



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

А.А. БОРОВОЙ, Е.П. ВЕЛИХОВ

ОПЫТ ЧЕРНОБЫЛЯ

часть 3





НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

А.А. БОРОВОЙ, Е.П. ВЕЛИХОВ

ОПЫТ ЧЕРНОБЫЛЯ

ЧАСТЬ 3

Москва, 2013

УДК 621.039.586

Корректор: В.В. Новикова

Дизайн и верстка: Е.Р. Осьмакова

А.А. Боровой, Е.П. Велихов.

Опыт Чернобыля (работы на объекте «Укрытие»). Часть 3.

М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013, 156 с.

ISBN 978-5-904437-90-9

Почти каждый шаг в многолетней эпопее ликвидации последствий аварии на ЧАЭС требовал поиска нестандартных научно-технических решений. В результате коллективом инженеров и ученых, работающих в «Курчатовском институте», других НИИ России и Украины, был накоплен уникальный опыт. Многие из найденных решений, созданных методик и приборов могут быть использованы для предотвращения и минимизации последствий даже относительно небольших по масштабам инцидентов в области ядерной энергетики и промышленности. В «Курчатовском институте» были выпущены многочисленные публикации по этой теме, однако они далеко не исчерпали всей накопленной информации.

Поэтому было решено выпