой [3]. Было предположено, что в лаве под действием собственного излучения образуются водорастворимые соли.

Ещё до описанных исследований было изучена возможность разрушения лавы в больших внешних полях.

<sup>28</sup> В разрушении ЛТСМ могло играть роль образование гидроксидов, карбонатов и т.п., а затем — вымывание их водой. На увеличение трещин (особенно заполненных водой) влияли и колебания температуры.



В работе [9] проводилось облучение образцов ЛТСМ внешним  $\gamma$ -излучением  $^{60}\text{Co}$  при мощности экспозиционной дозы 15 Гр/с. Интегральная полученная доза составила  $\sim 10^7$  Гр. Она не привела ни к каким видимым изменениям образцов лавы. Масса образцов после облучения сохранилась с точностью до  $10^{-2}$  %.

### **2.3. Разрушение ЛТСМ под действием собственного излучения**

Среди причин разрушения лавы рассматривалось и её собственное излучение<sup>29</sup>. Со временем в ЛТСМ растёт поглощенная доза от этого излучения и накапливаются дефекты, которые могут привести к физическим и химическим изменениям основного материала стёкол (см. рис. 15).

Среди предполагаемых исследователями значимых изменений — разрыв межатомных связей, ионизация и смещение атомов. При этом возникают ядра отдачи, которые при своём движении в твёрдом теле могут производить ряд смещений других атомов и их ионизацию. В результате ионизации в присутствии воды, водяного пара, воздуха образуются коррозионные продукты, разрушающие стеклянную матрицу.

Первоначально возможность разрушения ЛТСМ под действием собственного излучения была рассмотрена в работе НИЦ КИ [9] в 1990 г. В ней говорилось: «Следует особое внимание обратить на самооблучение ТСМ от источников альфа-частиц. Имеющиеся экспериментальные данные указывают на то, что разрушение силикатных стёкол может начинаться при наборе суммарной дозы повреждения, соответствующей полному числу альфа-распадов порядка  $10^{18}\alpha/\text{см}^3$ »<sup>30</sup>.

---

<sup>29</sup> После создания НБК и устранения большинства внешних воздействий на лаву оно приобретает всё большее значение.

<sup>30</sup> Ниже мы более подробно остановимся на разрушении промышленных стёкол.

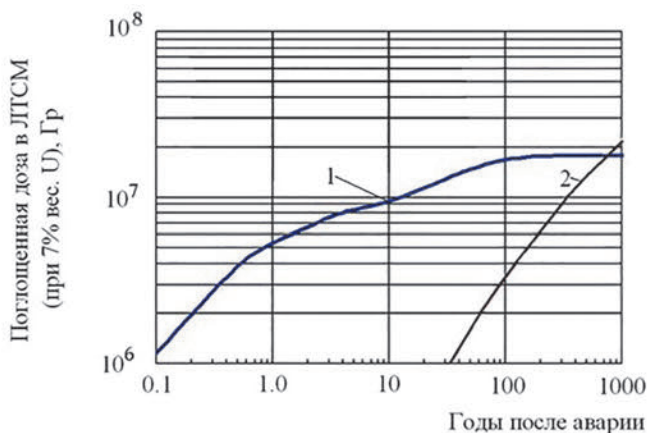


Рис. 15. Кумулятивная доза в ЛТСМ после аварии по  $\beta$  (1) и  $\alpha$  (2) излучающим нуклидам для массового содержания топлива 7% (U). Учтено обеднение топлива по цезию (2,5 раза) и рутению (20 раз)

Правда, проведённые оценки полного числа альфа распадов в 1 см<sup>3</sup> чернобыльских лав за сто лет давали значение, не сравнимое с критическим.

Однако в 1997—2000 гг. группой А.В. Жидкова (ИПБ АЭС НАНУ) был выполнен ряд работ по разрушению лавы под действием самооблучения. В обзоре [10], подводщем итоги выполненным исследованиям, говорилось следующее: *«Из-за радиационных повреждений непрерывно снижается термодинамическая и механическая устойчивость ЛТСМ. При имеющемся в объекте неблагоприятном сочетании внутреннего радиационного фактора и внешних воздействий в будущем однозначно произойдет то, что всегда происходит с сильно облучёнными хрупкими диэлектриками, а именно: тотальное разрушение. Такое видимое разрушение является конечной стадией длительного процесса и произойдёт в определённый момент внезапно (в течение короткого срока, исчисляемого несколькими неделями) с катастрофическими радиозоологическими последствиями, поскольку на современном технологическом уровне не существует способов длительного удержания такого количества высокодисперсной пыли в объекте, по крайней мере, в рамках тех свойств, которыми «Укрытие» обладает сейчас». И далее: «...такого рода катастрофа становится угрожающе вероятной в течение ближайших 10—50 лет»*

Эти выводы были сделаны на основании нескольких экспериментов в которых изучалась пылегенерирующая способность образцов ЛТСМ (чёрной и коричневой лавы), а также облучённого ядерного топлива. Образцы этих материалов были извлечены из помещений «Укрытия» в 1996 г.

Причину микроразрушений ЛТСМ автор обзора [10] видит в том, что в них накапливаются радиационные дефекты вследствие  $\alpha$ -распада трансураниевых элементов. При этом главную роль играет самооблучение за счет тяжёлых ядер отдачи, которые производят 90% всех устойчивых радиационных дефектов.

Специалисты НИЦ КИ сразу выразили сомнения по поводу интерпретации проведённых экспериментов и сделанного вывода о надвигающейся «катастрофе». Никто не сомневался в накоплении в лаве радиационных дефектов, ведущих к её разрушению. Было известно и о роли ядер отдачи в их образовании (см. ниже). Однако сделанное на этой основе заключение о деградации ЛТСМ в течение ближайших лет и полном разрушении за *«несколько недель»* представлялось весьма спорным.

Эти сомнения основывались, прежде всего, на анализе многолетних исследований сбросов и выбросов радиоактивности за пределы объекта, которые характеризовали общее состояние многочисленных скоплений ЛТСМ. Ничто не указывало на развитие быстро нарастающих, лавинообразных процессов их одновременного разрушения в различных помещениях объекта.

Действительно, измерения загрязнённости воздуха на площадке «Укрытия», связанной с выбросом радиоактивной пыли из «Укрытия» через имеющиеся в конструкции щели, говорили о тенденции к постепенному её снижению. А отдельные периоды незначительного возрастания загрязнённости коррелировали с масштабными работами, проводившимися внутри объекта.

Вода, находившаяся в помещении «Укрытия» и контактировавшая со многими скоплениями ЛТСМ, служила своеобразным индикатором состояния последних. В том числе и для тех скоплений, которые были недоступны прямому контролю. Исследования её радиоактивности указывали на происходящие процессы деструкции ТСМ, но говорили также о том, что эти процессы развиваются достаточно медленно и отнюдь не носят катастрофического характера, которое предсказывалось в работе [10].

Дальнейшее поведение лавы подтвердило необоснованность выводов о близком и внезапном её разрушении.

## **2.4. Отверждённые отходы как некоторый аналог ЛТСМ**

Как уже говорилось выше, матрица ЛТСМ не представляет собой какого-нибудь уникального стекла. По своему составу она близка к природным обсидиановым стёклам, а среди промышленных стёкол — к алюмосиликатным. Состав её близок и к составам стёкол, используемых для долговременного хранения отработавшего ядерного топлива (остеклованных отходов). Поэтому появляется возможность использовать некоторые данные, полу-

ченные из многочисленных работ по изучению стабильности таких стёкол, что и было сделано в работе [11].

Среди этих данных — количественная оценка воздействий, производимых в остеклованных отходах различными источниками радиации. Результаты приведены в таблице 4.

**Таблица 4. Источники радиации и производимые ими действия в остеклованных отходах [14]**

Источники радиации	Излучение	Процессы и производимые действия
α-распад актиноидов	Ядра отдачи (0,1 МэВ)	Несколько тысяч атомных смещений (почти вся энергия).
	α-частицы (4—6 МэВ)	Ионизация (95% энергии) + несколько сотен атомных смещений.
	γ-излучение	Ионизация (пренебрежимо мала по сравнению с β-распадом).
β-распад продуктов деления	β-частицы и γ-излучение	Ионизация + несколько атомных смещений

Из таблицы следует, что максимальное количество смещений возникает от **ядер отдачи**, возникающих при α-распаде<sup>31</sup>.

Каскад смещений, образуемых ядром отдачи <sup>235</sup>U, иллюстрирует рис. 16 (см. [15]).

Плотность выделяемой в каскаде энергии составляет около 1 эВ/атом, смещение атомов происходит за время <10<sup>-12</sup>с и может приводить даже к локальному «плавлению» материала.

В литературе отмечается, что вызываемые ядрами отдачи нарушения прочностных свойств силикатной матрицы приводят, как правило, к растрескиванию стекла из-за внутренних микронапряжений.

Источником этих напряжений может служить, в том числе, усиление газо-выделения в объёме материала с образованием газонаполненных пузырей под высоким давлением<sup>32</sup>.

<sup>31</sup> Так, для распада <sup>239</sup>Pu расчёты, проведённые для боросиликатного стекла, дают число атомных смещений в случае α-частицы — 380, а ядра отдачи — 1930. Аналогичные результаты получены и для α-частиц <sup>241</sup>Am [15]

<sup>32</sup> При захвате α-частицами электронов образуется гелий. Его концентрация возрастает вместе с кумулятивной дозой.

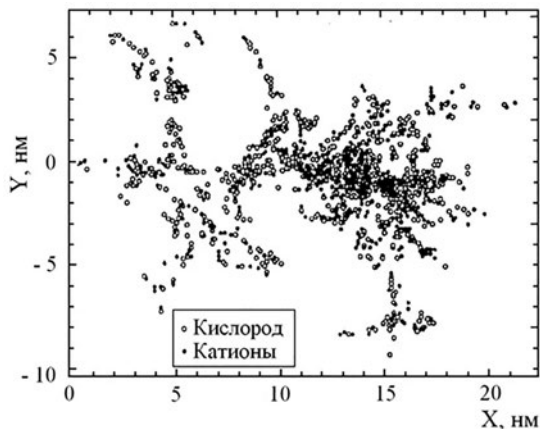


Рис. 16. Распределение смещённых атомов в каскаде соударений, вызванных ядром отдачи  $^{235}\text{U}$  с энергией 86 кэВ

К эффекту растрескивания приводит и возникновение электростатических полей в результате образования наведённых зарядов.

Наконец, ухудшение прочностных свойств стёкол может происходить под воздействием химических факторов, вызванных самооблучением. Здесь определённую роль играет ионизация атомов, вызванная самой  $\alpha$ -частицей. Многочисленные эксперименты показывают, что дозу, равную  $\sim 10^{18}$  альфа-частиц на  $\text{см}^3$ , можно считать нижним пределом, начиная с которого происходит существенное изменение свойств силикатной матрицы остеклованных отходов (см. [13]). Она разрушается, но это не носит внезапного и «катастрофического» характера.

В то же время, согласно расчётам, проведённым в [12], через 100 лет в матрице коричневой керамики количество альфа-распадов достигнет  $\sim 10^{16}\alpha/\text{см}^3$ .

К сожалению, существуют факторы, которые не позволяют считать стёкла, использующиеся для хранения РАО, аналогами ЛТСМ.

Приготовление остеклованных отходов, как и других сортов стекла, представляет собой многостадийный и строго контролируемый процесс. Так, они проходят так называемую стадию «осветления» и формирования однородной массы расплава. При этом большое внимание уделяется удалению из неё пузырьков газа. Они могут образовываться по разным причинам, в том числе, за счёт уменьшения растворимости газов в силикатном расплаве при понижении температуры.

Кроме того, стекло имеет малую теплопроводность и при охлаждении в нём возникают перепады температур. Это приводит к появлению внутренних напряжений, которые также следует удалить.

Проблемы снимаются в процессе контролируемого отжига. Это имеет определяющее значение для долговечности стёкол.

По понятным причинам чернобыльские лавы образовались без прохождения этих стадий (так называемое «недоваренное стекло»). Отсюда — появление в них пузырьков и трещин (особенно на поверхности) и возможность продолжения кристаллизационных процессов. Важную роль играет и существование включений в ЛТСМ. Поскольку они содержат материалы, способные изменять со временем свой объём, это является существенным фактором при разрушении лавы.

Завершая этот небольшой раздел, авторы считают важным обратить внимание на то, что в последние 5—7 лет в связи с развитием практических работ по подготовке к глубинному захоронению высокоактивных тепловыделяющих отходов исследования по характеристике стёкол ведутся существенно более системно.

Основные усилия сосредоточены на оценке удельной активности труднодетектируемых долгоживущих слабосорбируемых радионуклидов, практически не дающих вклад в дозу облучения персонала при производстве стекла и эксплуатации пункта временного хранения РАО, но имеющих первостепенное значение при обосновании долговременной безопасности [16—19]. Второй аспект — исследования механического состояния, понимание которого важно для планирования технологии перетаривания отходов в специальные контейнеры для захоронения, а также минимизации пустотного пространства [20]. В 2023 году керны реального стекла были впервые отобраны на ФГУП «ПО «Маяк» и доставлены в горячие камеры Института реакторных материалов. На 2024 год запланированы исследования их физико-механических свойств и радионуклидного состава. Соответствующие результаты будут полезны и для анализа отдельных аспектов эволюции состояния ЛТСМ.

Начиная с 2017 года, проводятся работы, направленные на подтверждение сохранения при облучении свойств нового боросиликатного стекла [21]. Для этого были подготовлены образцы, которые облучались на ускорителе (моделирование условий набора мощности дозы в  $10^9$  Гр), а также с добавлением Pu-238 (для ускоренного набора  $10^{19}$  альфа-распадов/см<sup>3</sup>). Подготовка этих экспериментов сопровождалась разработкой соответствующих математических и расчётных моделей [22—24]. Результаты экспериментальных исследований показали, что при наборе дозы до  $10^9$  Гр свойства стёкол остаются в рамках регламентируемых значений [25—26].

### **3. Микропроцессы, способные привести к разрушению лавы, защищённой НБК**

Ввод в эксплуатацию НБК (10 июля 2019 года) создал новые условия для долгосрочной сохранности ЛТСМ. Влияние внешних процессов постепенно минимизировалось.

Так, прекратилось поступление большого количества воды в помещения 4-го блока и они стали постепенно высыхать. Влажность воздуха стала снижаться и упала скорость движения его потоков. А это означает, что уменьшилась эрозия поверхности лавы. В то же время, значительно увеличилась масса и тепловая инерция всего сооружения, поэтому уменьшились температурные колебания внутри него, приводившие к росту трещин в матрице ЛТСМ. В результате всё большее внимание исследователей стали привлекать внутренние процессы, обусловленные её радиоактивностью и наличием включений.

На один из таких процессов указывал уже обсуждавшийся выше эффект — появление жёлтых и зелёных пятен на поверхности ЛТСМ, когда соли четырёхвалентного урана при взаимодействии с кислородом воздуха перешли в состояние окисления 6+. Следствием чего стали стремление включений к увеличению объёма и возникающие в матрице напряжения. А это, в конечном итоге, привело к появлению трещин и разрушению лавы.

Неясным оставался вопрос о том, каким путём воздух проникает к скоплениям, находящимся внутри матрицы.

В начале 2000-х годов группа В.Г. Габелкова выполнила ряд работ ([27—31]) по структуре чернобыльских лав и процессам их разрушения. Они позволили создать модель происходящих в ЛТСМ процессов и ответить на вопрос о поведении лавы после создания НБК. Основными являлись следующие положения:

- образование в ЛТСМ наноразмерных поровых каналов в результате накопления радиационных дефектов от альфа-распада;
- поступление кислорода воздуха по этим каналам к включениям, содержащим оксид урана —  $UO_2$ <sup>33</sup>
- доокисление  $UO_2$  до  $U_3O_8$  и вплоть до  $UO_3$ , приводящее к увеличению объёма включений, появлению напряжений в матрице и, в итоге, к увеличению размера трещин и формированию новых.

Существование наноразмерных поровых каналов в лаве обсуждалось в работе [27], опирающейся на методику, описанную в [28]. Исследователи показали, что поровое пространство в лаве, помимо газовых пор и трещин, включает в себя и каналы с диаметром в несколько десятков нанометров.

---

<sup>33</sup> Как выяснили исследователи [29], вода по нано-поровым каналам не поступает.

Они являются результатом объединения части треков  $\alpha$ -частиц, образовавшихся в результате распада радионуклидов, содержащихся в ЛТСМ. Характерные размеры разного вида пор приведены в таблице 5 [29].

**Таблица 5. Объемы составляющих порового пространства ЛТСМ**

Характеристика	Большие газовые поры	Малые газовые поры	Трещины	Наноканалы	Нанопоры
Коричневая керамика					
Объём, %	5—11	0,6—1,3	0,3—0,6	0,3—0,7	-
Диаметр, мкм	40—200	6—12	2—2,5*	0,04—0,06	-
Чёрная керамика					
Объём, %	-	7—15	0,9—2,0	1,1—1,3	0,2—0,3
Диаметр, мкм	-	6—11	2—2,5*	0,04—0,06	0,015—0,035
*Указана толщина, длина составляет 65—200 мкм					

Из таблицы 5 следует, что содержание наноразмерных поровых каналов в чёрной лаве существенно больше, чем в коричневой.

Чёрная керамика содержит еще и нано-поры (см. таблицу 5). Их формирование произошло при охлаждении ЛТСМ и вызвано различием в коэффициентах линейного теплового расширения основной массы матрицы [29].

Авторы работы [30] пишут «Наноразмерные поровые каналы обеспечили формирование открытой пористости материалов, соединив газовые поры между собой и с внешней средой. Именно наноразмерные поровые каналы определяющим образом влияют на формирование микроструктуры, а также ее эволюцию и, вследствие этого, на физико-механические свойства ЛТСМ».

В работе [30] приводится и схема микроструктуры коричневой керамики (рис. 17).

Каналы позволяют поступать кислороду воздуха к включениям, содержащим оксид урана.  $UO_x$  в них окисляется, а объём включений увеличивается<sup>34</sup>. Увеличение объёма сдерживает матрица. В результате возникшие в ней напряжения снимаются за счёт увеличения размеров трещин и образования новых. Это приводит к дальнейшему увеличению поступления воздуха и, главное, воды (по трещинам) в лаву, вызывая ускорение её разрушения.

Количество наноразмерных поровых каналов максимально вблизи включений оксидов урана из-за большой концентрации  $\alpha$ -распадов [30].

<sup>34</sup> По данным рентгеновского фазового анализа, стехиометрический коэффициент X для включений  $UO_x$  после аварии составлял 2,25. К 2019 году он увеличился до 2,34. Включения находились в сжатом состоянии [30, 31].



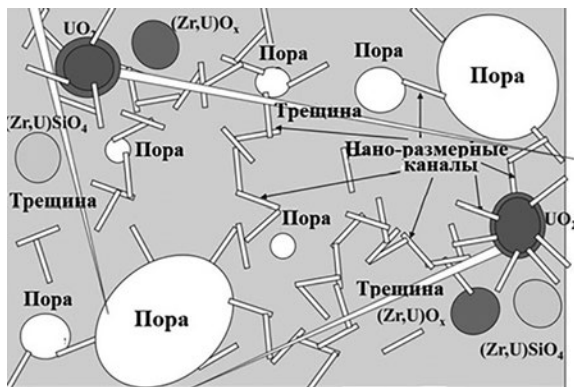


Рис. 17. Микроструктура коричневой керамики ЛТСМ. Модель 2021 года (схематичное представление) [30]

Как уже говорилось, создание НБК должно привести к высыханию помещений. Но это не остановит процессы окисления оксида урана  $UO_x$  во включениях, увеличения трещин и разрушения лавы. Однако постепенно затухают процессы образования гидратов и растворимых соединений урана и их вымывания.

В работе [30], опубликованной в 2021 г., обсуждаются и новые процессы, вызванные изменениями со временем фазового состава самой матрицы (стеклофазы), и постоянно протекающие в ней.

Во-первых, это радиационно-стимулированное образование уранил-силиката гидрата натрия-калия  $(Na,K)_2(UO_2)_2(Si_2Og)_3 \cdot 4H_2O$ .

Во-вторых, продолжающаяся кристаллизация силикатной стеклофазы ЛТСМ.

Образование уранил-силиката гидрата натрия-калия идёт по мере накопления в лаве достаточного количества радиационных дефектов. Происходит оно на границе включений и матрицы. В этом участвуют оксид урана  $UO_{2,34}$  (из включений) и оксиды кремния, натрия и калия (из матрицы). Образование уранил-силиката гидрата натрия-калия приводит к возникновению напряжений, что стимулирует разрушение ЛТСМ.

Причиной разрушения лавы является и процесс образования и роста в матрице кристаллов, также приводящий к возникновению в ней напряжений. Об этом свидетельствует обнаружение кубического и тетрагонального оксидов циркония, силиката циркония  $ZrSiO_4$ , силиката алюминия  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ , (возможно, силиката кальция  $Ca_2SiO_4$ ), а также нескольких фаз оксидов

кремния  $\text{SiO}_2$ . Кристаллизации способствует наличие значительной концентрации радиационных дефектов [30].

Авторы пишут: «В отдалённой перспективе поведение ЛТСМ будут определять три процесса: окисление оксида урана  $\text{UO}_x$  во включениях, радиационно-стимулированное фазообразование уранил-силиката гидрата натрия-калия  $(\text{Na,K})_2(\text{UO}_2)_2(\text{Si}_2\text{O}_6)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  и кристаллизация силикатной стеклофазы ЛТСМ.

При нынешней скорости окисления переход оксида урана  $\text{UO}_{2,34}$  в оксид урана  $\text{U}_3\text{O}_8$  приведёт к разрушению ЛТСМ через 25—50 лет, т. е. в период между 2043—2068 годами. ЛТСМ полностью разрушатся на частицы стеклофазы со средними размерами 100—200 мкм».

## Заключение

Процесс разрушения ЛТСМ продолжается сейчас и продлится в течение продолжительного времени.

Надо отметить, что предсказать сколько-нибудь точное время разрушения всех скоплений лавы (даже с ошибкой в десятилетие) невозможно, и не только из-за сложности происходящих в ней процессов.

Это объясняется объективными причинами.

Хотя образование ЛТСМ произошло (в основном) в подапаратном помещении 305/2 и состав их скоплений схож между собой, дальнейшие условия их «костывания и хранения» сильно различаются для тех или иных помещений «Укрытия».

Так, многие скопления оказались залитыми слоем бетона при строительстве объекта и хранятся в условиях ограниченного поступления воздуха и воды. В качестве примера можно привести часть горизонтального потока, протекавшего по коридорам 301/5 и 301/6 (см. рис. 18).

Часть ЛТСМ долгое время находилась в помещениях с высокой влажностью и в прямом контакте с водой. Даже после создания НБК в течение ряда лет в помещениях на нижних отметках, например, ББ-1и ББ-2, помещении 001/3 и др. (рис. 19, 20) могла находиться вода.

В то же время, большая часть помещений «Укрытия» к 2000 г. была уже сухая.

Тепловой режим для отдельных скоплений также сильно различается.

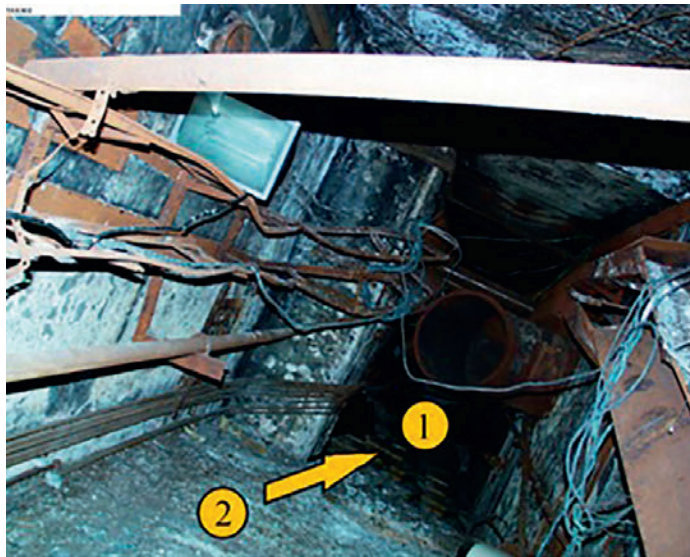


Рис. 18. Коридор 301/5. 1 — открытое скопление ЛТСМ, 2 — застывший бетон покрывает слой лавы. Стрелкой показано направление потока бетона. Его слой достигает толщины в десятки сантиметров



Рис. 19. Отбор проб воды в помещении бассейна-барботёра

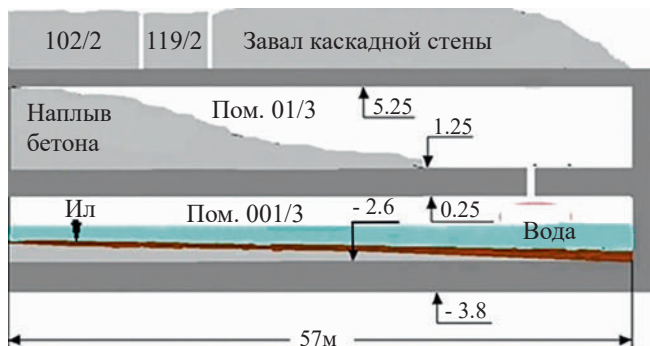


Рис. 20. Разрез помещений 001/3 и 01/3. Указаны строительные отметки. Вид с севера. Объём воды в помещении 001/3 до создания НБК составлял около 300 м<sup>3</sup>

В течение нескольких лет после аварии в ряде помещений температура воздуха зимой могла опускаться ниже нуля и в порах и щелях лавы вода должна была замерзать. В других — наблюдались колебания только в области положительных температур. Поэтому период, в течение которого объект будет постепенно превращаться в «хранилище радиоактивной пыли»<sup>35</sup> может длиться многие годы.

Как это согласуется с имевшимися до 2022 г. планами полной разборки «Укрытия», извлечения и захоронения ТСМ?

Основные этапы работы выглядели следующим образом [32]:

**Демонтаж нестабильных конструкций → отработка технологии извлечения ТСМ → выборочное извлечение ТСМ и их буферное хранение → полное извлечение ТСМ и их захоронение, разборка «Укрытия».**

Ориентировочно на эти работы отводилось ~70 лет. В силу известных событий 2022 г. этот срок может только увеличиться и, скорее всего, к этапу полного извлечения ТСМ лава полностью разрушится.

Надо отметить, что в количество подвижной радиоактивной пыли внесёт свой вклад и ещё один фактор, связанный с высыханием помещений «Укрытия» после создания НБК.

Эта пыль, удерживаемая ранее силами адгезии на стенах, потолках, полах помещений, значительно увеличит свою подвижность. При любых возмущениях она будет подниматься в воздух в виде аэрозолей.

Произойдёт и пересыхание скоплений воды. Донные отложения могут дать свой вклад в образование радиоактивных аэрозолей.

<sup>35</sup> «Stockage de poussières radioactives» — выражение профессора П. Пелерена, главы департамента Франции по защите от ионизирующего излучения.

## Литература

1. Пазухин Э. М. Лавообразные топливосодержащие массы четвертого блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования // Радиохимия, 1994, — Т. 36, — № 2, — С. 97 — 142.
2. Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Боровой А. А., Велихов Е. П., Ключников А. А. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. — М., Наука, 2010, — 240 с.
3. Боровой А. А., Велихов Е. П. Опыт Чернобыля (работы на объекте «Укрытие»). Часть 1, М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2012, — 168 с.; Часть 2, 2013, — 162 с.; Часть 3, 2013, — 156 с.; Часть 4, 2015, — 138 с.
4. А.А. Боровой. Топливный баланс при аварии на ЧАЭС. Препринт РНЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6527/3, Москва, 2008 г., — 49 с.
5. Богатов С.А., Боровой А.А., Гаврилов С.Л. и др. Микроструктура лавообразных ТСМ объекта «Укрытие». РНЦ «Курчатовский институт», ИБРАЭ РАН. Препринт № IBRAE-2008-05. — 36 с.
6. В.Г. Барьяхтар, В.В. Гончар, А.В. Жидков, А.А. Ключников. Радиационные повреждения в лавообразных топливосодержащих материалах объекта «Укрытие». Препринт НАН Украины. МНТЦ «Укрытие», 98—12, Чернобыль, — 18 с.
7. С.А. Богатов, А.А. Боровой, Гаврилов С.Л. и др. Результаты исследований долговременного поведения чернобыльских лав в объекте «Укрытие». Препринт ИАЭ-6565/3 Москва, 2009 г. — 56 с.
8. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отв. исполнитель Боровой А.А., Отчет МНТЦ «Укрытие», № 3836, 2001 г., Чернобыль.
9. Платонов П.А., Штрэмбах Я.И. и др. Исследование структуры и физико-химических свойств топливосодержащих композиций из объекта «Укрытие». Отчет по договору с КЭ при ИАЭ, инв. № 6/90 от 12.12.90, — С. 32.
10. Жидков А.В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния. Проблемы Чернобыля, 2001, — Вып. 7, — С. 23 — 40.
11. А.А. Боровой, Д.Ф. Цуриков, Я.И. Штрэмбах. Чернобыльские лавы и остеклованные отходы (динамика разрушения). Препринт ИАЭ-6626/3, Москва, 2010.
12. E.M. Pazukhin, A.A. Borovoi, K.G. Rudyu. Effect of  $\alpha$ -ray self-irradiation on stability of lava-like fuel-containing masses from the fourth block of the Chernobyl NPP. Radiochemistry 44, 615 (2002).
13. Соболев И.А., Ожован М.И., Щербатова Т.Д., Батюхнова О.Г. / Стекла для радиоактивных отходов. М., Энергоатомиздат, 1999, — 238 с.

14. *Weber W.J.* Radiation effects in nuclear waste glasses. Nucl. Instr. Methods in Physics Research. 1988. — В32. — P. 471 — 479.
15. *Ziegler J. F., Biersack J. P., and Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon, New York, 1985.
16. *Ремизов М. Б., Козлов П. В., Борисенко В. П., Дементьева И. И., Блохин П. А., Самойлов А. А.* Разработка алгоритма оценки радионуклидного состава остеклованных ВАО ФГУП «ПО «Маяк» для цели их безопасного захоронения // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 3 (4). — С. 102—110.
17. *Богатов С.А.* Оценочный расчёт активности некоторых долгоживущих радионуклидов в составе РАО класса 1 — остеклованных ВАО, образующихся при переработке ОЯТ реакторов ВВЭР / Богатов С.А., Блохин П.А., Козлов П.В. [и др.] // Вопросы радиационной безопасности. — 2019. — № 2 (94). — С. 39—46.
18. *Богатов С.А.* Усреднённые оценки удельной активности и тепловыделения остеклованных высокоактивных отходов, накопленных на ФГУП «ПО «МАЯК» / Богатов С.А., Блохин П.А., Уткин С.С. [и др.] // Вопросы радиационной безопасности. — 2021. — № 3 (103). — С. 3—12.
19. Определение радиэкологически значимых радионуклидов углерода-14, технеция-99, йода-129 в остеклованных высокоактивных отходах, образующихся при переработке отработавшего ядерного топлива / Е. В. Чухланцева, О. В. Степанова, О. Ю. Диченко Т.А., Зайцева, К.А. Джемелло, Е.Л. Мурашова, Ю.М. Татарникова, Е.А. Беланова, П.А. Блохин // Журнал аналитической химии. — 2023. — Т. 78, № 12. — С. 1151—1162.
20. *Дубровин Е.Н., Чеснокова А.Ю., Поляков Е.В., Ремизов М.Б., Козлов П.В., Мальцев А.А.* Выбор режимов термообработки и изготовления имитаторов керна ОВАО для подготовки к проведению исследований накопленных остеклованных ВАО ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. — 2024. — № 1.
21. *Алой А. С., Трофименко А. В., Кольцова Т. И., Никандрова М. В.* Физико-химические характеристики остеклованных модельных ВАО ОДЦ ГХК // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 4 (5). — С. 67—75.
22. *Алой А. С., Блохин А. И., Блохин П. А., Ковалев Н. В.* Радиационные характеристики боросиликатного стекла, содержащего высокоактивные отходы // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 3 (12). — С. 93—100.
23. *Алой А. С., Ковалёв Н. В., Прокошин А. М., Блохин А. И., Блохин П. А. и др.* К вопросу об оценке поглощенной дозы в остеклованных высокоактивных радиоактивных отходах с учетом реальной геометрии бидонов // Ядерная и радиационная безопасность. — 2020. — № 4 (98). — С. 61—72.

24. Математическая модель первичных радиационных повреждений боросиликатного стекла, предназначенного для иммобилизации радиоактивных отходов / Синюков Р. Ю., Блохин П. А., Пряничников А. А. [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2020. — № 3. — С. 5—18.
25. Алой А. С., Ковалев Н. В., Прокошин А. М., Карпович Н. Ф., Кольцова Т. И., Горшков Н. Г., Калинин В. А., Блохин А. И., Блохин П. А., Дорофеев А. Н. Исследование радиационной устойчивости боросиликатного стекла к бета- и гамма-излучению с помощью ускоренных протонов // Радиоактивные отходы. — 2021. — № 1 (14). — С. 8—18.
26. Алой А. С., Карпович Н. Ф., Ковалев Н. В., Прокошин А. М., Кольцова Т. И., Крецер Ю. Л., Сластихина П. В., Мальчукова Е. В., Левицкий В. С., Ломасов В. Н. Влияние внешнего облучения электронами на свойства модельного боросиликатного стекла ОДЦ ГХК // Радиоактивные отходы. — 2023. — № 3 (24). — С. 34—43.
27. С. В. Габелков, А. А. Ключников, Е. Е. Олейник и др. Поровые каналы как составляющая порового пространства лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. 2014, — Вып. 22, — С. 70 — 75.
28. Габелков С.В. Физические основы и опыт применения метода определения объемов совокупностей поровых каналов в порошках и пористых телах. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. вакуум, чистые металлы и сверхпроводники. 2011. — № 6, — С. 71 — 75.
29. Габелков С.В., Носовский А.В., Щербин В.Н. Модель деградации микроструктуры лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие». // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. 2016, — Вып. 26, — С. 75 — 83.
30. С.В. Габелков, И.В. Жиганюк. Обновленная модель эволюции микроструктуры лавообразных топливосодержащих материалов 4-го блока Чернобыльской АЭС. Коричневая керамика. // Ukrainian Journal of Physics, 2021. — Vol. 66, — No. 4. — p. 348 — 366.
31. Габелков С.В., Жиганюк И.В., Кудлай В.Г., Пархомчук П.Е., Скорбун А.Д., Чиколовец С.А. Состояние кристаллических фаз лавообразных топливосодержащих материалов 4-го блока ЧАЭС. III Международный научный форум «Ядерная наука и технологии», посвященный 30-летию Независимости Республики Казахстан. Тезисы. ИПБ АЭС НАНУ. Алматы, Республика Казахстан. 20—24 сентября 2021 г.
32. Доклад руководства ЧАЭС на семинаре «Развитие площадки Чернобыльской АЭС» в 2013 г.

## **Чернобыль. Лесные пожары**

*А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, С. Н. Краснощёров, В. А. Хвоцинский*

### **Введение**

В начале апреля 2020 г. в Чернобыльской зоне отчуждения (ЗО) вспыхнул лесной пожар. С большим трудом его удалось потушить за 10 суток. Однако через несколько дней из-за сильного ветра снова появился открытый огонь. Дым от пожара достиг Киева, города с населением более 3 млн чел. Власти призвали жителей не выходить из домов без необходимости и не открывать в квартирах окна, несмотря на заверения специалистов, что смог не представляет химической или радиационной опасности (<https://ria.ru/20070821/72856485.html>). Отметим, что смог сам по себе представляет опасность для здоровья людей, провоцируя воспаление дыхательных путей и слизистых оболочек. Рекомендации властей об ограничении нахождения людей на улице в период смога являются естественными.

Полностью все возгорания, охватившие площадь ~ 20 тыс. га (!), были ликвидированы лишь к середине мая. Огонь уничтожил 12 сел (выселенных) и большой массив леса. К его тушению было привлечено более тысячи человек, 120 пожарных машин, несколько вертолетов и самолетов, 10 беспилотных летательных аппаратов. Хотя пожары в ЗО происходили и в предыдущие годы, в этот раз масштаб возгорания и близость его к особо загрязнённой после аварии территории (рис. 1), вызвали настоящую панику в СМИ.

Последствия пожара активно обсуждались и в специальной литературе. При этом высказывались прямо противоположные мнения. Например, с точки зрения ассоциации экологов Украины «новый пожар формирует новую карту загрязнения, поскольку поднятые в воздух радионуклиды рассеиваются там, где раньше было относительно безопасно, где можно было осуществлять какую-то хозяйственную деятельность» [1], т. е. происходит заметное увеличение «радиоактивного пятна». Нужно отметить, что расползание радиоактивного пятна — естественный процесс, сопровождающий любое радиоактивное загрязнение местности. Оно происходит как за счет природных процессов, так и с участием человека. При этом за счёт естественных процессов распада и заглупления радионуклидов общая концентрация радиоактивности в почве всё равно постепенно снижается.



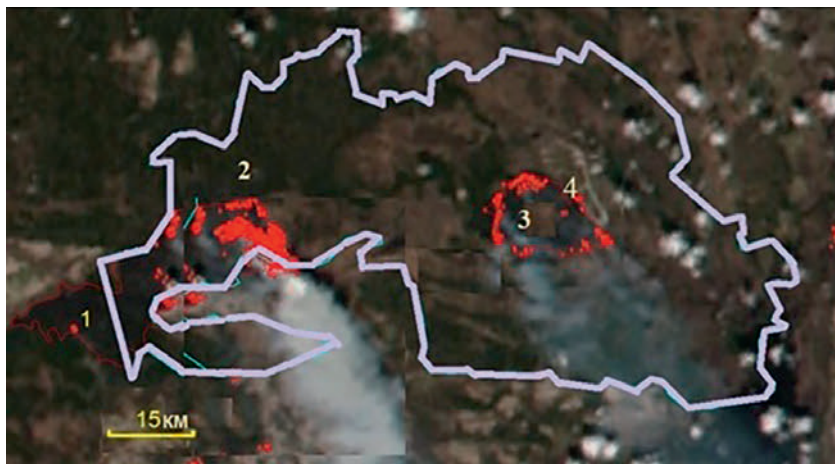


Рис. 1. Спутниковый снимок пожара в 30, апрель 2020 г.:  
1 — место возникновения пожара 3 апреля; 2 и 3 — состояние на 8 апреля;  
4 — месторасположение ЧАЭС. Сплошная линия — граница 30

А вот результаты анализа российских ученых: «Мы подробно анализировали украинские данные, переданные в МАГАТЭ в апреле этого года... Понятен образ — радиоактивность с пожаром поднимается в воздух и несётся на населенные пункты. Этот образ страшен. Но когда смотришь на цифры, оказывается, что, страх тут совершенно неуместен» [2]. Большинство публикаций в зарубежных научных журналах последний вывод подтвердили. Об этом же говорилось и в заявлении МАГАТЭ [3].

Вместе с тем последствия возгораний для людей, работающих непосредственно в 30, прежде всего пожарных, а также жителей сёл, расположенных совсем рядом с границей зоны, обсуждались меньше. В настоящей работе, особенно на фоне регулярно предсказываемого синоптиками сухого и жаркого лета, а также в связи с опасностью увеличения числа умышленных поджогов, мы хотели бы вернуться именно к этим проблемам. При этом мы опираемся на опыт, полученный сотрудниками российских институтов, которые работали в 1990-е годы на объекте «Укрытие» и провели ряд исследований пожаров в 30.

## 1. История вопроса

Во время активной стадии аварии на ЧАЭС, длившейся около 11 дней, из разрушенного реактора 4-го блока были выброшены (и часть из них загрязнила обширные территории) радиоактивные вещества, включая:

- 100 % радиоактивных благородных газов (радиоизотопы Kr, Xe);
- 50—60 % радиоизотопов йода;
- $33 \pm 10$  % радиоизотопов цезия;
- менее 5 % нелетучих радиоизотопов Zr, Nb, Ru, Sb, Ce, Eu, U, Pu, Am, Cm, которые находились в составе частиц мелкодиспергированного облучённого ядерного топлива — топливных частиц [4].

К 2000 г., в результате работ по отбору и анализу большого количества проб, взятых в почвенном слое 30, удалось получить оценки интегральной активности наиболее долгоживущих радионуклидов, попавших в окружающую среду в зоне отчуждения<sup>36</sup>:

- $2,8 \cdot 10^{15}$  Бк цезия-137;
- $7,7 \cdot 10^{14}$  Бк стронция-90;
- $1,5 \cdot 10^{13}$  плутония ( $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ ) (см. [5] и ссылки в ней).

Загрязнение зоны отчуждения очень неравномерно. Поэтому приведённые выше цифры дают лишь общее представление о степени опасности радиоактивности, аккумулированной на этой территории.

Более половины территории 30 (~ 25 000 га) покрыто лесами, в которых преобладают сосна (~ 60%) и береза (~ 25%). Весь этот лесной массив в той или иной степени подвергся воздействию радиоактивных осадков. Леса выступили и своеобразной «ловушкой», препятствующей дальнейшему распространению радионуклидов. Как показали недавние исследования [6], степень их вымывания и выветривания из почвы после того, как лес погиб в результате пожаров, многократно возрастает. Тем самым ускоряется расплывание радиоактивного пятна. Сразу после аварии основная часть загрязнений, упавших на лес, сосредоточивалась в кронах деревьев. Но со временем из-за ветров, дождей, падения хвои и листьев они оказались в лесной подстилке и почве. Еще через какое-то время по мере разрушения топливных частиц, попавших в почву, и образования растворимых соединений радионуклидов стал нарастать процесс поступления активности в верхние отделы растений уже через их корневую систему. При этом нужно отметить, что после пожара новая густая поросль молодого леса поднимается уже через год-два, и она может быть даже более надёжной защитой от выветривания.

Представление о том, как распределился по высоте дерева и в верхнем слое почвы цезий-137 через 8 лет после аварии, даёт рис. 2 (по материалам [7]).

<sup>36</sup> За пределами промышленной площадки ЧАЭС, мест захоронения радиоактивных отходов и пруда-охладителя.

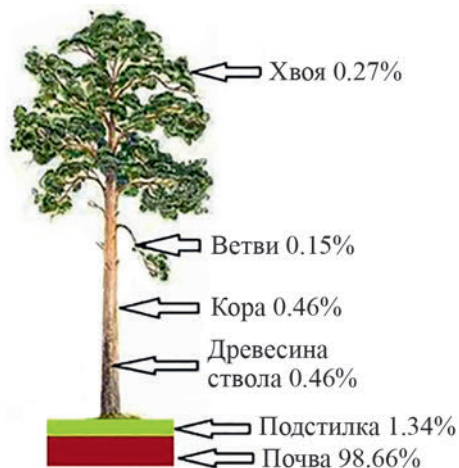


Рис. 2. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в частях сосны и в почве в 30.  
Пробы взяты в 10 и 20 км к югу от ЧАЭС

Что касается такого радионуклида, как плутоний, то, по сравнению с цезием-137, часть его, попавшая в древесную массу, ещё меньше, чем часть, оставшаяся в почве. Поэтому, когда горят лесная подстилка, трава и подлесок, продукты горения содержат существенно больше радиоактивных веществ, чем при горении крон деревьев (рис. 3).



Рис. 3. Низовой лесной пожар

Как уже говорилось, пожары могут охватить значительную территорию. Например, весной 2015 г. общая площадь возгорания составила более 10 000 га. Лесные низовые пожары наблюдались на ~ 2700 га, верховые на ~ 1100 га. В остальных случаях горела луговая трава (на площади ~ 6200 га) [8]. При этом накопленные в растительности и почве радиоактивные вещества ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , изотопы плутония и  $^{241}\text{Am}$ ) попадали в атмосферу в составе испарений и вместе с частицами пепла и золы.

## 2. Наш опыт

После аварии на ЧАЭС первые особенно крупные лесные пожары в 30 возникли в августе 1992 г. Они затронули тысячи гектаров лугов и лесных угодий, площадь более 5000 га охватил верховой пожар. Именно летом 1992 г. сотрудники российских институтов, работавшие в 1990-е годы на объекте «Укрытие», решили в инициативном порядке изучить возможные последствия пожаров для людей, находящихся в 30 [9]. Стимулом для такого решения стало то, что персонал, занятый на тушении пожара, не применял никаких мер для предохранения от радиоактивных аэрозолей. Это вызвало серьёзное беспокойство. На основе нашего опыта работы на объекте «Укрытие» и площадке ЧАЭС был сделан вывод о том, что при сгорании загрязнённых материалов заметная часть радионуклидов распространяется вместе с дымом. Этот вывод подкреплялся показаниями приборов, которыми были оснащены наши лаборатории и которые позволяли оперативно производить гамма-спектрометрические и радиохимические анализы, в том числе на плутоний. Район пожара, где изучалась радиационная обстановка (зона отчуждения, шоссе Припять-Полесское и шоссе Чистоголовка-Ильинцы), относится к местности с плотностью загрязнения по  $^{137}\text{Cs}$  (1500—4500) кБк/м<sup>2</sup> и по  $^{238,239,240}\text{Pu}$  — свыше 5 кБк/м<sup>2</sup>.

Измерения решено было вести в двух точках (рис. 4). В точке 1 предполагалось получить сведения о степени подъема (и, возможно, переноса) радиоактивности, а также о радионуклидном составе аэрозолей, которые могли вдыхать люди, участвовавшие в тушении пожара. Для этого воздухозабор следовало осуществить прямо в горящем лесу, что и было сделано в районе деревни Буряковка (см. рис. 4). В точке 2 предполагалось получить информацию о переносе радионуклидов в составе шлейфа дыма и тёплого воздуха, который гнал ветер (~ 2 м/с) со стороны очага пожара. Для этого было выбрано место с подветренной стороны в районе деревни Чистоголовка. Точка отбора проб находилась в 2 км от фронта пожара. Для проведения измерений была сформирована мобильная группа. В её распоряжении имелась аспирационная установка (рис. 5) производительностью ~ 75 м<sup>3</sup>/ч, работавшая от аккумулятора, и набор планшетов.



Рис. 4. Места отбора проб (точки 1 и 2) при пожаре 29 июля 1992 г. Указана средняя плотность поверхностного загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  и изотопами плутония

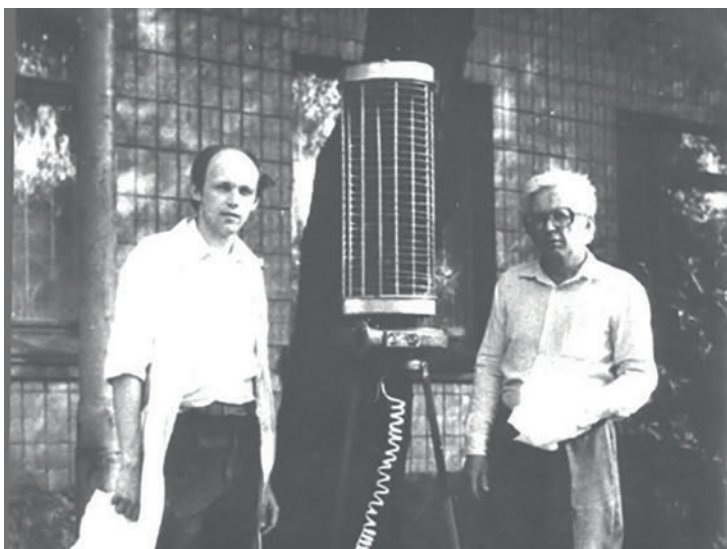


Рис. 5. Сотрудники Отделения ядерной и радиационной безопасности МНТЦ «Укрытие» возле мобильной аспирационной установки, с помощью которой проводились измерения при пожаре в 30

Отбор аэрозолей производился на фильтр ФГШ-15-1.5 площадью 0,51 м<sup>2</sup>. Фильтродержатель установки, расположенный вертикально, конструктивно представлял собою корзину-цилиндр из нержавеющей стали диаметром 27 см и высотой 60 см. Его нижний край при пробоотборе находился на расстоянии 1,32 м от поверхности земли, верхний — на расстоянии 1,92 м. Таким образом, центр фильтра соответствовал высоте расположения носа и рта человека среднего роста.

**Первый пробоотбор (точка 1)** был начат прямо на кромке пожара близ шоссе Припять — Полесское в 3 км восточнее деревни Буряковка. Удалось проводить его в течение 55 мин. Чуть дальше на высоте 2 м и 5 м от земли были помещены два вертикальных планшета размером 75x75 мм из марли, пропитанной смесью машинного масла с автолом. Их экспозиция продолжалась сутки.

К моменту начала пробоотбора горела лесная подстилка (мох, болотный сфагнум, сосновая хвоя) и нижняя часть стволов, образуя густой дым молочного цвета. На открывшемся песке лежал белесоватый пепел, который был также взят для анализа.

**Второй пробоотбор (точка 2)** был начат около 18 ч. того же дня близ шоссе Чистоголовка — Ильинцы в 2,5 км от фронта пожара, откуда ветер гнал шлейф дыма. Пробоотбор продолжался 72 мин. Планшеты укреплялись на прежней высоте. При этом на машину и членов группы падал не только пепел, но и кусочки коры, веточек и сосновой хвои. Эти выпадения были также собраны и проанализированы.

После окончания пробоотбора фильтр в точке 1 имел коричневый цвет с частицами внедрившегося пепла и пыли. Фильтр в точке 2 был тёмно-серым (оказавшиеся на нём кусочки коры были перед началом анализа удалены).

После отбора пробы были доставлены в лабораторию для проведения гамма-спектрометрических и радиохимических анализов. Результаты этих анализов представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Содержание радионуклидов в пробах, отобранных в точках 1 и 2**

Радионуклид	Аэрозоли, Бк/м <sup>3</sup>	
	Точка 1	Точка 2
<sup>144</sup> Ce	0,34	< 0,08
<sup>106</sup> Ru	0,37	< 0,1
<sup>137</sup> Cs	17	1,1
<sup>134</sup> Cs	1,22	0,06
<sup>238+239+240</sup> Pu	0,064	0,013
Выгорание, МВт×сутки/кг U	11,3	8,3

Из данных табл. 1 следует, что при действующих нормативах (допустимая среднегодовая объёмная активность  $^{137}\text{Cs}$  —  $1,7 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup>,  $^{238+239+240}\text{Pu}$  —  $3,2 \cdot 10^{-2}$  Бк/м<sup>3</sup>) [10] в точке 1 (на кромке пожара) наблюдалась неблагоприятная радиационная обстановка, так как концентрация  $^{238,239,240}\text{Pu}$  в 2 раза превышала ДК<sub>а</sub>. Концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в этой точке была менее критической и находилась на уровне ДК<sub>б</sub>. В точке 2 концентрации радионуклидов были намного ниже.

В табл. 2 приводятся данные, полученные с помощью планшетов.

**Таблица 2. Содержание радионуклидов на планшетах, отобранных в точках 1 и 2**

Радионуклид	Планшеты, Бк/ планшет, точка 1		Пепел, Бк/г, точка 1	Планшеты — активность, Бк/г, точка 2
	Высота, м			
	2	5		
$^{144}\text{Ce}$	33	57	54	-
$^{106}\text{Ru}$			48	-
$^{137}\text{Cs}$	420	680	1100	31
$^{134}\text{Cs}$	28	54	82	-
$^{154}\text{Eu}$			12	-
Выгорание, МВт×сутки/кг U	10,4	12,6	11,8	-

### 3. Некоторые выводы

Полученные результаты позволяют утверждать, что радиационная обстановка для людей, непосредственно борющихся с пожаром, **требует обязательного использования индивидуальных и коллективных защитных средств**, а ещё лучше — дистанционных средств тушения, поскольку в самой области горения концентрация активных аэрозолей может превышать допустимые значения. Кроме того, значительно увеличивается за счёт физической нагрузки количество воздуха, вдыхаемого при тушении пожара.

Данные по активности (прежде всего  $^{137}\text{Cs}$ ), собранные планшетами, позволяют сделать некоторые выводы относительно расположения радиоактивного пятна вследствие пожара. Если предположить, что на кромке пожара выпадения радиоактивных частиц на землю совпадают с выпадениями их на планшеты на высоте 2 м, то за сутки они составят  $\sim 8 \cdot 10^4$  Бк/м<sup>2</sup>. Это много

меньше, чем загрязнённость  $^{137}\text{Cs}$  внутри пятна. Сравнение активностей  $^{137}\text{Cs}$ , зарегистрированных на планшетах в точках 1 и 2, показывает, что в точке 2 она ещё в ~ 30 раз меньше, чем в точке 1. Таким образом, **заметного (порядка километра) продвижения загрязнения во время такого пожара не происходит, даже по направлению распространения дыма.**

Можно предположить, что продукты горения от верхового пожара при сильном ветре переносятся заметно дальше. Опасность этого компенсируется их меньшей радиоактивностью, поскольку кроны деревьев загрязнены существенно меньше, чем подстилка.

Отчёт с полученными результатами был передан в администрацию Зоны отчуждения (ЗО) и, насколько нам известно, послужил одним из аргументов для создания нового подразделения «Чернобыль лес», непосредственно занявшегося проблемами пожарной безопасности в ЗО.

Нужно отметить, что полученные результаты не носят всеобъемлющего характера, поскольку при лесном пожаре загрязнённость радиоактивными изотопами воздуха зависит от многих факторов. Среди них — степень заражённости местности, характер почвы и растительности, метеорологические условия, стадии пожара, интенсивность и площадь возгорания и т. п. Наблюдавшийся нами в 1992 г. пожар по своим параметрам следует отнести к низовому, устойчивому, среднему по опасности.

В последние годы (2015—2020 гг.) масштаб лесных пожаров в ЗО Чернобыльской АЭС возрос. Этому способствовало увеличение числа засушливых лет и, как результат, рост количества пожаров и повышение скорости их распространения. Борьба с пожарами осложняется особенностями лесов в рассматриваемой зоне: преобладанием сосновых пород, большим количеством легко воспламеняющегося сухостоя и валежника, полным отсутствием дорог, что не позволяет использовать технику, нехваткой удобных мест для забора воды.

Для предотвращения пожара в ЗО специалисты предлагают осуществить комплекс мероприятий, а именно: очистить лес от сухостоя и подлеска, проложить минерализованные полосы для отсечения горящего леса, а надпочвенный покров между ними периодически выжигать и др. Однако эти масштабные и дорогостоящие работы провести в ближайшее время маловероятно. Более реалистично пойти по пути раннего обнаружения места возгорания и использования современной техники борьбы с огнем. В этом отношении необходимые шаги уже делаются. Примером может служить использование дронов в 2020 г. ([11]).

Беспилотные летательные аппараты дают пожарным обзор местности с высоты птичьего полёта и помогают им определить, куда огонь движется даль-



ше, чтобы они могли быстро принимать решения о том, куда следует отправиться экипажам и кого следует эвакуировать.

## **Позиция ИБРАЭ РАН**

Позиция ИБРАЭ РАН подготовлена на основании поступившей от МАГАТЭ информации по результатам измерений радиоактивности на Украине весной 2020 года, связанных с пожарами в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС

В связи с пожарами в окрестностях Чернобыльской АЭС по указанию Государственной инспекции по ядерному регулированию Украины все действующие украинские АЭС, Центральная геофизическая обсерватория и Украинский гидрометеорологический институт осуществляли непрерывный отбор и контроль удельной активности атмосферных аэрозолей на существующих пунктах наблюдения.

Результаты измерения концентрации радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  на стационарных пунктах наблюдения демонстрировали, что его максимальное среднесуточное значение регистрировалось в районе Центральной геофизической лаборатории (г. Киев), где составило  $2,9 \times 10^{-4}$  Бк/м<sup>3</sup>. При длительном сохранении таких концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе они могут приводить к дополнительным дозам внутреннего облучения, вызванным поступлением радиоактивного аэрозоля в организм в процессе дыхания, не выше 0,01 мЗв/год, что не может представлять какого-либо вреда для здоровья людей и в 100000 раз ниже основного предела доз для населения от техногенных источников, составляющего 1 мЗв/год (табл. 3.1, НРБ-99/2009).

Результаты измерений за период с 1 по 9 апреля 2020 года мощности дозы гамма-излучения в воздухе на площадке Чернобыльской АЭС не продемонстрировали существенного изменения показаний в связи с пожарами.

По данным наблюдательного пункта Информационно-аналитической системы хранилища №2 отработавшего ядерного топлива на площадке Чернобыльской АЭС в период с 1 по 9 апреля 2020 года максимум объёмной альфа-активности аэрозолей колебался в интервале от  $10^{-3}$  Бк/м<sup>3</sup> до  $2,7 \times 10^{-2}$  Бк/м<sup>3</sup>, что значительно ниже уровней допустимой объёмной активности для персонала по основным альфа-излучающим радионуклидам, присутствующим в отработанном топливе (Приложение 1 НРБ-99/2009).

В период с 3 по 4 апреля 2020 года и с 7 по 8 апреля 2020 года максимальные значения удельной активности бета-аэрозолей на площадке Чернобыльской АЭС составляли 1,32 Бк/м<sup>3</sup> и 1,62 Бк/м<sup>3</sup> соответственно и были ниже допустимой среднегодовой объёмной активности в воздухе по радио-

изотопам  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  как для персонала, так и для населения (Приложения 1,2 НРБ-99/2009).

Измерения мощности дозы в воздухе в течение вышеуказанного периода на Чернобыльской АЭС колебались в интервале от 0,14 мкЗв/ч до 0,24 мкЗв/ч, что приближённо соответствует сложившемуся уровню естественного радиационного фона для данной местности после аварии 1986 года, не представляет угрозы для здоровья населения и не требует какого-либо вмешательства.

По результатам анализа имеющихся данных о текущих значениях параметров радиационной обстановки на территории Украины и, в частности, на стационарных постах наблюдений атомных электростанций и на территории площадки Чернобыльской АЭС, можно сделать вывод, что каких-либо изменений радиационной обстановки, связанных с пожарами и способных негативно повлиять на здоровье населения или персонала Чернобыльской АЭС, на данный момент не выявлено и принятия каких-либо дополнительных мер в этой связи не требуется.

## Литература

1. Экологи заявили о вторичном радиоактивном загрязнении из-за лесных пожаров в зоне ЧАЭС. — URL: <https://tass.ru/obschestvo/10583913>.
2. Онлайн-конференция Л.А. Большова, приуроченная к 34-й годовщине чернобыльской аварии. — URL: <http://ibrae.ac.ru/newstext/1127/>.
3. МАГАТЭ: пожар в Чернобыле не представляет опасности, связанной с радиацией. — URL: <https://news.un.org/ru/story/2020/04/1376732>.
4. *Боровой А.А., Велихов Е.П.* Опыт Чернобыля, часть 1. НИЦ «Курчатовский институт», М., 2012. — 168 с.
5. *Кашпаров В.А.* Радиологическая значимость топливной компоненты чернобыльских радиоактивных выпадений // Проблемы чернобыльской зоны відчуження. — Вип. 9. — С. 5 — 23.
6. Impact of wildfire on  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  wash-off in heavily contaminated forests in the Chernobyl exclusion zone / Y. Igarashi, Y. Onda, Y. Wakiyama et al. // *Environmental Pollution*. 259 (2020) 113754.
7. *Кучма Н.Д.* Рабочая тетрадь. ГСНПП «Экоцентр», Чернобыль.
8. Радиологические последствия пожара в чернобыльской зоне отчуждения в апреле 2015 года / В.А. Кашпаров, В.В. Миронюк, М.А. Журба и др. // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2017. — Т. 57. — № 5. — С. 512 — 527.
9. Некоторые данные о состоянии воздушной среды 30-км зоны отчуждения Чернобыльской АЭС в условиях значительного экологического

- возмущения (лесной пожар). Отчет о НИР (работа внеплановая). Утвердил Руководитель ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» А.А. Боровой. Чернобыль, 1992. — 12 с.
10. НРБ 99/2009.
11. Чернобыль: Массовый лесной пожар потушен с помощью беспилотных летательных аппаратов. — URL: <https://enterprise-insights.dji.com/user-stories/chernobyl-wildfire-extinguished-with-drones>.

# **Фукусима. Что известно об аварийном топливе**

*А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, В. А. Хвощинский*

## **1. Топливосодержащие материалы, образовавшиеся при аварии**

Среди вопросов, которые продолжают волновать ликвидаторов последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» (далее — F-1) один из важнейших — что произошло с разрушенным ядерным топливом в первых трёх реакторах. Где оно находится и в каком состоянии, не представляет ли всё ещё опасности? Но главное, для окончательного вывода станции из эксплуатации необходимо, чтобы это топливо было извлечено из разрушенных блоков и хранилось в полностью контролируемом состоянии. Ответа на этот вопрос пока нет.

В ходе аварии, протекавшей с потерей охлаждения, в корпусах реакторов 1-го, 2-го и 3-го блоков образовался кориум, имевший температуру до 2000°C. Он состоял из расплавленных материалов активной зоны и систем управления, продуктов их химических реакций с воздухом, водой и паром. До 90% массы кориума составляет обычно материал твэлов и их оболочек. Максимальную массу образовавшегося кориума можно приблизительно оценить. Так в активной зоне 1-го блока перед аварией находились следующие материалы:

- 78,3 тонны диоксида урана;
- 32,7 тонны циркония;
- 12,5 тонны стали;
- 590 кг карбида бора;
- 1 тонна инконеля (никель-хром жаропрочный сплав).

В сумме около 125 т. [1]. Во втором и третьем блоке этих материалов было по ~170 т в каждом. Итого ~ 465 т.

Для оценки полной массы ТСМ (топливосодержащих материалов), образованных кориумом, вытекшим из корпуса реактора, необходимо учесть и расплавленные части систем управления, находившихся внизу на корпусе реактора. А также вошедшие в состав образовавшейся лавы материалы пьедестала (рис. 1), на которые пролился раскалённый поток.

Таким образом, полная масса образовавшихся в результате аварии ТСМ для трёх блоков могла превышать 800 т, а общая активность самого топлива в момент аварии составляла ~  $3,2 \cdot 10^8$  Ки.

## **2. Результаты расчётов**

Первое представление о том, произошло ли разрушение корпуса реактора и где находится затвердевший расплав, было получено аналитическим путем. Затем расчёты последовательно уточнялись.

В октябре 2012 года японское Агентство по атомной энергии (NEA) приступило к осуществлению проекта «Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant» [2] — «Сравнительное исследование аварии на атомной электростанции Фукусима-1» (BSAF).

Проект объединял экспертов различных институтов из восьми стран, использовавших для проведения расчётов различные коды.

Перед ними была поставлена задача на основе единой базы исходных данных описать явления, произошедшие с ядерным топливом во время аварии на F-1. В ходе работы каждой из экспертных групп были сделаны оценки времени наступления основных стадий аварийных процессов. Таких, как начало обезвоживания активной зоны (а. з.), начало генерации водорода, начало плавления топлива, разрушение корпуса реактора и т. п. Если в отношении 1-го энергоблока расчёты всех групп, участвовавших в проекте BSAF, указывали на разрушение корпуса и выход расплава на бетонный пьедестал реактора, то для энергоблоков 2 и 3 результаты разделились. Одна часть экспертных групп пришла к выводу, что расплав остался в корпусе реакторов. Другая часть — что произошло разрушение корпуса, а расплав частично вышел в контеймент и, в конце концов, попал на бетонное основание. Различие результатов было связано с неопределённостью данных о количестве воды, поступавшей в корпус реактора для охлаждения топлива после аварии (рис. 1, 2).

Мы приведём здесь последовательности событий, происходивших на 2-м блоке в соответствии с расчётами ИБРАЭ РАН (см. таблицу 1 и рис. 2) [4]. Как показали последующие исследования, вывод Института о попадании расплава в контеймент оказался правильным.

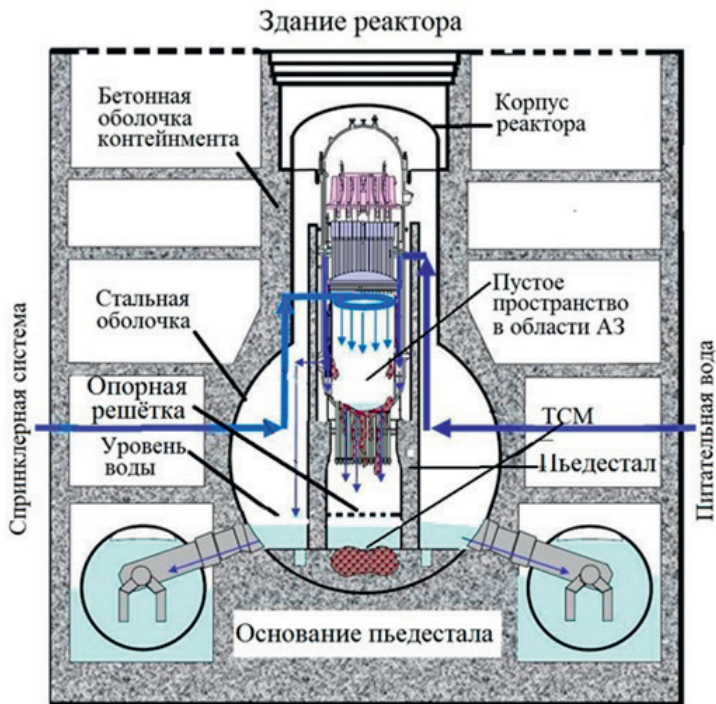


Рис. 1. Один из вариантов расположения корпуса в 1-м блоке F-1 [3].  
(Тип блоков 1, 2 и 3 — Mark 1)

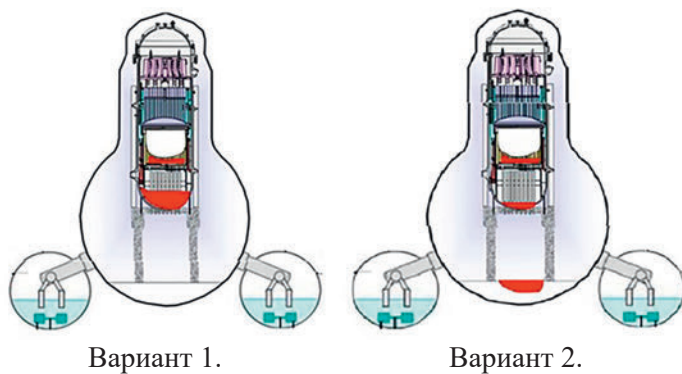


Рис. 2. Два варианта состояния топлива во 2-м или 3-м блоке после аварии, полученные при проведении расчётов (в зависимости от гипотез о поступлении питательной воды) [3]

**Таблица 1. Хронология событий на 2-м энергоблоке (расчёты ИБРАЭ РАН) [4].**

День	Время с момента землетрясения, час:мин	Начало события
14 марта	74:40	Вода опустилась до верха а. з.
	76:35	Разрушения оболочек твэлов
	80:07	Плавление топлива, образование кориума
15 марта	82:55	Расплав попал на днище корпуса
	92	Проплавление корпуса, выход кориума за его пределы

### 3. Результаты мюонной томографии

Вскоре после аварии на F-1 несколько лабораторий в США и Японии выступили с предложениями применить для определения положения ТСМ в разрушенных блоках метод мюонной томографии (МТ).

Сущность этого метода состоит в использовании потока космических  $\mu$ -мезонов (мюонов) для сканирования крупных объектов — зданий, промышленных сооружений и т. п. При этом оказывается возможным обнаружить в этих объектах неоднородности — скопления легких или тяжёлых материалов и построить их пространственное изображение (подробнее см. [5, 6]). Измерения на блоках F-1 проводились с 2015 г. по 2017 г. Интерпретация результатов МТ — достаточно сложное дело, и такие интерпретации имеют скорее качественный характер. Приведём здесь окончательные выводы.

**Блок 1.** «Значительное количество тепловыделяющих сборок отсутствует в положенном месте активной зоны внутри корпуса реактора. Естественная интерпретация этого факта такова — бóльшая часть ядерного топлива расплавилась и стекла в нижнюю часть корпуса реактора или ещё ниже» [7].

**Блок 2.** Если перед аварией собственно в активной зоне 2-го блока находилось ~ 170 т материалов, то их оставшееся количество составляет от 17 до 49 тонн [8].

**Блок 3.** «Активная зона практически пуста. Большая часть тепловыделяющих сборок расплавилась и переместилась на более низкий уровень» [9].

Что касается самой нижней части (дна) корпуса реактора, то достоверные данные о скоплении в ней топлива получить с помощью МТ оказалось невозможным из-за геометрии блоков.

Выполненные на основе расчётных данных и измерений с помощью мюонной томографии оценки количества топлива, оставшегося в корпусах реакторов F-1, приведены в таблице 2 (2016 г.) [10].

**Таблица 2. Оценки количества расплавленных топливных сборок на блоках 1—3 АЭС «Фукусима-1», по данным японских регуляторов**

Блок	Мощность (МВт)	Число топливных сборок	% расплавленных сборок (NEA)*	% расплавленных сборок (TEPCO)**
1	460	400	100	100
2	784	548	70	57
3	784	548	64	63

\* Японское агентство по атомной энергии

\*\* Tokyo Electric Power Company — компания, управляющая F-1



Рис.3. Схема нижних конструкций 2-го блока. Розовым цветом показано возможное положение застывшего расплава (отложений)

Кориум, пролавивший нижнюю часть корпуса, должен был попасть на конструкции, находящиеся внутри пьедестала реактора и, в конечном итоге, на его бетонное основание (рис. 3).

Здесь произошло высокотемпературное взаимодействие расплава с бетоном, в результате которого количество ТСМ значительно увеличилось.

Основание сконструировано так, что полная толщина бетона обеспечивает большой запас безопасности даже в случае полного расплавления матери-



алов активной зоны и выхода расплава из корпуса реактора. Мнение подавляющей части специалистов ТЕРСО — практически все ТСМ локализованы в бетонной подушке и не покинули пьедестал. Качественно ситуация проиллюстрирована на рис. 4.

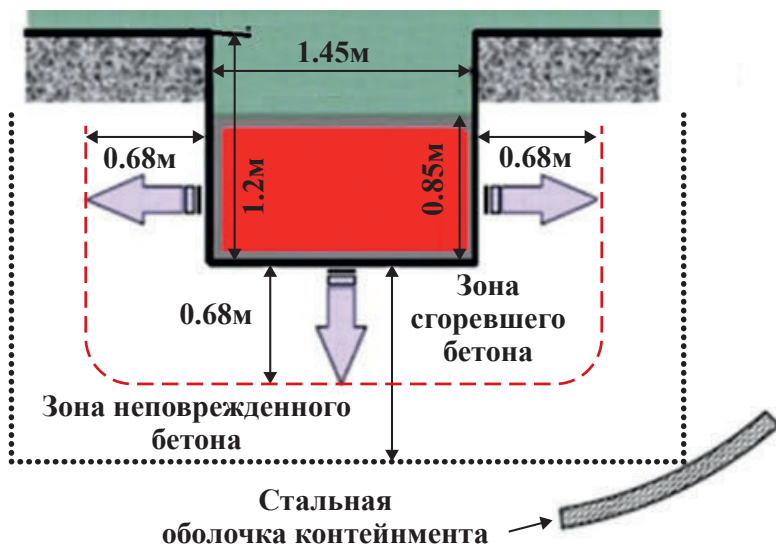


Рис. 4. Пример проникновения расплава в бетон основания пьедестала. Это вызывает значительную эрозию бетона, но стальная оболочка контеймента остаётся неповреждённой (ТЕРСО, 2014) [10]

Однако высказывались и другие точки зрения. Например, предполагалось, что часть расплава может попасть в тороидальную камеру снижения давления (тор) и даже далее (рис. 5).

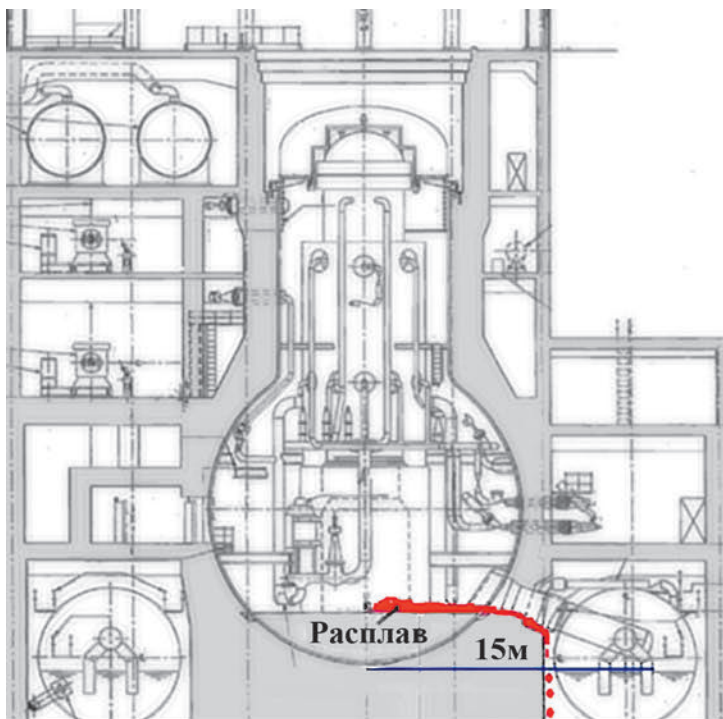


Рис. 5. Возможный путь протекания расплава в 1-м блоке F-1.

#### 4. Исследования с помощью роботов

Все предыдущие методы давали качественные оценки состояния топлива после аварии. В то же время было понятно, что этот вопрос требует детальной и количественной информации, которую могут дать только прямые измерения.

С этой проблемой столкнулись и советские специалисты в 1986 г. после аварии на Чернобыльской АЭС. Тогда такая информация была получена методом бурения скважин в аварийные помещения реактора и использования измерительных зондов, снабжённых соответствующими датчиками. Их установка в скважинах позволила создать постоянно работающую систему диагностики ТСМ. Полученные при бурении материалы кернов анализировались в специальной лаборатории.

Метод этот был предложен и разработан академиком С. Т. Беляевым и его сотрудниками (рис. 6) [11]. Благодаря его успешности через три года после

аварии была получена подробная информация о ~ 80% скоплениях ТСМ. Это позволило принять действенные меры по их контролю и обеспечению безопасности как самого объекта «Укрытие», закрывшего аварийный блок, так и продолжающих работать на той же площадке неповреждённых блоков.

Полная информация о местоположении и физико-химических свойствах многочисленных видов ТСМ (в том числе и «лав»), образовавшихся при взаимодействии кориума со строительными материалами, стала необходимой и при преобразовании объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему [12].

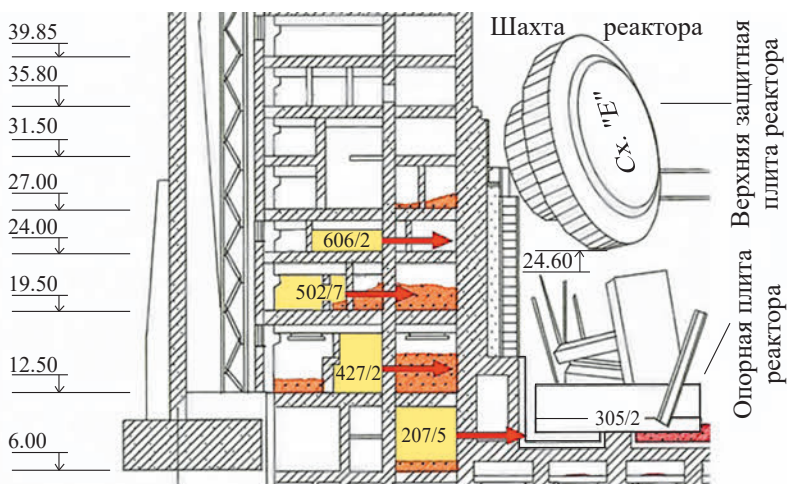


Рис. 6. Схема скважин, пробуренных в аварийном 4-м блоке ЧАЭС, и идущих с запада на восток. Жёлтым цветом выделены помещения, из которых проводилось бурение. Коричневым цветом отмечены скопления бетона, попавшего в помещения при строительстве «Укрытия». Обнаруженные в шахте реактора скопления ТСМ на схеме не показаны

Всего было пробурено 139 скважин. Вся работа была организована таким образом, чтобы не допустить переоблучения специалистов, принимавших в ней участие.

Япония пошла по другому пути — пути создания специальных роботов, которые могли бы осуществлять видеосъёмку, радиационную и тепловую разведку в разрушенных блоках. В том числе и внутри их контеймента. Следует сказать, что к моменту аварии на F-1 подобных устройств в стране не было.

Как с горечью писала газета Kyodo News: «Прославленная индустрия робототехники Японии была не готова ответить на вызовы Фукусимы»<sup>37</sup>.

От роботов требовалось использование электроники, способной длительное время работать в полях радиации, достигающих десятков Зв/час, высокая проходимость и маневренность в разрушенных помещениях и узких коридорах. Надо было заботиться о защите операторов, которые хоть и работали дистанционно, но также могли подвергнуться воздействию радиации.

Создание дистанционных механизмов, отвечающим этим условиям, потребовало значительных усилий. Поэтому почти год после аварии ТЕРСО, основываясь на расчётных оценках, могла лишь предполагать, что происходило внутри повреждённых реакторов.

## **ВТОРОЙ БЛОК**

Работы по поиску и исследованию аварийного топлива шли на всех пострадавших блоках, но наибольшее продвижение было достигнуто на втором. Это связано с рядом объективных причин. Здание блока не было разрушено взрывом, а это облегчает защиту внешней среды от радиоактивной пыли при проведении масштабных работ. Дозовая обстановка в помещениях на первом этаже реакторного корпуса оказалась лучше, чем на 1-м и 3-м блоках и т. п.

Именно на 2-м блоке в марте 2012 г. для начала был использован относительно простой и дешёвый способ получения данных о ситуации внутри контейнента — при помощи оптоволоконной камеры (видеоэндоскопа<sup>38</sup>). Использование обычного промышленного прибора оказалось не слишком успешным и ТЕРСО пришлось дожидаться изготовления специализированного прибора с 20-метровой трубкой. С его помощью за два дня, 26 и 27 марта 2012 г., была получена существенная информация.

Специалисты вошли на первый этаж реактора с северо-западной стороны и смогли пробурить отверстие в контейненте, чтобы вставить эндоскоп (рис. 7) [13, 14].

---

<sup>37</sup> Надо сказать, что в основе этого лежал человеческий фактор — глубокая уверенность японских специалистов в том, что на их атомных объектах большая авария произойти не может, поскольку их конструкция и квалификация персонала практически исключают такую возможность.

<sup>38</sup> Видеоэндоскоп — это устройство, которое используют для осмотра и визуального контроля труднодоступных мест и полостей. Он представляет из себя длинную гибкую трубку с объективом, осветителем и необходимыми датчиками на одном конце и пультом управления с экраном на другом.

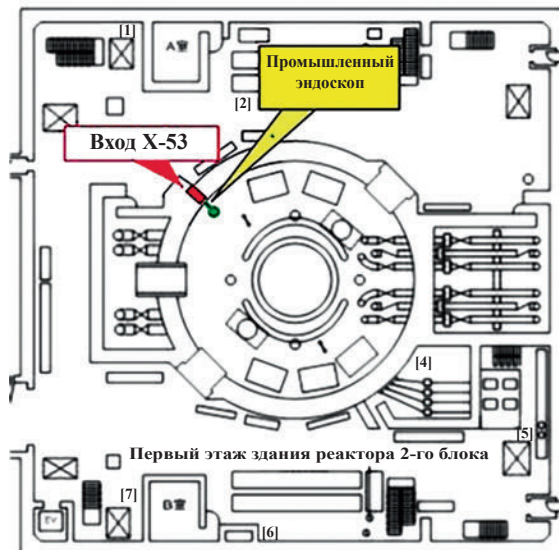


Рис. 7. Место расположения ввода эндоскопа во 2-м блоке (на первом этаже здания реактора). Оно находилось на высоте ~ 7 м от дна пьедестала

На конце прибора сначала были закреплены опускаемый температурный датчик и видеокамера, способная поворачиваться на 360 градусов. 27 марта удалось ввести внутрь контеймента и дозиметр.

Во-первых, видеозапись показала, что уровень воды в этом месте существенно ниже ожидаемого<sup>39</sup>, всего 60 см от дна. Во-вторых, удалось измерить мощности дозы на пути движения эндоскопа (рис. 8).

<sup>39</sup> Вода продолжала поступать в блоки для охлаждения топлива.

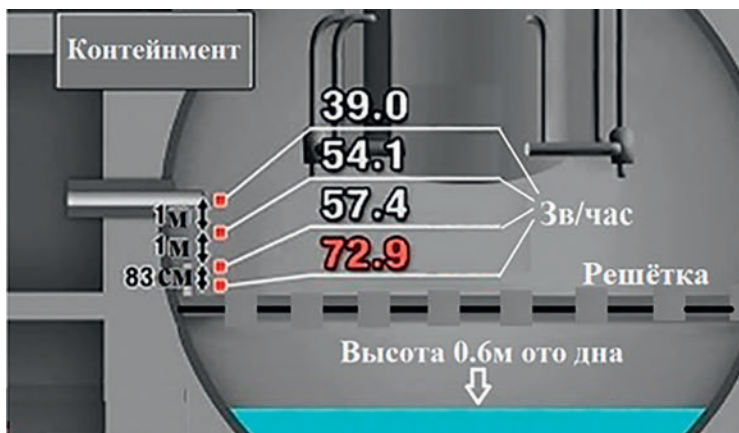


Рис. 8. Величины мощности дозы (Зв/час) в контейнере 2-го блока

**Большая величина МЭД (десятки Зв) послужила доказательством разрушения корпуса реактора и проникновения кориума в контейнер.**

Кроме того, поскольку во время образования расплава температура активной зоны увеличивается от центра к её периферии, то и плавление топлива происходит по той же схеме. На основании этого можно предполагать, что оставшееся в реакторе топливо сосредоточено по его периметру.

Подробно эти вопросы разбираются в работе [15].

\* \* \*

Следующие исследования внутри контейнера 2-го блока планировалось провести с помощью специально разработанного робота, названного «СКОРПИОН» [16].

Конструирование и изготовление робота заняло у его создателей, корпорации Toshiba и IRID<sup>40</sup>, около 3 лет.

В контейнер «Скорпион» мог попасть через люк, ведущий в тоннель X-6<sup>41</sup> (рис. 3, 9). А затем, используя рельсы для транспортировки кассет СУЗ, спуститься на платформу (опорную решетку), где провести измерения МЭД и фотографирование.

<sup>40</sup> По мере развёртывания работ по выводу F-1 из эксплуатации в Японии совершенствовалась и система их научно-технического сопровождения. Одним из важных шагов в этом направлении стало создание в 2013 г. новой организации — Международного исследовательского института по выводу из эксплуатации ядерных объектов (IRID).

<sup>41</sup> Тоннель X-6 состоит из трубы диаметром около 60 сантиметров. В обычном режиме он закрыт толстым стальным клапаном. В ходе работ было принято решение не открывать люк тоннеля для входа робота, а пробурить в нем отверстие.

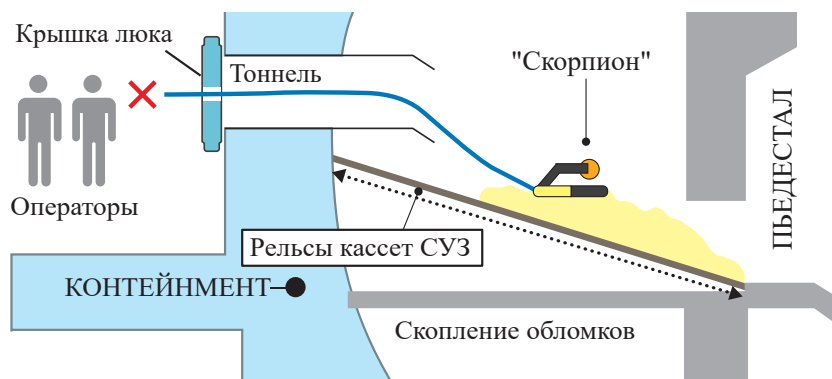


Рис. 9. Схема проникновения «Скорпиона» внутрь пьедестала

Несколько раз назначались и отменялись сроки начала работы. Наконец, 16 февраля 2017 г. «Скорпион» вошёл в тоннель X-6. Робот продвинулся по рельсу на небольшое расстояние и остановился — не смог преодолеть оказавшееся на его пути скопление осколков («кучу мусора», см. рис. 9). Специалисты, управлявшие роботом, сначала пытались разрушить препятствие, затем хотя бы достать аппарат, а в итоге отказались и от этого и решили оставить «Скорпион» внутри контейнента, перерезав идущий к нему кабель<sup>42</sup>.

Эта неудача в какой-то мере была компенсирована тем, что ещё в конце января 2017 г., с целью проведения предварительной разведки, в отверстие, проделанное в крышке тоннель X-6 для «Скорпиона», ввели зонд — телескопическую трубу с телекамерой на конце [17].

С её помощью снова удалось получить важную информацию — изображение части платформы, которая находится непосредственно под реактором. Съёмка показала, что металл опорной решётки оплавлен и деформировался, а его поверхность покрывают чёрно-коричневые отложения. В одном месте решётки близко к центру пьедестала образовался провал (прожог) площадью ~ 1 м<sup>2</sup> (рис. 10).

<sup>42</sup> Согласно оценкам, к этому моменту затраты на реализацию проекта «Скорпион» превысили 10 миллионов долларов.



Рис. 10. Провал от упавшей части опорной решётки, обнаруженный 30.01.17

Эксперты предположили, что отложения могут быть **слоем застывшего кориума, часть которого через образовавшийся прожог в нижней части корпуса реактора вытекла наружу.**

Пройдя через решётку и расплавив её, кориум попал на основание пьедестала. Прожог в решётке служил дополнительным указанием на высокую температуру струи расплава.

Насколько велико было количество вытекшего кориума и какой характер имеет повреждение корпуса реактора, выяснить не удалось.

\* \* \*

Следующий шаг в исследовании местоположения топлива был сделан на 2-м блоке в январе 2018 г. с помощью усовершенствованного робота-зонда, созданного специалистами «Toshiba» и IRID [18].

Аппарат состоял из направляющей трубы длиной ~ 13 м и диаметром ~ 11 см, к которой присоединена поворачивающаяся телескопическая труба длиной ~ 5 м. На конце последней находился модуль весом 2 кг. Конструкция позволяла перемещать этот модуль по горизонтали и опускать вниз. На его передней части крепилась ТВ панорамная камера со специальным, не запотевающим, объективом. Она могла поворачиваться на 120° по вертикали и 360° по горизонтали.



Кроме камеры в модуле находились: светодиодный осветитель, дозиметр и термометр (рис. 10).

В литературе этому роботу приписывались разные названия: «Змея», «Удочка», «Телескопическое устройство» и т. п. Для определённости, будем называть его: «Большая змея» (БЗ).

19 января 2018 г. через направляющую трубу по тоннель Х6 аппарат ввели в контеймент 2-го блока (рис. 11).

На основании полученной с помощью БЗ информации в отчёте ТЕРСО делаются следующие выводы.

### 1. Больших повреждений основных конструкций не обнаружено.

### 2. Внутри контеймента постоянно капает вода.

Очевидно, что она проникает из корпуса реактора. Позже (в 2020 г.) после детального рассмотрения материалов ТЕРСО было высказано мнение о том, «что образовавшиеся при прожоге отверстия в корпусе реактора сосредоточены вокруг его оси и не очень велики». Действительно, на видеозаписи видно, что вода лишь капает через них на поверхность постамента. Но это предположение достаточно спорное, поскольку прожжённые в корпусе отверстия могли постепенно закрываться твердеющими массами кориума и их размеры уменьшились.

**3. Все внутренние поверхности покрыты слоем красновато-коричневого вещества, напоминающего песчаные или глинистые отложения. Скопления этого вещества в виде гальки покрывают всю нижнюю часть пьедестала (рис. 12).**

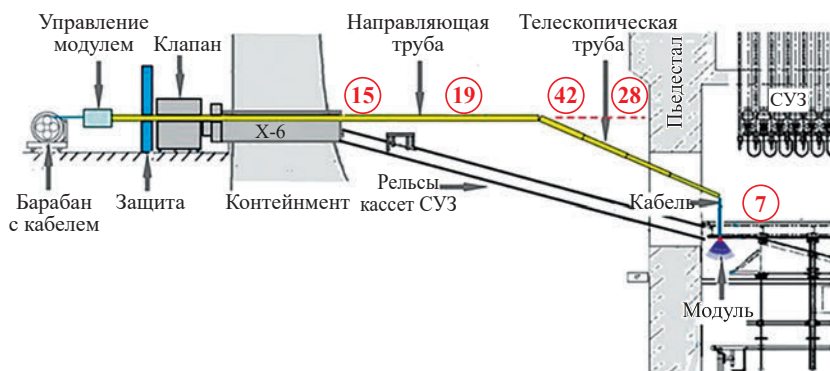


Рис. 11. Общая схема проникновения робота БЗ в контеймент 2-го блока через тоннель Х-6. В красных кружках — измеренные МЭД (Зв/час)



Рис. 12. Отложения на основании пьедестала

**4. В ряде мест среди этого вещества наблюдаются упавшие компоненты топливных сборок (рис. 13).**

Особенно выделяется сохранившаяся ручка контейнера топливных стержней Учитывая, что высота топливной сборки составляет около 4 м, а ручка установлена на её верхнем конце, сборка должна была расплавиться, а расплав вытечь за пределы корпуса реактора.



Рис. 13. Ручка контейнера топливных стержней среди отложений на пьедестале

**5. Повреждений бетонной стены в постаменте, расплавления кабельного лотка и стальной опоры погрузочно-разгрузочной машины и ряда других конструкций не наблюдалось (рис. 14).**



Рис. 14. Опора погрузочно-разгрузочной машины среди отложений на основании пьедестала

**6. Величины МЭД, так же, как и температуры, измеренные над основанием пьедестала, почти не зависят от высоты над ним и составляют, 7—8 Зв/час и 21 °С соответственно<sup>43</sup>.**

Сразу обращает на себя внимание, что величины 7—8 Зв/час противоречат тому предположению, что на поверхности основания пьедестала, в составе песчаных или глинистых отложений, содержится значительное количество ядерного топлива. В этом случае величины МЭД были бы значительно большими. Эти значения не коррелируют и с измерениями, сделанным БЗ при приближении к пьедесталу на его внешней стороне (красные цифры на рис. 11). Там значения МЭД составляют 30—40 Зв/час. Они не коррелируют и со значениями, полученными при первом проникновении в пьедестал, и составлявшими десятки Зв/час (см. рис. 8).

О небольшом количестве топлива в верхних отложениях свидетельствует и сохранность ряда конструкций, указанных выше в пункте 5. Означает ли это, что при прожоге корпуса реактора в пьедестал проникло только небольшое количество кориума?

---

<sup>43</sup> Мощность дозы и температура были измерены при опускании измерительного модуля от конца телескопической трубы к основанию пьедестала.

Специалисты ТЕРСО опубликовали стратегический план работ [19], в котором этому предположению отдаётся преимущество. Относительно малые значения МЭД над основанием пьедестала они объясняют большим содержанием металлических примесей в ТСМ и, следовательно, пониженной активностью.

\* \* \*

Вместе с тем существует и другая точка зрения, изложенная в работах [20, 21] и ряде других. Во-первых, в них выражается несогласие с интерпретацией результатов мюонного сканирования. Авторы считают, что эти исследования скорее подтверждают отсутствие значительного количества топлива в корпусе реактора<sup>44</sup>. Во-вторых, они пишут, что если считать измерения МЭД внутри пьедестала представительными, то можно объяснить их процессами расслоения, происходившими в кориуме.

Суть этих процессов следующая. По мере того, как при аварии топливо и окружающие металлические структуры активной зоны разрушаются и плавятся, они образуют бассейн расплава в нижней части корпуса реактора. При этом более тяжёлые материалы, такие как соединения урана, опускаются на дно этого бассейна. Более лёгкие, содержащие металл от расплавленных конструкций, поднимаются наверх.

Поэтому после прожигания корпуса реактора первыми по основанию пьедестала растеклись порции кориума, обогащённые ураном и продуктами деления.

Попав на него, они сожгли и расплавили бетон и внедрились вглубь. Содержащие металл и другие, более лёгкие и менее активные материалы, порции расплава оказались сверху и экранируют идущее снизу излучение.

В этом случае основание пьедестала должно быть прожжено на значительную глубину, что противоречит предположениям, высказанным ТЕРСО.

Обширный прожог в решётке также служит косвенным свидетельством значительного количества протёкшего расплава.

Авторы указанных работ выражают озабоченность в том, что мог реализоваться самый худший сценарий. Кориум прожёт бетонное основание пьедестала, затем слой почвы под реактором, попал в грунтовые воды и загрязнил их. Они пишут: «...с каждым годом появляется все больше информации, подтверждающей, что эта гипотеза может оказаться реальностью». Данная гипотеза являет собой пример наиболее пессимистической оценки возможного развития событий аварии.

\* \* \*

Следующее исследование, проведенное в начале 2019 г. ([22]) было достаточно сложным, но заведомо малоинформативным. Поскольку важной

<sup>44</sup> Следует отметить, что интерпретация полученных в экспериментах с мюонным сканированием данных сильно зависит от метода их обработки.

задачи — извлечения образцов отложений со дна пьедестала для изучения их состава — перед ним не ставилось.

Оно проводилось с помощью телескопической трубы, которая могла удлиняться до 15 м, и опускаемого модуля, оснащённого захватом. С их помощью можно было поднять образцы материалов размерами до 8 см и весом до 2 кг. В ходе работы удалось коснуться отложений на основании пьедестала в 5 местах и переместить кусочки материала, похожего на гальку. В шестом месте зонд не смог передвинуть обломок, напоминающий глину. Вероятно, потому, что он прилип к нижнему слою отложений. Уровень МЭД, измеренный на расстоянии около 30 см от дна, составил 7,6 Зв/час.

На рис. 15 можно видеть способ проникновения зонда внутрь пьедестала и область его основания, в которой проводились исследования.

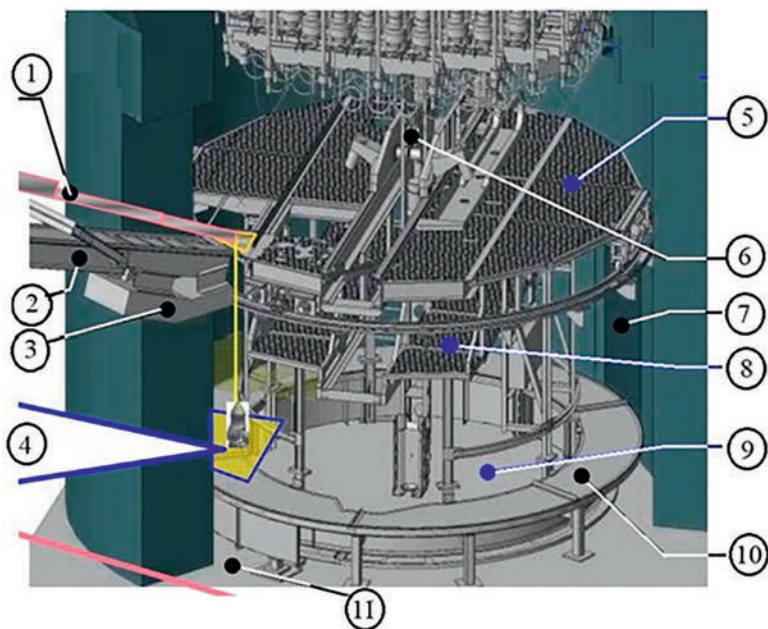


Рис. 15. Начало 2019 г. Исследования отложений на основании пьедестала во 2-м блоке. 1 — телескопическая труба, 2 — рельсы кассет СУЗ, 3 — верх платформы, 4 — площадь исследований, 5 — платформа, 6 — механизмы СУЗ, 7 — проход для персонала, 8 — платформа среднего уровня, 9 — основание пьедестала, 10 — кабельный канал, 11 — основание пьедестала

\* \* \*

Дальнейшие ближайшие планы по изучению ТСМ 2-го блока, в основном, сводятся к двум направлениям.

**Во-первых**, получить представительные образцы топливосодержащих материалов и провести их исследование.

Для выполнения первого пункта разрабатывается роботизированная «рука» с дистанционным управлением. В её создании Mitsubishi Heavy Industries, Ltd сотрудничает с английской фирмой «Veolia Nuclear Solutions (UK) Ltd».<sup>45</sup> ([23—25]). Проникновение «руки» в пьедестал 2 блока планируется осуществить через тот же тоннель X-6 (рис. 16).

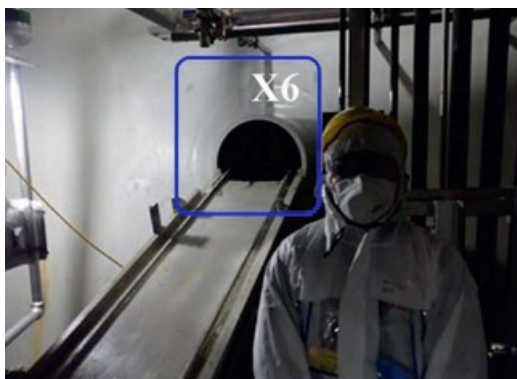


Рис. 16. Тоннель X-6

Относительно небольшой диаметр туннеля — 600 мм — и большое количество оборудования, находящегося внутри защитной оболочки, накладывают достаточно жёсткие ограничения на размеры робота. В результате решено было создать конструкцию с изменяющейся длиной («руку»), на конце которой находится рабочий инструмент (рис. 17, 18).

«Рука», пройдя тоннель X6, вытягивается так, чтобы достигать основания корпуса реактора или основания пьедестала. Изготовлена она из высокопрочной нержавеющей стали, что предотвращает заметную деформацию при вытягивании на полную длину (полный вес устройства — почти 5 т).

На конце «руки» находится металлическая щётка, способная сметать с поверхности частицы и обломки и «вакуумный отсос» засасывающий их. Препятствия внутри защитной оболочки будут устраняться специальным режущим оборудованием.

<sup>45</sup> «Рука» разрабатывается в рамках британо-японского четырёхлетнего проекта Long Ops (стоимость его \$16 миллионов).



Рис. 17. Робот «Рука» в лаборатории

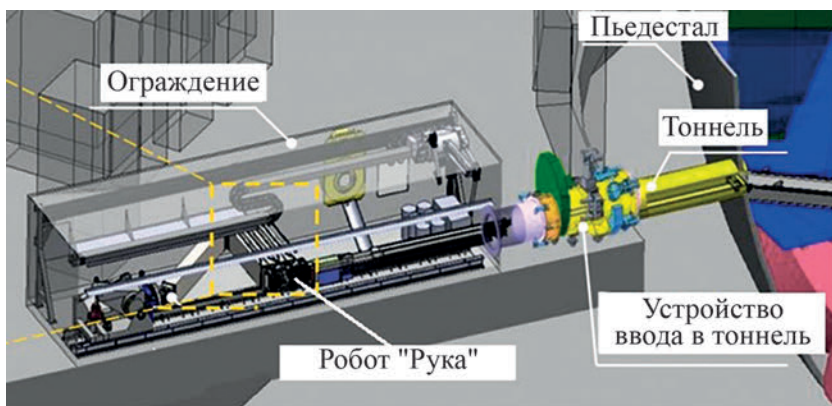


Рис. 18. Схема ввода робота в контеймент

Будут приняты специальные меры для исключения выхода радиоактивной пыли. При работе «рука» будет проходить через воздушный шлюз, установленный на входе тоннеля X-6.

Сначала планировалось, что «рука» начнёт работать на F-1 в конце 2021 г. Однако в марте ответственный за ликвидационные и демонтажные работы на АЭС Акира Оно заявил журналистам, что из-за ситуации с коронавирусом

в Великобритании её создание замедлилось и, скорее всего, робот приступит к работе в конце 2022 г.

В августе 2022 г. ТЕРСО заявила, что использование «руки» снова откладывается и начнётся во второй половине 2023 финансового года (вплоть до марта 2024 г.), чтобы обеспечить безопасное и надёжное проведение работ.

Пока же робот проходит эксплуатационные испытания в Нарахе (рис. 19) городе, относящемся к префектуре Фукусима, о чём периодически упоминается в печати.



Рис. 19. «Роботизированная рука» в испытательном центре в Нарахе

Как мы видим, более чем десятилетние попытки ТЕРСО получить данные о нахождении и состоянии ТСМ внутри контейнента 2-го блока с помощью очень сложных аппаратов не принесли заметного успеха. Свою роль здесь сыграли многие факторы. Трудности, связанные и с большими радиационными полями, и с дистанционным управлением движением роботов среди аварийных конструкций, и многое, многое другое. Наконец, свойства самих исследуемых отложений, потребовавшие значительных усилий для отбора образцов. Так что, в конце концов, специалисты пришли к выводу о необходимости применения более «грубой силы».

\* \* \*



**Второе направление** ближайших исследований — создание искусственных образцов ТСМ.

Для того, чтобы лучше понять состав образовавшихся при аварии топливосодержащих материалов и провести отбор методов для их извлечения, с 2016 г. в лаборатории JAЕА начали проводиться эксперименты, моделирующие взаимодействие расплавленного топлива с бетоном (программа МССI).

Образцы топлива из оксида урана нагревались вместе с конструкционными материалами реактора и бетоном. После образования различных по составу топливных композиций изучались их свойства, в частности, критические параметры ([26]).

В лаборатории СЕА во Франции в период 2016—2017 гг. были смоделированы образцы ТСМ различного состава. Это позволило изучить их свойства и испытать на практике возможности лазерной резки образцов [27].

Согласно существующим оценкам, извлечение топлива из аварийных блоков продлится ~ 40 лет. За это время могут произойти существенные изменения в состоянии ТСМ. Например, их диспергирование под действием внешних условий или внутреннего облучения. Это скажется на условиях извлечения и дальнейшего хранения образцов.

В конце января 2018 г. консорциум предприятий Росатома по итогам тендера был выбран исполнителем работ в рамках субсидируемого японским правительством проекта по изучению свойств образцов искусственного кориума.

«Предполагается изготовить модельные образцы, имитирующие реальные фрагменты кориума, провести их испытания по программе «ускоренного старения», определить динамику изменения свойств образцов в зависимости от времени их старения, внутреннего ионизирующего облучения, влияния химических реакций на их поверхности».

Далее предстоит подтвердить достоверность полученных экспериментальных данных по их соответствию экспериментальным данным, полученным в своё время в Чернобыле, и выяснить, в какой степени тот или иной фактор (ионизирующее излучение и химические реакции) влияет на процесс деградации образцов из F-1. Затем надо разработать прогнозную модель изменения со временем (с шагом примерно в 10 лет) основных свойств этих образцов и рекомендации по её применению для оценки параметров ТСМ при их извлечении и хранении в специальных контейнерах» ([28, 29]).

Работа была выполнена в 2021 г. Учёные изготовили образцы топливных обломков и исследовали их свойства в процессе старения в трех средах. Созданная в результате математическая модель позволяет прогнозировать

поведение материалов при извлечении, транспортировке и хранении с дискретным шагом в 10, 20, 30 и 50 лет.

\* \* \*

Надо отметить, что это не полностью надёжный путь. При создании искусственного кориума и продуктов его взаимодействия (ТСМ) трудно воспроизвести реальные условия. Ведь в образовании ТСМ участвовали не только многочисленные материалы активной зоны, но и материалы конструкций, с которыми взаимодействовал кориум, в том числе и находящиеся вне корпуса реактора, и соли морской воды, с помощью которой велось охлаждение активной зоны после аварии, и бетон пьедестала, и многое другое.

На основании опыта, полученного в Чернобыле, известно, что образцы ТСМ, взятые в различных помещениях, достаточно сильно отличаются из-за различных условий их образования и «хранения».

В качестве иллюстрации на рис. 20 представлены четыре основных модификации ТСМ, образовавшихся при аварии на ЧАЭС. Кроме этих модификаций существует ещё достаточно много промежуточных вариантов, например, «цветная керамика». Они встречаются реже, чем перечисленные на рисунке, но всё равно их масса измеряется сотнями килограмм. Особое место по своему составу и свойствам занимает «топливная пыль».

При этом разработка прогнозной модели изменения физико-химических свойств реальных чернобыльских ТСМ уже заняла более двух десятков лет, и до конца ещё не доведена.

Все указанные выше причины могут привести к тому, что образцы, полученные в лабораториях, не дадут полной информации о трудностях, возникающих на пути извлечения и безопасного хранения топливосодержащих материалов из реакторов F-1.

И при разработке конкретных планов этих мероприятий обязательно потребуются исследования реальных образцов ТСМ.

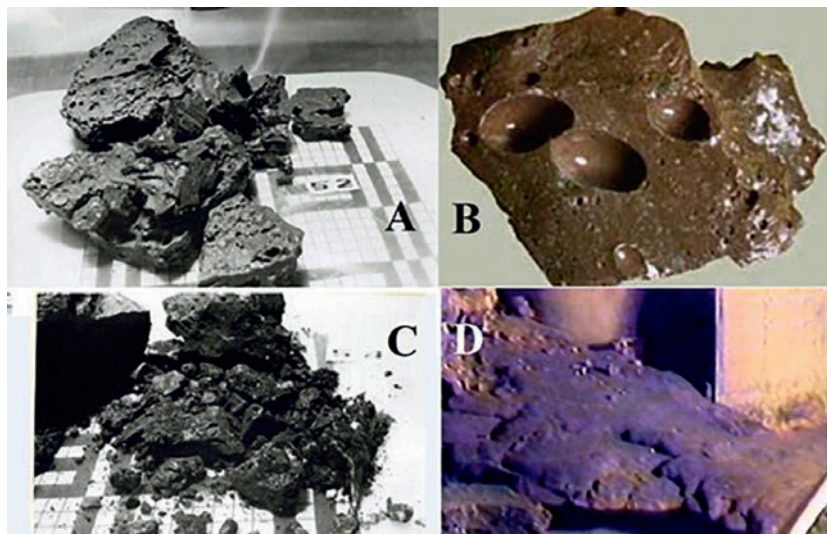


Рис. 20. Некоторые модификации чернобыльских лав (лавообразных ТСМ).  
А — «чёрная керамика», В — «коричневая керамика», С — «пемза», D — «металл»

\* \* \*

Дальнейшие шаги по извлечению ТСМ из контейнента 2-го блока рассматриваются в ряде отчётов ТЕРСО ([30, 31]).

После отбора проб с помощью «руки» и начала их детального исследования планируется постепенное укрупнение и модернизация всей системы. Это касается расширения входа в тоннель X-6, увеличения грузоподъёмности робота, оптимизации его конструкции, принятия дополнительных мер по безопасности проведения работ.

В настоящее время (на 2023 г.) считается, что процесс извлечения ТСМ из блока может выполняться усовершенствованной «рукой».

## ПЕРВЫЙ БЛОК

Должно было пройти 4 года после аварии, прежде чем весной 2015 г. на F-1 попытались использовать робота, который проник на решётку внутри контейнента 1-го блока ([32, 33]).

Аппарат разрабатывался IRID совместно с Hitachi и его дочерней компанией Hitachi—GE Nuclear Energy. Он предназначался для проведения

визуальной, тепловой и дозиметрической разведки в больших радиационных полях<sup>46</sup>.

Робот мог трансформироваться, поскольку состоял из трёх частей: основного корпуса и двух боковых блоков, передвигающихся на гусеницах. Размеры аппарата — длина около 60 см и эффективный диаметр 9.5 см — позволяли ему проходить через трубы. За внешний вид и способность изменять свою форму робот получил название «Змея» (рис. 21).

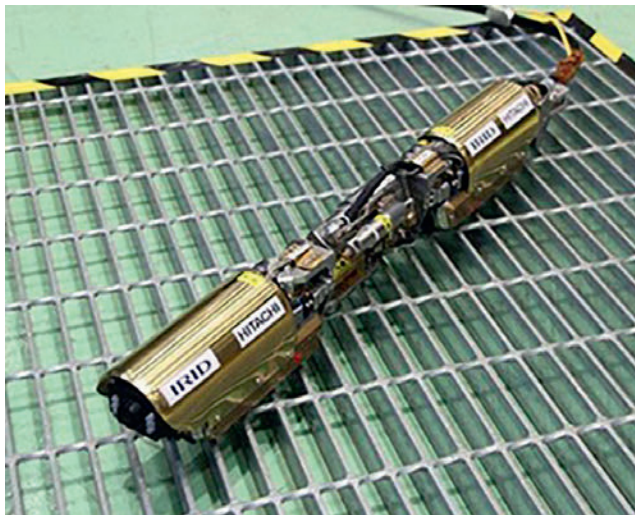


Рис. 21. Робот «Змея» в развёрнутом виде

Управление «Змейей» осуществлялось дистанционным образом по кабелю длиной 40 м. Через вход (трубу) X-100В (рис. 22, 23) робот должен был проникнуть в контеймент. Затем предполагалось, что, используя кабель, его можно будет опустить на решётку постамента, находящуюся выше уровня воды. На ней аппарат трансформируется, принимая форму буквы «П» (с телекамерой в середине и гусеницами по бокам), и начинает двигаться и изучать обстановку.

<sup>46</sup> Робот оснащен термометром, видеокамерой, дозиметром и лазерным сканером для измерения расстояния.

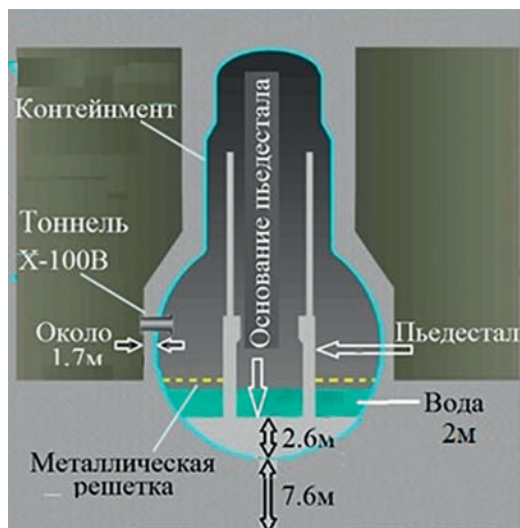


Рис. 22. Схема первого блока F-1

Направляющая часть сифона

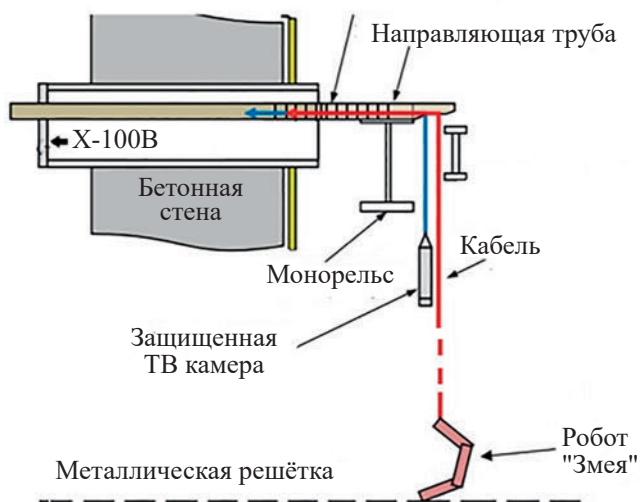


Рис. 23. Схема входа робота «Змея» в контеймент через тоннель X-100В и опускание его на решетку пьедестала

Для F-1 были изготовлены два одинаковых робота.

Кроме получения видеoinформации, данных о температуре и величине МЭД, «Змее» было необходимо определить, в каком месте можно проникнуть на дно конфейнмента. Предполагалось использовать эти данные, чтобы с помощью специального зонда или робота-амфибии обнаружить там ТСМ под слоем воды.

10 апреля 2015 г. **первый робот** был опущен через тоннель на решётку. Здесь он принял П-образную форму и начал проводить разведку. Через 5 часов аппарат столкнулся с завалом и был вынужден двигаться в обход него. Спустя ещё короткое время робот перестал отвечать на посылаемые команды.

В ТЕРСО предполагали, что он застрял в решётке и уже не может выбраться самостоятельно. Позднее представитель ТЕРСО сообщил, что компания не собирается вытаскивать застрявшего робота. Благодаря полученным в этом сеансе данным удалось установить, что температура в контейменте ~ 20°C, а мощность дозы достигает 9,7 Зв/ч.

На переданных роботом кадрах видны стены и пол помещения, пар от воды, поступающей для охлаждения реактора.

Еще одним значимым результатом стало обнаружение люка, с помощью которого в дальнейшем надеялись проникнуть на основание пьедестала и обследовать его на предмет обнаружения там кориума.

**Второй робот** через несколько дней провёл обследование оставшейся части решётки пьедестала. Здесь температура также составляла ~ 20°C, а значения МЭД менялись от 4,7 до 8,3 Зв/час.

В результате, по заявлению представителя ТЕРСО, роботы собрали важные данные о температуре и радиации на платформе, а также передали изображение её частей.

Но дополнительной информации о кориуме, который мог выйти за пределы корпуса реактора, они не принесли.

\* \* \*

В марте 2017 г. после модернизации «Змея», получившая новое название «PMORPH», вновь приступила к работе на 1-м блоке F-1 [34]. Главным усовершенствованием аппарата стал зонд, который мог опускаться на кабеле через решётку платформы, по которой передвигался аппарат, погружаться в воду, попавшую в нижнюю часть контейнмента (её уровень составлял ~ 2 м над бетонным основанием) и проводить там видеосъемку и измерение МЭД (рис. 24). Размеры зонда: диаметр — 20 мм, длина — 40 мм. Максимальная глубина погружения — 3,5 м.

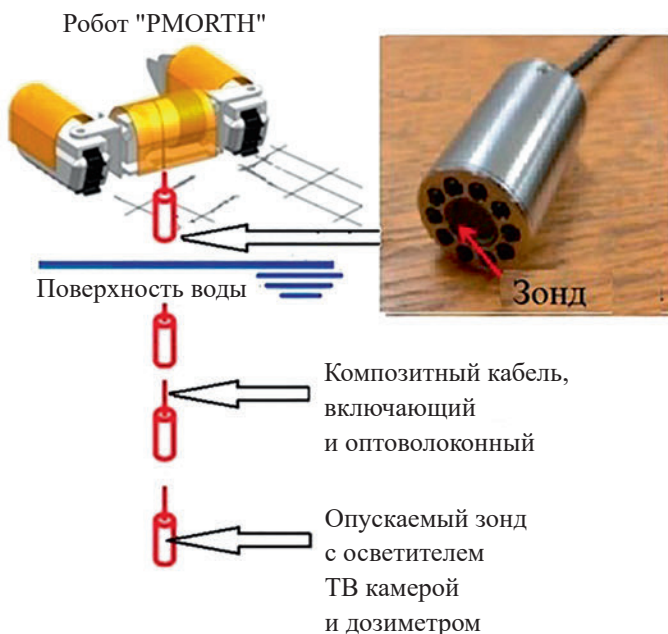


Рис. 24. Робот «PMORPH» и принцип его работы в контейменте

Через вход X-100B робот должен был проникнуть внутрь контеймента, опуститься на решётку, трансформироваться и, двигаясь по ней, подойти к заранее намеченным точкам. В этих точках предполагали с помощью кабеля провести спуск зонда (через люк в решётке).

Это позволило бы получить видеoinформацию и данные о величине МЭД на разных высотах от основания пьедестала, в том числе и под водой. Специалисты надеялись, что с помощью «PMORPH» удастся обнаружить на основании пьедестала застывшие ТСМ.

Измерения проходили в течение 5 дней и завершились 22 марта.

Результаты замеров МЭД в одной из точек представлены на рис. 25.

В отчётах ТЕРСО по всему пятидневному циклу измерений отмечается следующее: «...заметных повреждений у обследованных конструкций контеймента не наблюдалось; на трубопроводах, на металлической решётке и конструкциях виден слой отложений, но состав этих отложений ещё предстоит установить».

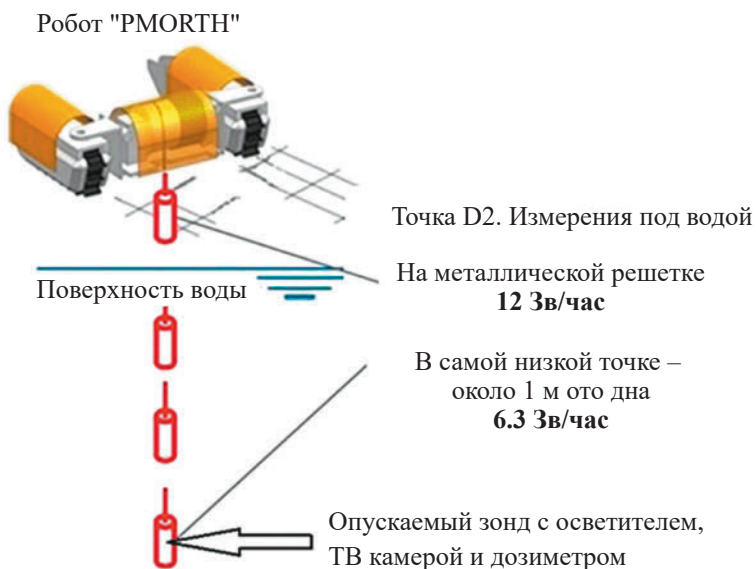


Рис. 25. Результаты первых измерений МЭД на металлической решётке и в воде (при наибольшем погружении).

Величина МЭД во всех точках измерения — не более 12 Зв/час. **Было сделано заключение, что с учётом поглощения слоем воды эта величина говорит об отсутствии на дне больших открытых скоплений ТСМ.**

\* \* \*

В феврале 2022 г. исследование 1-го блока F-1 было возобновлено. Для изучения внутреннего пространства контеймента и внешней части пьедестала TEPCO, при участии IRID и Hitachi-GE Nuclear Energy, создала новую линейку дистанционно управляемых аппаратов.

Она включает в себя шесть устройств, способных передвигаться под водой и выполнять достаточно сложные задачи. Общее название роботов этого семейства — телеуправляемый подводный аппарат (англ. remotely operated underwater vehicle, сокращённо ROV).

Главная задача первого робота — ROV-A (рис. 26) состояла в постановке с помощью магнитов четырёх направляющих колец на стенке контеймента [35]. Так, чтобы следующие роботы могли проходить внутри колец, и благодаря этому избежать запутывания тянущихся за ними силовых и сигнальных кабелей (рис. 27).





Рис. 26. Общий вид робота ROV-A. Кольцо освобождается и магнитом прикрепляется к стенке контейнента



Рис. 27. Прохождение робота через кольцо, установленное ROV-A

Упрощённая схема передвижения ROV в контейнente приведена на рис. 28. Из неё видно, что для ввода аппарата был использован вход X-2, а затем он двигался против часовой стрелки, пройдя  $\sim 215^\circ$ , и поставил 4 кольца для следующих роботов.

Как уже говорилось, в дальнейшем (предполагалось, что полный цикл измерений пройдёт в 2022—2023 гг.) этот путь должны были использовать

остальные роботы (см. таблицу 3 и рис. 29) [36]. С их помощью предполагалось:

- обнаружить скопления ТСМ на дне пьедестала<sup>47</sup>;
- уточнить координаты и размеры этих скоплений (создать карту в 3D формате);
- провести радиоизотопный анализ;
- измерить потоки нейтронов в нескольких местах с целью обнаружения присутствия топлива;
- выполнить отбор образцов отложений.

**Таблица 3. Функции аппаратов ROV**

Название и назначение аппарата	Основные используемые детекторы
ROV-B. Создание трёхмерной карты отложений	ультразвуковой дальномер датчик температуры воды
ROV-C. Измерение толщины отложений	высокоэффективный ультразвуковой дальномер
ROV-D. Обнаружение ТСМ и их анализ	полупроводниковый $\gamma$ -детектор нейтронный детектор
ROV-E. Отбор образцов	устройство для отбора проб

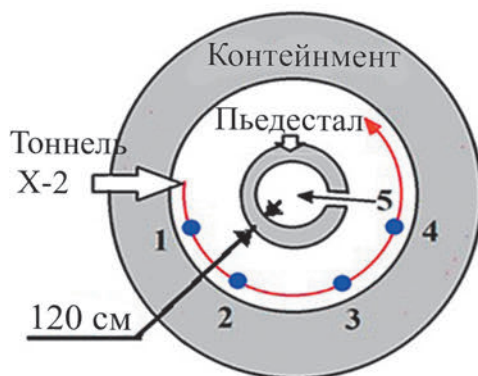


Рис. 28. Схема перемещения ROV-A в контейнменте. Красная линия — путь робота, синие точки — места постановки колец «1–4», «5» — технологическое отверстие (дверь), ведущее внутрь пьедестала. До аварии операторы входили через это отверстие для проверки и обслуживания оборудования

<sup>47</sup> Цилиндрический пьедестал поддерживает 440-тонный корпус реактора.

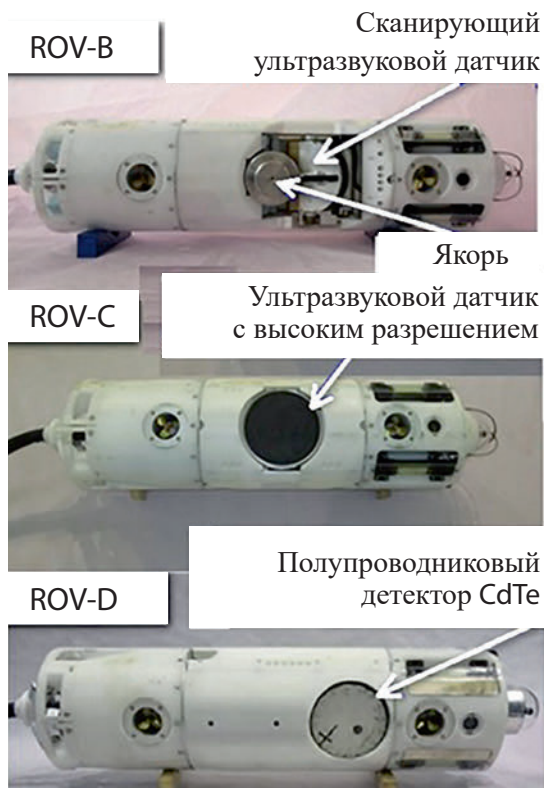


Рис. 29. Аппараты ROV

Уже первые исследования, начатые в начале марта 2022 г. с помощью ROV-A, оказались продуктивными. По ходу движения ROV-A передал внутренние изображения частей контейнента и пьедестала и провёл измерения мощности дозы (приводится значение —  $2 \text{ Зв/ч}^{48}$ ) и температуры.

<sup>48</sup> Что следует из низкого значения мощности дозы, измеренной роботом  $\sim 2 \text{ Зв/ч}$ ? Возможно, это ещё одно подтверждение значительных разрушений, при которых большое количество материалов вошло в состав ТСМ и поглощает излучение топлива на пути к детектору?



Рис. 30. Дно контейнента в месте погружения робота

В месте погружения робота были видны отложения в виде гальки (рис. 30), похожие на отложения во 2-м блоке. Как сообщил представитель ТЕРСО: «При движении аппарата вдоль пьедестала груды обломков поднялись со дна».

С 14 марта 2022 г. исследования стали проводиться с помощью подводного аппарата ROV-A2, также введённого через тоннель X-2. В период с 14 по 16 марта проводился тщательный визуальный осмотр по периферии пьедестала.

Однако 16 марта у побережья префектуры Фукусима произошло землетрясение магнитудой 7,4. Уровень воды в контейнменте 1-го энергоблока снизился из-за землетрясения, и исследования были приостановлены.

После восстановления уровня воды (17 мая) осмотр с использованием ROV-A2 был возобновлён. Он продолжался до 23 мая, когда робот был извлечён из контейнента.

Были получены новые фотографии отложений, определены их толщины и измерены потоки тепловых нейтронов у входа в пьедестал. Позднее эти измерения были сделаны в нескольких областях. Поток нейтронов менялся в пределах 6—50 н/см<sup>2</sup>·сек. Данные измерений показывают, что большая часть отложений представляет собой ТСМ. При этом толщина слоя отложений у дверного проёма (см. «5» на рис. 27) составляет ~ 1 м.

Работы продолжались и в 2023 г. В отчётах ТЕРСО и обзорах по уже выполненным исследованиям ([37]) говорится о том, что окончательные заключения будут сделаны после внимательного изучения полученных результатов и проведения дополнительных измерений. Но уже сейчас можно сделать некоторые важные выводы и сформулировать вновь возникшие проблемы.

Ещё раз подтвердился тот факт, что при аварии значительная часть кориума (а возможно, и весь он) вытекла из корпуса реактора 1-го блока и попала на пьедестал. В ТЕРСО пришли к выводу, что не менее 90% кориума покинуло корпус. Расплав взаимодействовал с бетоном стенок и основания пьедестала, образуя ТСМ. Часть их попала в контеймент, **а возможно, и в тор.**

На сделанных фото можно видеть, что поверх куч из застывших ТСМ находятся и фрагменты металлических конструкций реактора (рис. 31).



Рис. 31. Металлические конструкции реактора поверх застывших ТСМ

Очевидно, что их падение произошло уже после того, как значительная часть кориума покинула корпус реактора и его температура понизилась.

Серьёзное беспокойство вызывает **состояние пьедестала**. На полученных в 2022 г. (с помощью ROV-A2) фотографиях было обнаружено что железобетонные конструкции у дверного проёма (см. «5» на рис. 28) сильно пострадали. Видны их остатки — стальная арматура, на которой осели отложения (рис. 32, 33).

По обе стороны от двери бетон на стене пьедестала, толщиной первоначально 120 см, отсутствует до высоты около 100 см от пола. Вокруг цилиндрической силовой конструкции из листовой стали (т. н. «внутренней юбки»), встроенной для прочности внутрь пьедестала, бетона на этой высоте также нет.

Дальнейшие исследования, в том числе и в начале 2023 г., показали, что разрушения бетона произошли не только у двери, но и на больших участках стены пьедестала — не менее, чем на 3/4, а возможно, и на всём периметре. Несущая арматура обнажилась и могла потерять первоначальную проч-

ность. В этом случае встаёт вопрос о вероятности обрушения всего реактора, например, при новом сильном землетрясении<sup>49</sup>.



Рис. 32. Открытая стальная арматура (справа от двери)



Рис. 33. Открытая стальная арматура (слева от двери)

На совещании 14 апреля 2023 года с представителями регулирующего органа выступающие специалисты ТЕРСО напомнили, что пьедестал пережил достаточно сильное землетрясение в марте 2022 года (магнитудой 7.4), что доказывает его способность удерживать от падения корпус реактора.

<sup>49</sup> Японские исследователи предположили, что в случае падения корпуса в нём может образоваться трещина. А это вызвало бы дополнительный выброс радиоактивных материалов.

Кроме того, они, ссылаясь на результаты проведенных ещё в 2016 году оценок сейсмической опасности, предположили, что, даже если большая часть бетона опоры разрушена, она всё ещё способна сохранять функцию поддержки реактора.

Однако эти оценки могут оказаться чрезмерно оптимистичными в случае потери прочности арматурным каркасом. Вопрос остаётся открытым.

В ближайшее время помимо съёмок внутри пьедестала японские специалисты намерены также получить снимки днища корпуса реактора, которое проплавилось в ходе аварии.

## **ТРЕТИЙ БЛОК**

Летом 2017 г. с помощью робота «SUNFISH» начались исследования внутренних частей контейнента 3-го блока [38, 39] Ситуация осложнялась тем, что его нижняя часть была затоплена водой на глубину около 6 метров и при работе аппарат должен был двигаться под водой.

Специалисты ТЕРСО установили это еще двумя годами ранее [40] — 20 и 22 октября 2015 г. в контейнент через тоннель X-53 были введены панорамная видеокамера, температурный датчик и дозиметр (рис. 34).

При этом внутри контейнента не зафиксировали повреждений, уровень воды оказался очень близок к расчётному значению<sup>50</sup>, а измеренная доза была ниже, чем в других блоках.

После этого сотрудникам «Toshiba» и IRID потребовалось больше года, чтобы разработать плавающий робот, способный проводить под водой необходимые измерения и телесъёмку. Он должен был проникнуть внутрь контейнента через тоннель X-53, оборудованный защитными средствами, предотвращающими выход из реактора радиоактивных газов. Диаметр тоннеля составлял всего 14 сантиметров, и это определило малые габариты аппарата (рис. 35, 36).

---

<sup>50</sup> Измерения, проведённые в 2015 г., дали значение 6.3 м.

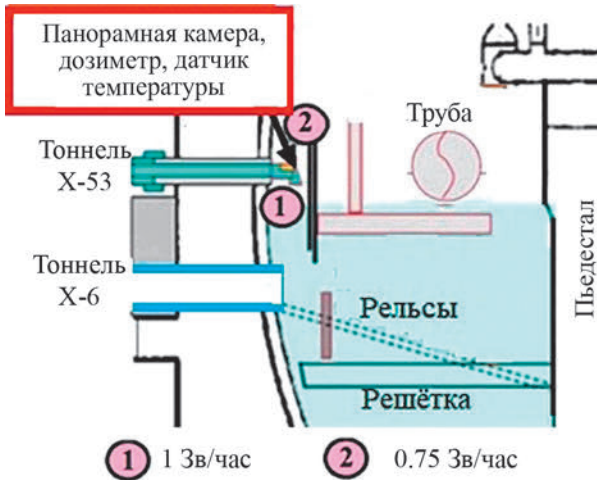


Рис. 34. Схема ввода датчиков в контеймент 3-го блока

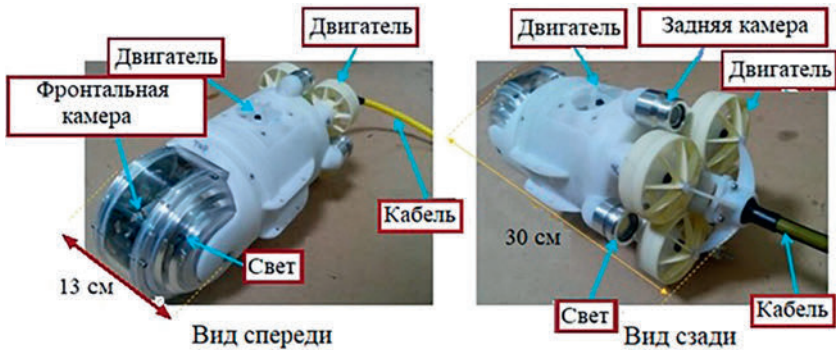


Рис. 35. Робот «SUNFISH» был оснащён пятью двигателями (с пропеллерами), двумя телекамерами, осветителями, датчиками и управлялся с помощью кабеля, идущего от центра операторской, расположенной в ~ 500 метрах от 3-го блока.

Согласно расчётам, радиационная стойкость аппарата ~ 200 Зв

После проведения трёхмесячных испытаний, обучения и доводки аппаратуры «SUNFISH» был признан готовым к работе и ранним утром 19 июля 2017 г. помещён в тоннель X-53 контеймента 3-го блока. Исследования продолжались до 22 июля.





Рис.36. Робот «SUNFISH»

Робот обнаружил многочисленные металлические конструкции — трубы, тросы и т. п., большинство из которых ранее использовались для постановки и извлечения стержней управления. Они частично покрыты ржавчиной и своеобразными отложениями.

Полученные с помощью робота изображения не так легко интерпретировать, но после их всестороннего изучения сотрудники ТЕРСО пришли к следующему выводу.

Расплавленный кориум вытекал из реактора, скорее всего, через технологические отверстия для стержней СУЗ<sup>51</sup>. Взаимодействуя с конструкциями в контейменте, он образовывал ТСМ. Последние застывали в виде свешивающихся вниз «сталактитов» и своеобразных отложений на конструкциях, на дне конфайнмента и его стенках. (рис. 37).



Рис. 37. Слева — «сталактиты», как предполагается, из застывших лавообразных ТСМ (съемка «SUNFISH» 19 июля 2017 г.). Справа — отложения этих ТСМ (21 июля 2017 г.)

---

<sup>51</sup> Не исключено, что произошло и частичное расплавление металла корпуса реактора.

\* \* \*

В своём обзоре мы подробно остановились на методах и средствах, которые понадобились японским (в содружестве с иностранными) специалистам, чтобы выяснить местоположение и состояние разрушенного ядерного топлива АЭС «Фукусима-1». В том числе — на конструкциях и работе разведывательных роботов, которые во многом являются уникальными. К сожалению, потраченные усилия ещё не принесли достаточной информации, необходимой для полноценного планирования следующей стадии ЛПА — извлечения ТСМ из аварийных блоков.

Сейчас, после многолетних исследований, достоверно известно только то, что во всех трёх блоках кориум вышел за пределы корпуса реактора и провзаимодействовал с материалами нижележащих конструкций, в том числе с бетоном пьедестала.

Поэтому заявление генерального директора подразделения ядерной энергетики ТЕРСО Такахиро Кимото, что после того, как удалось обнаружить ТСМ, «можно начинать составлять конкретные планы по их извлечению», представляется излишне оптимистичным.

## Литература

1. *F. Tanabe*. Analysis of Core Melt Accident in Fukushima Daiichi-Unit 1. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2011. — Vol. 8. — P.1135 — 1139.
2. Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (BSAF Project) Phase I Summary Report March 2015. Nuclear Regulation NEA/CSNI/R(2015) 18 February 2016, 53 с. <https://www.oecd.emb-japan.go.jp/files/000403295.pdf>.
3. Evaluation of the situation of cores and containment vessels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units-1 to 3 and examination into unsolved issues in the accident progression Progress Report No. 3 May 20, 2015, Tokyo Electric Power Company, Inc.
4. Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки. Под общей редакцией Л.А. Большова, Р.В. Арутюняна. Труды ИБРАЭ РАН, Москва, Наука, 2013 г.
5. *K. Borozdin, S. Greene, L. Zarija et. al.* Cosmic Ray Radiography of the Damaged Cores of the Fukushima Reactors. *Phys. Rev. Lett.* 109, 152501, 2012.
6. Bonomi. Progress in muon tomography. EPS Conference on Energy Physics, Venice, Italy, 5—12 July 2017. <https://indico.cern.ch/event/466934/>

- contributions/2524834/attachments/1490162/2316412/progress\_in\_muon\_tomography\_EPS-2017.pdf.
7. *H. Fujii, K. Hara, K Hayashi* et al. Investigation of the Unit-1 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography // Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2020, Issue 4, April 2020, 043C02, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa027/>.
  8. *H. Fujii, K. Hara, K Hayashi* et al. Investigation of the Status of Unit 2 Nuclear Reactor of the Fukushima Daiichi by the Cosmic Muon Radiography // Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2021, Issue 2, February 2021, 023C01, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa137/>.
  9. *H. Fujii, K. Hara, K Hayashi* et al. Study of the Unit-3 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography // Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2022, Issue 1, January 2022, 013C02, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptab109/>.
  10. *Susie M.L. Hardie, Ian G. McKinley* et. al. Management options for Fukushima corium // Progress in Nuclear Energy 92 (2016), 260–266.
  11. *А.А. Боровой, Е.П. Велухов*. Опыт Чернобыля. Часть 1. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2012 г. — 168 с.
  12. *А.А. Боровой, Е.П. Велухов*. Опыт Чернобыля. Часть 4. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2015 г. — 137 с.
  13. ТЕРСО обследует реакторы аварийной АЭС Фукусима-1 с помощью промышленных эндоскопов. РИА Новости 30.12.11. <http://www.atominform.ru/news9/i0434.htm>.
  14. Result of the dose measurement in the second investigation inside of Primary Containment Vessels, Unit 2, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. March 27, 2012. Tokyo Electric Power Company. [https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts\\_120327\\_02-e.pdf](https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_120327_02-e.pdf).
  15. *I. Sato, T. Honda, K. Nozaki* et. al. Comprehensive Analysis and Evaluation of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00295450.2019.1704581>.
  16. Робот «Скорпион», разработанный компанией Toshiba, изучит изнутри один из реакторов аварийной станции Фукусима. Робототехника. 14.08.15. <https://www.dailytechinfo.org/robots/7185-robot-scorpion-razrabotannyy-kompaniy-toshiba-izuchit-iznutri-odin-iz-reaktorov-avariynoy-stancii-fukusima.html>.
  17. Unit 2 Primary Containment Vessel Investigation at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (By the self-propelled investigation device) IRID TERCO. February 15, 2017. [https://www4.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts\\_170215\\_01-e.pdf](https://www4.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts_170215_01-e.pdf).

18. Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 Primary Containment Vessel Internal Investigation Results. TEPCO February 1, 2018. [https://www4.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2018/images/handouts\\_180201\\_01-e.pdf](https://www4.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2018/images/handouts_180201_01-e.pdf).
19. Technical Strategic Plan 2018 for the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. [https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/en/strategic-plan/book/20181109\\_SP2018eOV.pdf](https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/en/strategic-plan/book/20181109_SP2018eOV.pdf).
20. SimplyInfo.org: Unit 2 Fuel Debris Report. <http://www.simplyinfo.org/?p=16666>.
21. Simply Info.org / 2019 Annual Report The Fukushima Project. <http://www.simplyinfo.org/>.
22. TEPCO makes contact with melted fuel in unit 2. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TEPCO-makes-contact-with-melted-fuel-in-unit-2>.
23. Annual Research Report 2019 IRID. [https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2020/08/pamphleth31\\_eng.pdf](https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2020/08/pamphleth31_eng.pdf).
24. Fukushima Daiichi Nuclear Power Station The challenge of retrieving “fuel debris” Article No.2: What obstacles will we face? [https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail\\_148.html#main](https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_148.html#main).
25. Fukushima Daiichi Nuclear Power Station The challenge of retrieving “fuel debris” Article No.3: What obstacles will we face? [https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail\\_155.html](https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_155.html).
26. *K. Tonoike, H. Sono, K. Izawa*. Study of experimental core configuration of the modified STACY for measurement of criticality characteristics of fuel debris. [https://www.researchgate.net/scientific-contributions/2056895738\\_Kazuhiko\\_Izawa](https://www.researchgate.net/scientific-contributions/2056895738_Kazuhiko_Izawa).
27. *Chr. Journeau, D. Roulet, P. Piluso, K. Chagno*. Fukushima Daiichi fuel debris simulant materials for the development of cutting and collection technologies. *Journal of Nuclear Science and Technology* Volume 55, 2018, issue 9.
28. Ученые «Росатома» симулируют поведение ядерной «лавы» на Фукусиме. 23 октября 2018, <https://ria.ru/20181023/1531239316.html>.
29. Организации госкорпорации Росатом выполнили первую фазу проекта по изучению свойств обломков топлива АЭС Фукусима. <http://www.atominfo.ru/newst/a0044.htm>.
30. Technical Strategic Plan 2017 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. [https://www.dd.ndf.go.jp/files/topics/448\\_ext\\_02\\_2.pdf](https://www.dd.ndf.go.jp/files/topics/448_ext_02_2.pdf).

31. Technical Strategic Plan 2020 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. [https://www.dd.ndf.go.jp/files/topics/103\\_ext\\_02\\_1.pdf](https://www.dd.ndf.go.jp/files/topics/103_ext_02_1.pdf).
32. Robot enters Fukushima Daiichi unit 1 containment vessel. 10 April 2015. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Robot-enters-Fukushima-Daiichi-unit-1-containment>.
33. Development of a technology to investigate inside the Reactor Primary Containment Vessel (PCV) 30.04.15 Tokyo Electric Power Company. [http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2015/images/handouts\\_150430\\_04-e.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2015/images/handouts_150430_04-e.pdf).
34. Unit 1 Primary Containment Vessel Internal Investigation. March 27, 2017. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. [http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts\\_170327\\_01-e.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts_170327_01-e.pdf).
35. Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Implementation Status of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 1 Primary Containment Vessel Internal Investigation (As of Feb. 10). [https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2022/reference\\_20220210\\_01-e.pdf](https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2022/reference_20220210_01-e.pdf).
36. Robot photos appear to show melted fuel at Fukushima reactor. <https://abcnews.go.com/Technology/wireStory/robot-photos-show-melted-fuel-fukushima-reactor-82798029>.
37. Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 1. Primary Containment Vessel Internal Investigation Completion of the detailed visual investigation of the perimeter of the pedestal using submersible ROV-A2. [https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2022/reference\\_20220523\\_01-e.pdf](https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2022/reference_20220523_01-e.pdf).
38. Unit 3 Primary Containment Vessel Internal Investigation May 25, 2017. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. [https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts\\_170525\\_01-e.pdf](https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts_170525_01-e.pdf).
39. Unit 3 Primary Containment Vessel Internal Investigation November 30, 2017. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. [https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts\\_171130\\_03-e.pdf](https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts_171130_03-e.pdf).
40. Information Portal for the Fukushima Daiichi Accident Analysis and Decommissioning Activities. Investigative results into the Unit 3 PCV equipment hatch using a small. <https://fdada.info/en/home2/decommissioning2/progress2/decommissioning-14-en/>.

# **Фукусима. Проблема сброса накопленной на промплощадке АЭС «Фукусима-1» воды в океан**

*А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, С. Н. Краснопёров, В. А. Хвоцинский*

## **Введение**

13 апреля 2021 г. правительство Японии приняло решение о сливе, после проведения предварительной очистки от большей части техногенных радионуклидов, в океан более миллиона кубометров высокорadioактивной воды, хранящейся с момента аварии в ёмкостях (рис. 1) на территории АЭС «Фукусима-1» (далее — F-1). Это решение вызвало резко негативную реакцию как внутри страны, так и за её пределами.



Рис. 1. Баки с радиоактивной водой на территории F-1 (2021 г.)

В настоящей статье мы рассмотрим следующие вопросы, связанные с проблемой слива радиоактивной воды в океан:

- источники высокорadioактивной воды на площадке F-1;
- принятые меры по уменьшению объёма такой воды и создание препятствий для поступления её в океан;
- системы дезактивации;
- реальная опасность принятого решения о сливе радиоактивной воды в океан.

После аварии на нижних отметках сооружений F-1 остались большие объёмы принесённой цунами загрязнённой радиоактивной морской воды.

Источником такой воды стали и восстановленные системы охлаждения аварийных реакторов и бассейнов выдержки. Часть радиоактивной воды из этих систем попадала в подвалы зданий. В первые дни после аварии меры по её откачке предпринимать не успевали, но 27 марта, после того, как переоблучились работавшие в воде электрики, эта проблема вышла на первый план. В результате был организован процесс кругооборота охлаждающей воды (см. ниже), но при этом полностью ликвидировать её утечки не удалось.

Ещё одним из механизмов поступления радиоактивной воды стало загрязнение грунтовых вод. Надо сказать, что проблема грунтовых вод существовала на F-1 с самого начала. При строительстве станции береговая часть площадки была скрыта на 30÷40 м. Это позволило значительно упростить перегрузку на неё крупногабаритных грузов, доставляемых морским путём. В результате потоки грунтовых вод, которые протекали под холмами, граничащими со станцией, стали заливать нижние отметки её блоков. До аварии для предотвращения затопления вокруг зданий была сооружена специальная дренажная система, из которой насосами откачивалось 800—850 м<sup>3</sup> воды в сутки.

Толчки землетрясения разрушили эту систему и одновременно открыли воде пути для проникновения в нижние помещения блоков. Там она загрязнялась радиоактивными материалами, а затем попадала в другие подземные коммуникации станции.

Кроме того, дождевая вода, проходящая через слой почвы с радиоактивными выпадениями, тоже загрязняла грунтовые воды.

## **История вопроса**

По оценкам, сделанным специалистами ТЕРСО, через две недели после аварии на территории станции уже скопилось около 60 тыс. тонн (!) высокоактивной воды. Следовало принять срочные меры для предотвращения попадания её в океан — организовать откачку воды и её временное хранение.

Достаточного количества свободных ёмкостей в распоряжении сотрудников F-1 не было, поэтому из резервуаров, которые находились в составе центрального комплекса по обращению с отходами, пришлось слить в океан собранные до аварии ЖРО с низкой концентрацией радионуклидов. А затем закачать в эти резервуары высокоактивную воду, накопившуюся на нижних

отметках блоков, в траншеях и колодцах<sup>52</sup>. В результате в океан поступило 11500 т жидких отходов с полной активностью  $\sim 1,5 \cdot 10^{11}$  Бк.

Кроме того, ТЕРСО использовала все возможности для скорейшей доставки на АЭС дополнительных ёмкостей. Уже в конце апреля началась переброска на станцию новых, специально изготовленных баков.

\* \* \*

Одновременно с этими работами принимались меры по созданию барьеров (заграждений), способных защитить океан от попадания радиоактивной воды. Сначала в качестве таких барьеров, установленных непосредственно в порту F-1, попытались использовать намывтый ил и мешки с песком и цеолитом. Однако эффективность возведённых заграждений оказалась невелика. Во всяком случае, после того как 11 мая было зафиксировано, что  $\sim 250$  т загрязненной воды вытекло из третьего блока и попало в океан, активность воды в порту F-1 за пределами барьеров значительно повысилась (в четыре-пять раз, см. рис. 2).

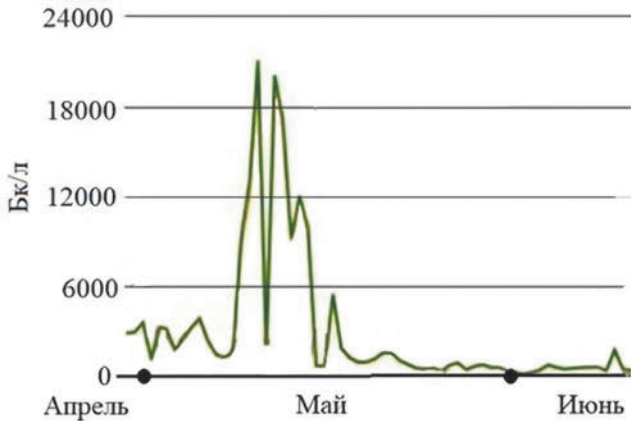


Рис.2. Активность <sup>137</sup>Cs в воде порта F-1 в апреле—июне 2011 г. [2]

Борьба с утечками воды продолжалась, увеличивался и её объём, хранившийся в баках на территории станции. К началу июня он составил уже  $\sim 10^5$  м<sup>3</sup>. По приблизительным оценкам общее содержание радионуклидов в этой воде составило  $7 \cdot 10^{17}$  Бк.

<sup>52</sup> 4 апреля ТЕРСО получило разрешение правительства Японии на проведение такой операции. «У нас нет другого выбора, кроме как сбросить слабо зараженную воду в океан в целях безопасности», — заявил генсек японского кабинета министров Юкио Эдано.



Приведённые данные отражают всю масштабность возникших проблем. Для их решения понадобились годы. Мы остановимся на основных этапах, которые были пройдены на этом пути.

## **2012—2013 гг.**

Резкое увеличение количества ёмкостей для хранения воды и подводных коммуникаций привело к появлению дополнительных утечек<sup>53</sup>. О сравнительно небольших из них, которые проходили часто, ТЕРСО не сообщала. Однако случались и крупные, о которых становилось известно. Так, 19 августа 2013 г. была обнаружена утечка 300 тонн воды с активностью ~ 80 МБк/литр из стального бака ёмкостью 1200 м<sup>3</sup>. В основном эта вода осталась на площадке станции, однако часть могла попасть в грунтовые воды и затем в океан. В интерпретации СМИ эта авария выглядела как «300 тонн радиоактивной воды из реактора утекли в океан».

## **2014 г.**

Вместе с борьбой за герметичность хранения шла работа по уменьшению попадания активности в дождевые и грунтовые воды. Она потребовала значительных усилий и больших расходов [3, 4].

В мае вступила в строй система обходного пути для грунтовых вод. На холмистой возвышенности перед АЭС был выкопан ряд дренажных колодцев. Вода из них откачивалась до её поступления к блокам, анализировалась на загрязнения и, в случае их отсутствия, сбрасывалась в океан (рис. 3).

## **2015 г.**

Было завершено возведение водонепроницаемого ограждения (защитной стены) из стальных шпунтовых свай с береговой стороны АЭС, которое задерживало воду на площадке станции, не позволяя ей сливаться в океан.

В том же 2015 г. вокруг блоков и непосредственно перед береговым ограждением было выкопано 46 дренажных колодцев для понижения грунтовых вод. После проверки на загрязнения вода из них сливалась в океан (рис.3).

---

<sup>53</sup> Сначала срок службы новых баков определили, как 5 лет. Предполагалось, что за такой срок удастся наладить водоочистку и необходимость в баках отпадёт. Оптимистические надежды не оправдались. А в результате спешного изготовления и монтажа сотен баков к первоначальным источникам загрязненной воды добавился еще один — течи из мест хранения ЖРО. Для борьбы с ними к марту 2019 г. всю р/а воду перекачали и стали хранить в специально изготовленных герметичных сварных баках. Были построены двойные защитные дамбы, препятствующие сливу воды с площадки АЭС в океан. Уровень воды в баках постоянно контролируется и проводится их внешний осмотр на предмет утечек.

## 2016 Г.

К 2016г. было выполнено водонепроницаемое покрытие из асфальта, силиката натрия (жидкое стекло) и других материалов для частей территории станции, на которых скапливались значительные объёмы дождевой воды. Эта вода также закачивалась в баки.

## 2014—2017 гг.

Вокруг четырёх аварийных блоков была создана так называемая «ледяная стена», строительство которой началось в 2014 г. По периметру площадки, на которой находятся блоки, были вырыты 1550 колодцев глубиной более 30 метров каждый. В них по трубам циркулировала охлаждённая жидкость. После начала замораживания грунт вместе с содержащейся в нем водой промерзал вплоть до пород с низкой водопроницаемостью. При замерзании ледяные колонны отдельных колодцев увеличивались в размерах и должны были образовать сплошную водонепроницаемую стену (рис. 3, 4). Полная длина её составляла ~1,5 км.



Рис. 3. Схема размещения на площадке F-1 систем по обращению с загрязнёнными грунтовыми водами

Из бюджета на работы было выделено более \$300 млн., а содержание стены обходится примерно в \$8,7 млн. в год. В августе 2016 г. строительство «Ледяной стены» было завершено на 99% (рис. 4).

Ожидалось, что объёмы протекающей под станцией воды удастся уменьшить на порядок. Однако ожидания не оправдались (рис. 5). Баки на площадке стали заполняться заметно медленнее, но и в 2020 г. в них всё ещё поступило (50—55) тыс. м<sup>3</sup> радиоактивной воды. В конечном итоге, благодаря функционированию «Ледяной стены» удалось значительно снизить поступление воды в помещения на площадке АЭС, что позволило строить планы о полном их осушении и последующем разборе завалов и выгрузке топлива и его фрагментов.



Рис. 4. В августе 2016 г. 99 процентов «Ледяной стены» были завершены, оставили только 7-метровую секцию для контроля

## 2017 г.

Была завершена работа по осушке и бетонированию береговых подземных технологических тоннелей, в которых ранее накопился большой объём радиоактивной воды.

Результативность перечисленных мероприятий и прогнозы на будущее иллюстрирует диаграмма на рис. 5.



Рис. 5. Динамика среднего ежедневного поступления в баки радиоактивной воды (м³).

Надо сказать, что все эти мероприятия привели к значимым успехам. К 2020 г. значительно уменьшилось неконтролируемое попадание радиоактивности в океан.

Мониторинг морской воды в районе, прилегающем к территории F-1, показывал, что концентрация опасных радионуклидов не превышает пределов обнаружения (см. таблицу 1).

**Таблица 1. Результаты анализов морской воды, отобранной вблизи точки сброса (вблизи Южного канала) [3]**

Дата отбора проб	Радионуклид	Результаты анализа проб
3 декабря 2020 г.	Cs-134	НПО* (0,72 Бк/л)
	Cs-137	НПО (0,72 Бк/л)
	Суммарное β	11 Бк/л
	<sup>3</sup> H	НПО (1,9 Бк/л)

\* НПО — ниже предела обнаружения. Значения в скобках представляют предел обнаружения. В то же время уровень вмешательства для питьевой воды, согласно НРБ-99/2009, составляет для изотопов <sup>134</sup>Cs — 7.2 Бк/л, <sup>137</sup>Cs — 11 Бк/л, а для трития — 7600 Бк/л.

## Системы дезактивации

С самого начала работ по ЛПА предполагалось, что хранение высокорадиоактивной воды на территории станции — временная, промежуточная стадия. По мере поступления вода должна была очищаться до необходимых уровней, а потом, скорее всего, сливаться в океан. Это позволило бы остановить рост числа хранилищ на территории станции. Однако реализовать эти планы не удавалось до середины 2023 года.

Сразу после аварии к созданию установок для дезактивации воды были привлечены французская компания «AREVA Inc.» и американская «Kurigon Inc.» (США). Позже дезактивационные мощности были дополнены одной, а затем двумя линиями системы SARRY (Toshiba).

Как уже говорилось, первой задачей для этих фирм стал запуск цикла охлаждения ядерного топлива в разрушенных реакторах и бассейнах выдержки очищенной водой (рис. 6). При этом цикл не удалось сделать полностью замкнутым. Часть охлаждающей воды, вновь ставшей высокорадиоактивной, оставалась в подвалах зданий и её приходилось откачивать в баки.

Система начала функционировать в июне 2011 г. Вода очищалась прежде всего от цезия<sup>54</sup>. Кроме того, для увеличения эффективности работы установки потребовалось уменьшить содержание морской соли, попавшей в воду на начальных этапах борьбы с аварией. Эту задачу выполняли установки Hitachi и Toshiba, введённые в строй в конце лета 2011 г.

Создав первоначальную систему охлаждения, специалисты TEPCO в конце 2011 г. пришли к решению построить комплекс ALPS (Advanced Liquid Processing System) (рис. 6—8), уникальный по своим характеристикам. Он должен был очищать воду от 62 радиоизотопов (всех, представляющих проблемы, кроме трития) и обладать высокой производительностью. Общая схема комплекса приведена на рис. 8.

Каждая из его трёх линий включает блок предварительной обработки, в секциях которого происходит очистка от солей железа и осаждение карбонатов. За ним следует основной блок, состоящий из различных видов адсорбционных «башен», очищающих воду от радиоактивных загрязнений.

Согласно проекту, суммарная производительность трёх линий комплекса должна составлять ~ 750 тонн в день. Работа над созданием и совершенствованием ALPS велась с 2012 г. Тестовые испытания линии «А» начались 30 марта 2013 г., линии «В» — 13 июня и, наконец, линии «С» — 27 сентября. Эти испытания выявили ряд недостатков, в том числе протечек. В ходе продолжительных тестов было определено время эффективной работы адсорбентов и приняты меры для его увеличения.

Рис. 9 иллюстрирует возможности ALPS по очистке воды от основных радионуклидов после её модернизации.

---

<sup>54</sup> Первоначальная очистка воды от <sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs значительно снизила радиационную опасность для работающего на станции персонала.

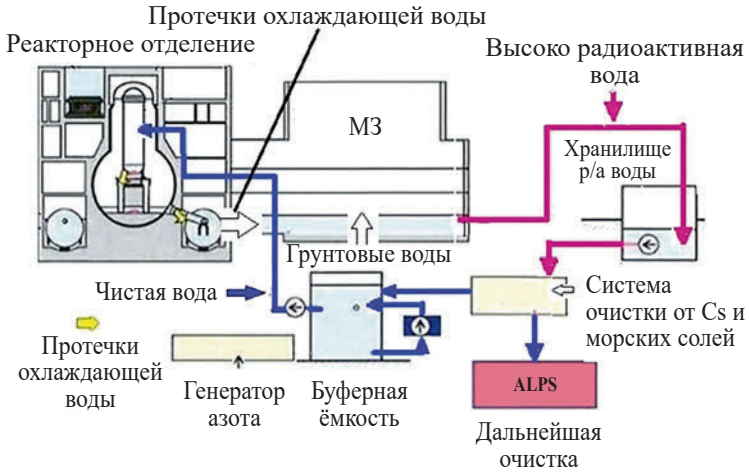


Рис. 6. Схема охлаждения разрушенного топлива очищенной водой



Рис. 7. В помещении комплекса ALPS

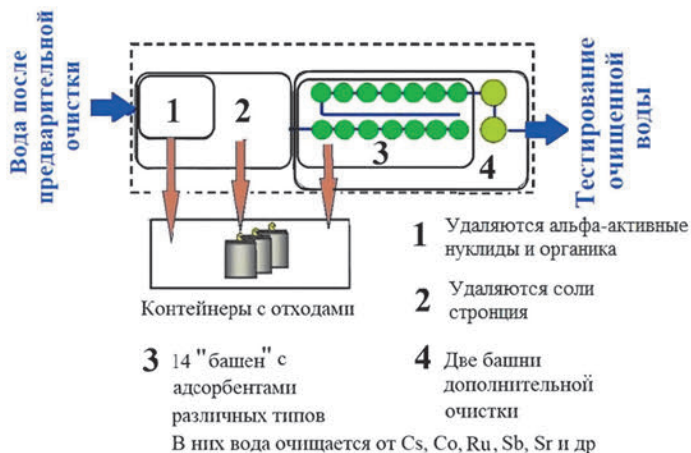


Рис. 8. Упрощённая схема очистки загрязнённой воды одной из линий ALPS

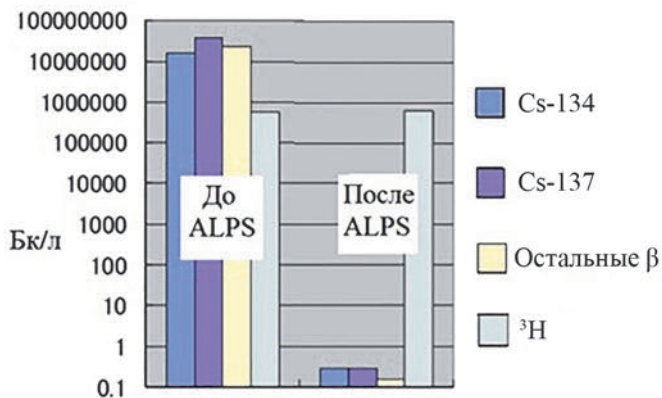


Рис. 9. Тестовые испытания. Степень очистки загрязненной воды от основных радионуклидов установкой ALPS

Видно, что система на много порядков снижает содержание в воде радиоактивных изотопов, но не очищает её от удавалось до середины 2023 года. С конца 2013 г. комплекс ALPS включился в работу, а в 2014 году вышел на полную мощность. На рис. 10 представлен график распределения объёмов загрязнённой и очищенной воды на площадке станции в зависимости от времени (2011—2015 гг.).

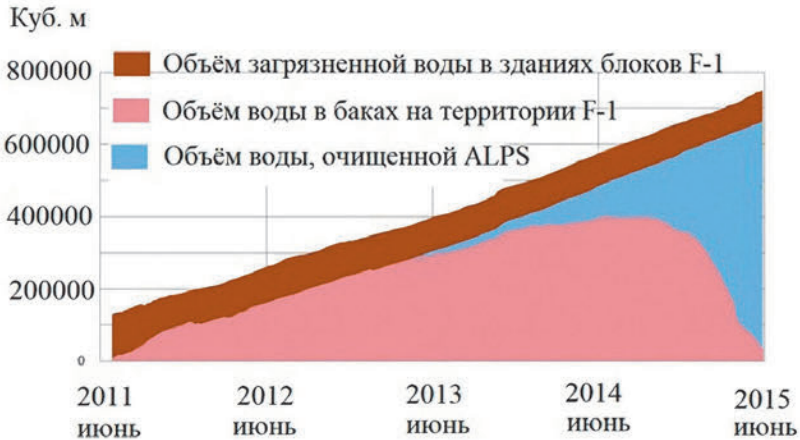


Рис. 10. Общий объем загрязнённой и очищенной воды, накопленной в зданиях и резервуарах (по состоянию на 28 мая 2015 года) [7]

До 2018 г., считалось, по умолчанию, что вся вода, хранящаяся в баках на территории станции, уже прошла полную очистку на установке ALPS. Но неожиданно выяснилось, что для 70% этой воды уровень загрязнения опасными радионуклидами (включая, например,  $^{90}\text{Sr}$ ) всё ещё значительно выше допустимых пределов [8]. TEPCO объяснила это тем, что цикл очистки пришлось существенно сократить, так как в прошлые годы приоритетной была задача по обеспечению очистки больших объёмов воды, что негативно сказалось на качестве очистки. После аварии необходимо было как можно быстрее снизить уровень радиации на площадке станции рядом с баками. TEPCO признала, что вода потребует повторной очистки. Такое обнаружение вновь открывшихся обстоятельств, ранее не афишированных компанией, было очень негативно воспринято японской и международной общественностью.

\* \* \*

Как уже говорилось, при правильно организованной работе ALPS могла очистить воду от всех значимых радионуклидов. От всех, кроме трития (см. рис. 9). И это стало главным препятствием для сброса её в океан.

Тритий —  $^3\text{H}$ , чистый  $\beta$ -излучатель с периодом полураспада  $\sim 12,4$  года. Максимальная энергия распада трития равна 18,6 кэВ, средняя энергия  $\beta$ -частиц — 5,7 кэВ. В реакторе он образуется в нескольких процессах: при тройном делении (в основном), а также в реакциях —  $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ ,  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$  или  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ ,  $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ .



Полное количество трития, накопленное в реакторах F-1 к моменту аварии, оценивается ТЕРСО как  $3.4 \cdot 10^{15}$  Бк (или 3400 ТБк) (рис. 11, подробнее см. [9]). Сброс трития в воду осуществляют все АЭС Японии в штатном режиме — в допустимых регуляторами пределах, которые рассчитываются исходя из дозовой нагрузки на окружающую среду и людей<sup>55</sup>.

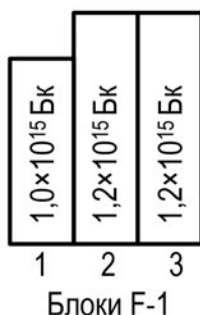


Рис. 11. Активность трития, накопленного в реакторах к моменту аварии

К 2020 г. на территории АЭС находилось 979 (!) баков с ~1,18 миллиона кубометров радиоактивной воды. Полная активность находящегося в них  $^3\text{H}$  составляла около 860 ТБк<sup>56</sup>. Насколько это опасно?

Действующие нормативы содержания  $^3\text{H}$  приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Действующие нормативы содержания  $^3\text{H}$  в питьевой воде**

Уровни вмешательства для питьевой воды, НРБ 99/2009 (Россия)	Международные пределы содержания трития в питьевой воде (нормы ВОЗ)	Критерий отнесения воды к ЖРО, ОСПОРБ 99/2010 (Россия)
7 600 Бк/л	10 000 Бк/л	1 000 000 Бк/л

Каких-либо собственных нормативных стандартов на содержание трития в пищевых продуктах и питьевой воде в Японии нет.

В настоящее время ТЕРСО остановилась на следующих **«операционных целях по сбросу воды из резервуаров временного хранения»:**

Cs-134 — 1 Бк/л или менее;

Cs-137 — 1 Бк/л или менее;

**$^3\text{H}$  — 1500 Бк/л или менее.**

<sup>55</sup> До аварии сброс трития от F-1 в океан составлял 2,0 ТБк в 2009 году, 1,6 ТБк в 2008 году, 1,4 ТБк в 2007 году.

<sup>56</sup> По состоянию на март 2020 г. средняя концентрация  $^3\text{H}$  составила ~730000 Бк/л.

Эти значения находятся значительно ниже нормативных пределов концентрации радионуклидов в морской воде. Для трития оно составляет всего **одну седьмую** нормы Всемирной организации здравоохранения для питьевой воды.

Из сказанного очевидно, что просто сливать загрязнённую воду в океан нельзя. Хотя концентрации трития сильно варьируются от одного бака к другому, но тем не менее его содержание намного превышает значение, установленное в операционных целях для F-1.

## **Выбор решения**

В 2020 г. ТЕРСО сообщила, что ситуация с загрязнённой водой стала почти критической. Согласно существующим планам, в дальнейшем число дополнительных баков, которые можно было разместить на территории станции, весьма ограничено<sup>57</sup>. Общая ёмкость хранилищ воды не должна превышать ~1,5·10<sup>6</sup> м<sup>3</sup>. С учётом того, что поступление р/а воды составляло 50 000 ~ 60 000 м<sup>3</sup>/год, уже в 2024 г. дополнительные баки будут заполнены. Что касается организации хранения за пределами территории АЭС, то тут возникает два рода трудностей: одна, связанная с объективными причинами, вторая — с субъективными.

К первой относится, прежде всего, то, что перемещение значительного количества баков с ЖРО за пределы площадки увеличит риск, связанный с разгерметизацией как их самих, так и сложных подводящих коммуникаций. Особенно при землетрясениях, которые часто происходят в районе F-1. Вторая причина связана с тем, что местные власти категорически против расширения области хранения высокорadioактивных отходов. Согласование проекта столкнётся с большими, возможно, непреодолимыми трудностями и, во всяком случае, потребует много времени<sup>58</sup>.

Поэтому встал вопрос о способе захоронения ЖРО.

Была создана специальная «Целевая группа по тритиевой воде» задачей которой стала оценка различных вариантов обращения с очищенной ALPS водой, её хранения и захоронения. Группа начала свою работу в конце декабря 2013 г. и опубликовала подробный отчёт 3 июня 2016 г. Были

---

<sup>57</sup> Компания утверждает, что построить больше резервуаров на территории F-1 невозможно, так как необходимо выделить место для других конструкций, необходимых в процессе вывода из эксплуатации.

<sup>58</sup> Хранение загрязнённой тритием воды в баках в любом случае есть временная мера. Если считать, что время вывода F-1 из эксплуатации составит ~ 40 лет, то активность трития в них за счёт естественного распада снизится ещё недостаточно для начала слива жидкости в океан. И придётся вновь возвращаться к этому вопросу.

детально рассмотрены такие вопросы, как нормативная и техническая осуществимость предлагаемых методов, длительность проведения работ, их радиационная безопасность, ориентировочная стоимость, образование вторичных отходов и т.п.

Эксперты рассмотрели пять вариантов захоронения воды, очищенной ALPS:

- закачка в геосферу<sup>59</sup>;
- сброс в форме водорода<sup>60</sup>;
- отверждение и последующее подземное захоронение<sup>61</sup>;
- испарение<sup>62</sup>;
- контролируемый сброс в океан после разбавления до заданных пределов.

Три первых варианта не имели масштабных аналогов и требовали проведения сложных дополнительных исследований. При реализации этих вариантов следовало учитывать трудности с долговременной надёжностью захоронения и ещё большие трудности при ликвидации последствий в случае аварии.

Были сделаны оценки стоимости каждого из перечисленных методов. Они носили порядковый характер, но давали представление о сложности предстоящей работы.

Так, эксперты считали, что «сброс в море» потребует затрат в пять раз меньше, чем «закачка в геосферу», и в 30 раз меньше, чем «сброс в форме водорода». А расходы на «отверждение и подземное захоронение» превысят «сброс...» в 70 раз!

Что касается варианта «испарение», то хотя он оценивался в 10 раз дороже «сброса...», но аналог существовал. При аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» в 1979 году накопилось 8,7 тысяч тонн высокорadioактивной воды. После прохождения очистки с помощью ионообменных и цеолитовых фильтров она по всем параметрам, кроме содержания <sup>3</sup>H, могла бы быть сброшена в реку (после разбавления). Однако из-за протестов населения городов, находящихся ниже по течению реки, от такого решения пришлось отказаться.

В результате была сооружена установка по двухступенчатому выпариванию воды. Чистый пар, включавший тритий, рассеивался в атмосфере, а образовавшийся остаток, содержащий 99,9 % примесей, растворённых в воде, подвергся отверждению и был захоронен [10]. Полная активность трития,

---

<sup>59</sup> Тритиевая вода после предварительной обработки с помощью компрессора закачивается в глубокие слои геосферы (глубиной ~2500 м).

<sup>60</sup> Восстановление до водорода и выпуск в виде газообразного водорода в атмосферу.

<sup>61</sup> Вода, содержащая тритий, смешивается с отвердителем (например, цементом) и в твёрдом виде хранится под землёй.

<sup>62</sup> Тритиевая вода испаряется и высокотемпературный пар выбрасывается из выхлопной трубы в атмосферу.

выброшенного в виде пара с «Три-Майл-Айленд», оценивается в ~ 24 ТБк, а объём испарившейся воды ~ 8700 м<sup>3</sup>.

Хотя это много меньше, чем в случае F-1, для осуществления операции потребовалось 10 лет подготовки и ещё три года для проведения непосредственно испарения.

Последний вариант захоронения — контролируемый сброс в океан после разбавления до заданных пределов, как уже говорилось, используется всеми АЭС Японии. По имеющимся данным, за три года до аварии годовой выброс трития от различных ядерных установок в Японии составлял в среднем от 0,0316 до 83 ТБк. На F-1 был для трития установлен эксплуатационный норматив сброса в **22 ТБк за год**.

Таким образом, опыт изготовления установки для сброса существует, она существенно проще, чем система для испарения. Кроме того, в последнем случае возникают дополнительные трудности с мониторингом распространения выбрасываемых газов из-за постоянных изменений воздушных течений в атмосфере.

После продолжительных обсуждений, в том числе и с привлечением общественности (правда в весьма ограниченном составе), в январе 2020 г. специальный комитет при Министерстве экономики, торговли и промышленности рекомендовал контролируемый сброс в океан, как наиболее реалистичный вариант захоронения тритиевой воды. 13 апреля 2021 г. правительство Японии официально это одобрило.

Решение было принято на совещании, председательствовал на котором премьер-министр Ёсихидэ Суга (рис. 12). Был также утверждён базовый план по выпуску в море более 1 млн тонн очищенной воды.

После этого японское правительство обратилось к МАГАТЭ с просьбой об оказании консультативной помощи. Рассмотрев вопрос, Агентство заявило, что выбранный Японией вариант захоронения является как технически осуществимым, так и соответствующим международной практике.

Было решено, что МАГАТЭ тщательно оценит основные элементы японского плана и будет осуществлять непрерывное наблюдение за его реализацией. «МАГАТЭ будет играть жизненно важную роль в мониторинге и обзоре осуществления Японией своего плана», — заявил Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси. — На глазах международного сообщества эксперты МАГАТЭ смогут убедиться в том, что сброс воды осуществляется безопасно».



Рис. 12. Заседание кабинета министров Японии во вторник 13 апреля 2021 г.

Для этого в Агентстве была создана Целевая группа, действовавшая с привлечением специалистов международного уровня, которая детально изучила план сброса, предложенный ТЕРСО, и выработала соответствующие рекомендации.

В общих чертах, план действий состоял в следующем:

После предварительной очистки загрязнённая вода проходит дополнительную очистку ото всех радионуклидов, кроме трития, разбавляется до необходимых концентраций ЗН (не более 1500 Бк/л) морской водой и сбрасывается в океан. Общее количество трития, попадающего каждый год в океан, установлено на уровне  $\leq 22$  ТБк.

**Предполагается, что для сброса всей накопленной воды потребуется 30—40 лет и этот срок согласуется со сроком вывода F-1 из эксплуатации.**

Принципиальная схема установки для сброса очищенной воды в океан представлена на рис. 13.

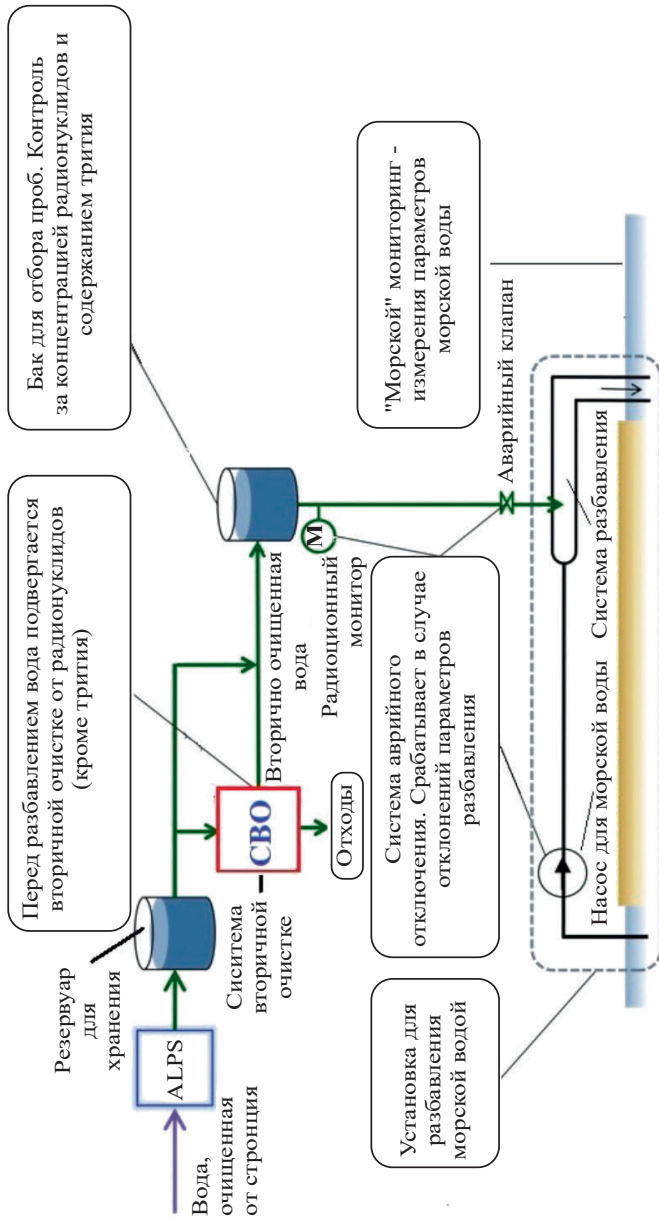


Рис 13. Принципиальная схема установки для сброса очищенной воды в океан

Особое внимание при её работе уделяется контролирующим системам: системе мониторинга очистки от радионуклидов, мониторинга степени разбавления, а также системе аварийного отключения процесса в случае нарушения заданных параметров. Контроль воды в океане осуществляется в многочисленных (~50) точках мониторинга и отбора проб. Более половины точек размещены в пределах 10 км от запланированной зоны сброса воды.

Производится периодическая проверка продуктов рыболовства на соответствие установленным нормам радиационной чистоты.

Сброс воды должен происходить через тоннель (рис. 14—16) диаметром 2—5 м, проложенный под дном океана на глубине ~12 м на расстояние примерно 1 км от берега<sup>63</sup>. Этот тоннель соединит специальный колодец на территории станции, в котором будет храниться очищенная системой ALPS вода, с закрытой для рыболовства зоной океана.

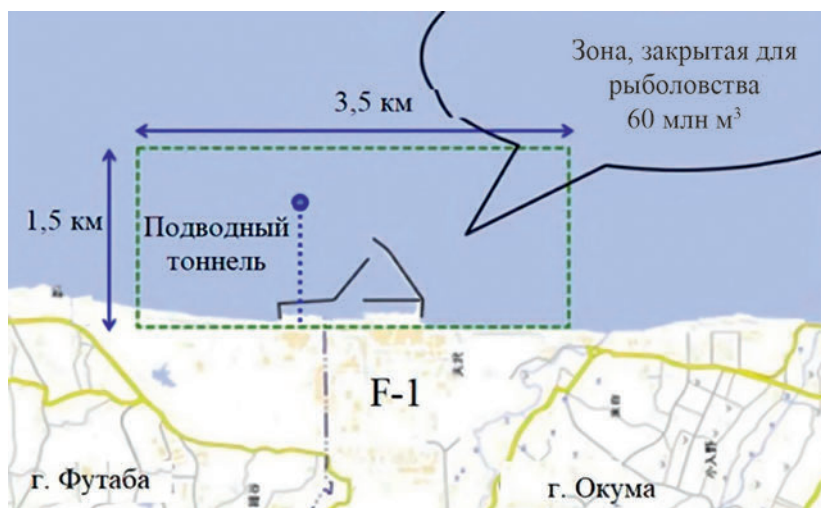


Рис. 14. Размещение тоннеля для сброса воды

<sup>63</sup> В случае сильного землетрясения или цунами трубопровод, проложенный в подводном тоннеле, безопаснее, чем просто прокладка трубы под морским дном



Рис. 15. Судно для исследования морского дна осуществляет мониторинг в районе выхода в океан тоннеля для сброса радиоактивной воды



Рис. 16. Внутренний вид тоннеля.



## **Реакция международного сообщества**

Первый сброс воды был запланирован на начало 2023 г. Однако после заявления японского правительства о сливе загрязнённой тритием воды в океан многие страны мира высказались против этой операции.

Из соседей Японии наиболее жёсткую позицию в отношении сброса воды в океан занял Китай. «Тихий океан — не сточная канава Японии» — заявил на брифинге официальный представитель МИД КНР Чжао Лицзянь. — Мир не должен расплачиваться за утилизацию Японией радиоактивной воды. Что касается того, что некоторые японские официальные лица заявили, что «ничего не будет, если даже выпить эту воду», то пусть они её сначала выпьют, а мы посмотрим».

В своей официальной ноте КНР заявила, что ждёт от Токио консультаций по этому вопросу, детальных разъяснений и надеется на то, что будут приняты все меры к тому, чтобы свести к минимуму возможный ущерб для морской среды.

Южная Корея поначалу собиралась даже подавать на Японию в международный суд, однако на нее надавили США, которые с самого начала поддерживали японские планы. Теперь Сеул заявляет, что не против сброса воды при условии соблюдения норм МАГАТЭ и предоставления необходимой информации.

Россия рассчитывает, что Япония позволит проводить радиационный мониторинг в тех местах, где будет осуществлён сброс воды с F-1. Об этом ещё 15 апреля 2021 г. заявила официальный представитель МИД РФ Мария Захарова. Она отметила, что помимо других недостающих сведений официальная информация, предоставленная Японией, не включает оценку экологических рисков для Тихоокеанского региона.

\* \* \*

Одновременно целая волна протестов была озвучена в масс-медиа.

Их можно разделить на несколько групп.

К первой относятся эмоциональные высказывания, не содержащие сколько-нибудь конкретных аргументов, типа — «при любой ситуации выбрасывание радиоактивных отходов в открытую среду является делом аморальным»<sup>64</sup>.

Более серьёзные претензии высказываются профсоюзами рыбаков Фукусимы. Они заявляют: «Мы не оспариваем оценки по безопасности, но нас беспокоит то, что напуганные люди в стране и за рубежом из-за слухов перестанут покупать наши морепродукты. Ассоциация ждёт, что правитель-

---

<sup>64</sup> Директор по программам Российского отделения Greenpeace И. Блоков.

ство приложит больше усилий для разъяснения ситуации и успокоит потребителей. Пока же мы однозначно против слива».

Ряд биологов считает, что выброс трития даже в концентрациях в 40 раз меньше нормы приведёт к его накоплению в морских организмах, а таким образом он может попасть в пищу людей. Никаких результатов исследований, подтверждающих этот вывод, не приводится.

Наконец, существует многочисленная группа, которая объясняет свои опасения сложившейся негативной репутацией ТЕРСО. Свою роль в растущем недоверии к компании сыграло то, что трудности, возникающие при работах по ЛПА, часто замалчивались или о них становилось известно со значительным опозданием (о чём мы упоминали выше).

Японские сайты писали: «Многие ставят под сомнение планы ТЕРСО, потому что существует высокий уровень недоверия к компании после многих лет утечек, разливов, неисправного оборудования и нарушений норм безопасности» [14].

При этом следует признать, что иной экономически и технологически осуществимой альтернативы очистке и сбросу накопленной радиоактивной воды в океан не существует, и этот путь является единственным возможным для продолжения процедуры вывода аварийной АЭС из эксплуатации в обозримом будущем.

Вместе с тем операция, которая предполагает многолетнее тщательное выполнение сложных операций, постоянный мониторинг чистоты сбрасываемой воды и радиационной ситуации в океане, может проходить только при максимальной открытости.

Что касается мнения экспертов в области АЭС, то, как мы видели, **МАГАТЭ не ставит под сомнение намеченную Японией программу и пообещало контролировать её безопасность на всех этапах.** Мнение российского научного сообщества по этому вопросу в целом согласуется с позицией МАГАТЭ.

Оценки, выполненные специалистами ИБРАЭ РАН, говорят о том, что «плановое долгосрочное поступление воды с концентрацией трития до 1500 Бк/л в океан **не будет представлять какого-либо вреда для морской фауны и человека,** а концентрация трития за пределами ближней акватории АЭС будет в сотни раз ниже наиболее строгих допустимых пределов или даже ниже пределов приборного обнаружения, при условии, что сама процедура будет осуществляться без нарушений установленного регламента и аварийных ситуаций» [15].

\* \* \*

24 августа 2023 года на F-1 начался сброс воды. К этому моменту на площадке станции хранилось около 1100 баков.

Ежедневный сброс начался с 460 тонн и нарастает достаточно медленно. К концу марта 2024 года ТЕРСО планирует выпустить 31 200 тонн очищенной воды, что позволит опорожнить только 10 баков, поскольку на объекте будет продолжаться накопление радиоактивной воды.

Позже темпы слива должны ускориться, и «примерно 1/3 резервуаров будут демонтированы в течение следующих 10 лет, что освободит место для строительства сооружений, необходимых для вывода станции из эксплуатации», — заявил исполнительный директор ТЕРСО Джуничи Мацумото, который отвечает за сброс очищенной воды.

Надо сказать, что график сброса зависит от многих вещей. Прежде всего, от поступления в баки загрязненной воды.

Согласно сообщению ТЕРСО, в 2023 г. удастся уменьшить её количество до ~90 т в день (т. е. до ~33000 т в год). При этом, как мы указывали выше, полная активность трития, находящегося в баках на территории станции, практически не уменьшится.

Поэтому следует, с одной стороны, принимать все возможные меры для уменьшения поступления воды в баки. С другой стороны — осуществлять сначала сброс наименее загрязненной воды, используя то, что за время сброса (особенно, если он продлится 40 лет) активность трития уменьшится почти на порядок за счёт естественного распада.

\* \* \*

В заключение мы хотели бы отметить следующее. Из документов ТЕРСО не до конца ясно, решит ли полностью проблему накопления на площадке F-1 баков с загрязнённой водой её предполагаемый сброс в океан. Предполагается, что благодаря функционированию «Ледяной стены» образование новой радиоактивной воды будет снижено до минимума, что позволит разгрузить хранилища ЖРО.

Возможно, японские специалисты надеются на дальнейшее уменьшение притока или среднего содержания  $^3\text{H}$  в воде. Они могут также пересмотреть допустимые нормы её сброса в океан.

Недаром Тоеси Фукета, председатель Органа по ядерному регулированию Японии (NRA), заявил на пресс-конференции, что планируемый лимит в 22 триллиона Бк на ежегодный сброс  $^3\text{H}$  «не имеет научного значения».

Вопрос об этом остаётся открытым.

Заявленные объемы сброса выбирались, исходя из нормативов обеспечения экологической безопасности для морской воды и населения. В указанные нормативы заложен значительный запас по безопасности, что позволяеткратно увеличить ежегодные сбросы без какого-либо доказуемого ущерба для экологии.

## **Позиция ИБРАЭ РАН по вопросу сбросов воды в океан с промплощадки АЭС «Фукусима-1»**

По информации, представленной японской стороной к настоящему моменту, можно сделать вывод о том, что сброс очищенной воды с промплощадки АЭС «Фукусима-1» не приведёт к какому-либо загрязнению территориальных вод сторонних государств или Тихого океана.

По нашим оценкам, представленные в японских материалах регламентные процедуры, технические подходы и расчётные методики выглядят в достаточной степени достоверными и исчерпывающими. Сама процедура проходит под контролем МАГАТЭ, обеспечен постоянный радиационный мониторинг морской среды для подтверждения безопасности самого сброса.

По результатам заочной дискуссии между японской стороной и китайскими и российскими специалистами, которая проходила в период с 2022 по 2023 год, а также по результатам выпущенных ранее японской стороной материалов, освещающих состояние и технологии процедуры сброса очищенной от радионуклидов (кроме трития) воды, накопленной на промплощадке АЭС «Фукусима-1» в океан, мы пришли к заключению, что японская сторона на сегодняшний день дала исчерпывающие по своему содержанию ответы на все заданные вопросы.

Объём хранящейся на площадке станции загрязненной воды достаточно велик, но впоследствии она проходит процедуру очистки и поступит в океан только при содержании техногенных радионуклидов в ней ниже допустимых уровней, за исключением трития, очистка от которого по-прежнему невозможна в промышленных масштабах. Всего в 2021 году была обозначен объём в 1,25 млн. м<sup>3</sup> уже находящейся на хранении и приготовленной для сброса очищенной воды [16]. Японская сторона подчеркивает, что вода, подготовленная к сбросу в океан, фактически не является радиоактивно загрязнённой, и её следует считать прошедшей многоступенчатую систему очистки, то есть, очищенной от техногенных радионуклидов (за исключением трития). Всего планируется осуществлять контроль содержания 29 радионуклидов, которые до очистки присутствовали в воде в значительных концентрациях, и еще 39 радионуклидов, присутствие которых будет контролироваться дополнительно. Ожидаемая сумма отношений требуемых по законодательству концентраций к пределу выброса радионуклидов, отличных от трития, по результатам испытаний очистительной установки составляет менее 1, что гарантирует соблюдение нормативов по сбросам в океан для них, и непревышение допустимых уровней воздействия на человека и водную биоту.

В процессе обсуждения заинтересованными сторонами критике подвергался сброс очищенной воды в океан как способ утилизации накопленной

загрязнённой воды. Предварительно рассматривались варианты как дальнейшего накопления воды в новых хранилищах за пределами площадки АЭС, так и вариант принудительного выпаривания. Из приводимых доводов японской стороны следует, что выбранный вариант очистки загрязнённой воды (по всем техногенным радионуклидам, кроме трития) сброса является наиболее экологичным из всех рассмотренных.

Так, на площадке АЭС «Фукусима-1» уже имеется более 1 000 резервуаров, и они занимают значительную часть площади, пригодной для хранения фрагментов конструкций АЭС, что в данный момент необходимо для процесса вывода АЭС из эксплуатации. Создание дополнительных резервуаров позволит только отсрочить, но не решить проблему утилизации воды. При её дальнейшем длительном хранении могут возникнуть риски утечек, связанные с износом резервуаров или воздействием природных стихийных бедствий.

На АЭС «Фукусима-1» стандартное эксплуатационное значение для сброса на будущие периоды установлено на уровне 22 ТБк/год для трития [17]. В соответствии с этими значениями, сброс в море может осуществляться с учетом имеющейся в Японии практики, а объёмы сбрасываемой активности с площадки АЭС «Фукусима-1», если следовать озвученным ежегодным планам, также не являются необычно высокими, а, скорее, типичными для действующих при нормальной эксплуатации объектов такого уровня в Японии и других крупных странах-пользователях атомной энергии.

По итогам изученных материалов можно сделать вывод, что на данный момент японская сторона является осведомлённой и технически подготовленной в вопросах переработки и очистки радиационно загрязнённой воды и подготовки её к сбросу в океан после предварительного разбавления. Для осуществления данной процедуры подготовлена достаточная нормативная база и она полностью соответствует нормам МАГАТЭ. Также генеральный директор МАГАТЭ (г-н Гросси) в 2021 году уже заявлял: «Выбранный Японией метод утилизации воды является технически осуществимым и соответствует международной практике», отметив, что «контролируемый сброс воды в море регулярно используется на действующих атомных электростанциях в мире», что в целом говорит об одобрении МАГАТЭ данного способа утилизации в нынешних условиях [18].

В ходе дискуссии критике подвергались также выводы японской стороны о том, что сброс загрязненной тритием воды не нанесёт экологического ущерба третьим странам и не окажет значимого негативного влияния на население и биоту в районе сброса. В ноябре 2021 года японской стороной (компанией ТЕРСО) был опубликован научно-технический отчёт об оценке радиологического воздействия сброса в море воды, очищенной усовершенствованной системой.

В нём представлены результаты моделирования распространения радиоактивных примесей в акватории АЭС «Фукусима-1», которые в ближайшие годы будут поступать в океан через сбросной водопровод на расстояние 1 км от берега из ёмкостей с частично очищенной водой, расположенных на площадке АЭС. Они демонстрируют, что, при соблюдении установленных ограничений на концентрацию техногенных радионуклидов в сбросных водах и их объёмы, ожидаемые уровни радиационного воздействия на людей и водную биоту будут на 3–4 порядка ниже нормативно допустимых значений и никоим образом не смогут негативно повлиять на экологическую обстановку в регионе и здоровье населения в целом [19]. Относительно оценок радиационного воздействия последствий сброса очищенной воды на население через пищевые цепочки и на водные организмы японская сторона утверждает, что все риски в этой сфере были оценены и являются допустимыми, в том числе, в соответствии с международными стандартами МАГАТЭ. Допустимая активность трития, концентрация которого в сбрасываемых в окружающую среду водах наибольшая среди техногенных радионуклидов, составит не более 60 тыс. Бк/л [20, 21], что соответствует международным нормам для технической воды, а установленный Всемирной организацией здравоохранения допустимый предел для него в питьевой воде составляет сегодня 10 тыс. Бк/л (или 7,6 тыс. Бк/л в соответствии с российскими нормативами НРБ-99/2009 [22]). В Министерстве экономики, торговли и промышленности Японии пояснили (для агентства ТАСС), что «содержание трития в воде, которую предполагается сбросить в океан с АЭС «Фукусима-1», будет не более 1,5 тыс. Бк/л [4]. Это в 40 раз ниже международной нормы для технической воды» и в 5—7 раз ниже нормативов, принятых для питьевой воды. По результатам данного моделирования также было установлено, что концентрации трития выше фоновых значений будут наблюдаться в области радиусом не более 3 км от точки сброса на АЭС «Фукусима-1», что не выходит за пределы территориальных вод Японии. При этом уровень концентрации трития, распространяющегося в морские акватории других стран в результате диффузии при сбросе очищенной воды будет даже ниже естественного радиационного фона. Таким образом, к настоящему моменту нет каких-либо научно-обоснованных аргументов, чтобы утверждать, что сброс очищенной воды приведет к какому-либо загрязнению территориальных вод сторонних государств или Тихого океана. При этом фактические последствия можно будет оценить только после продолжительного периода наблюдений.

По нашим оценкам, представленные в японских материалах расчётные методики в значительной степени соответствуют современным подходам в области моделирования последствий распространения радиоактивных примесей в водной среде. В связи с этим, полученные японской стороной результаты выглядят в достаточной степени достоверными.

## Литература

1. Правительство решает выпустить очищенную воду с АЭС «Фукусима-1» в океан — старт через 2 года. <https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2021-04-12/QR9PIHT0G1KZ01>.
2. Do silt fences stop radioactive particles in water? <https://fukuleaks.wordpress.com/seawater/do-silt-fences-stop-radioactive-water/>.
3. Decommissioning Plan of Fukushima Daiichi Nuclear Power. Major Initiatives for Water Management. <http://www.tepco.co.jp/en/decommission/planaction/waterprocessing-e.html>.
4. Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов, А.А. Боровой, Е.П. Велихов. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». ИБРАЭ, Москва, 2018 г. 408 с.
5. Overview of the Multi-nuclide Removal Equipment (ALPS) at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station March 29, 2013 Tokyo Electric Power Company. [https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2013/images/handouts\\_130329\\_01-e.pdf](https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2013/images/handouts_130329_01-e.pdf).
6. Progress and improvements of the improved ALPS (multi-nuclide removal) system. [https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts\\_140911\\_04-e.pdf](https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_140911_04-e.pdf).
7. Current status of post-accident work at the Fukushima Daiichi NPP February-June 2015. <https://cnic.jp/english/?p=3121>.
8. Basic policy on handling of the ALPS treated water. [https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/202104\\_bp\\_breifing.pdf](https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/202104_bp_breifing.pdf).
9. *Katsumi Shozugawa, Mayumi Hori, Thomas. E. Johnson et. al.* Landside tritium leakage over through years from Fukushima Daiichi nuclear plant and relationship between countermeasures and contaminated water. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-76964-9.pdf>.
10. TEPCO Draft Study Responding to the Subcommittee Report on Handling ALPS Treated Water March 24, 2020 Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. <https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200324.pdf>.
11. Tritiated Water Task Force Report (June 2016). [https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20160915\\_01a.pdf](https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20160915_01a.pdf).
12. The Cleanup of Three Mile Island Unit 2, A Technical History: 1979 to 1990. <https://www.epri.com/research/products/NP-6931>.
13. TEPCO Draft Study Responding to the Subcommittee Report on Handling ALPS Treated Water March 24, 2020 Tokyo Electric Power Company

- Holdings, Inc. <https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200324.pdf>.
14. The toxic water at Japan's Fukushima nuclear plant. <https://www.aljazeera.com/news/2021/4/13/explainer-the-toxic-water-at-japans-fukushima-nuclear-plant>.
  15. К вопросу о планируемом сбросе воды от АЭС «Фукусима-1». <http://www.ibrae.ac.ru/newstext/1216/>
  16. IAEA Task Force Makes Progress in Safety Review of Japan's Plans for Discharge of Water Stored at Fukushima Site. IAEA. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-task-force-makes-progress-in-safety-review-of-japans-plans-for-discharge-of-water-stored-at-fukushima-site>.
  17. Отчёт подкомитета по ALPS от 10 февраля 2020 г. URL: [https://www.meti.go.jp/english/earthq.uake/nuclear/decommissioning/pdf/20200210\\_alps.pdf](https://www.meti.go.jp/english/earthq.uake/nuclear/decommissioning/pdf/20200210_alps.pdf).
  18. Пресс-релиз МАГАТЭ (13 апреля 2021 г.) «МАГАТЭ готово оказать поддержку Японии в утилизации воды на Фукусиме, говорит генеральный директор Гросси», URL: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-ready-to-support-japan-on-fukushima-water-disposal-director-general-grossi-says>.
  19. ТЕРСО. «Отчет об оценке радиологического воздействия на окружающую среду в отношении сброса в море воды, очищенной через ALPS (Этап сооружения / с изменениями)», февраль 2023 г., URL: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/newsroom/press/archives/2023/pdf/230220e0101.pdf#page=264>.
  20. Tritiated Water Task Force Report, June 2016 2016, Tritiated Water Task Force. Ministry of Economy, Trade and Industry (Japan) [Электронный ресурс] URL: [https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20160915\\_01a.pdf](https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20160915_01a.pdf) (Дата доступа: 14.04.2021).
  21. Report on the discharge record and the seawater monitoring results at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station during February, IAEA, Information (17:00), March 25, 2021 [Электронный ресурс] URL: [https://www.iaea.org/sites/default/files/21/03/fukushima\\_nps\\_update\\_2021-03-25.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/21/03/fukushima_nps_update_2021-03-25.pdf) (Дата доступа: 14.04.2021).
  22. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.



*Научное издание*

## **ТРУДЫ ИБРАЭ**

*Под общей редакцией академика РАН Л. А. Большова*

**Выпуск 17**

*А.А. Боровой, С.Л. Гаврилов, С.Н. Краснощёров, В.А. Хвоцинский*

# **ЧЕРНОБЫЛЬ И ФУКУСИМА. НЕРЕШЁННЫЕ ПРОБЛЕМЫ**

*Утверждено к печати Учёным советом  
Института проблем безопасного развития атомной энергетики  
Российской академии наук*

*Редактор: Турецкий С. В.  
Дизайн и вёрстка: Наконечная Е. Л., Степанова М. В.*

*Оригинал-макет подготовлен ИБРАЭ РАН  
Иллюстрации приведены в авторской редакции*

*Сдано в печать 11 марта 2024 г.*

*Формат 60x90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>  
Печать офсетная. Гарнитура «Оффицина»  
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 8,16. Усл.-печ. л. 8,74.*

*Заказное*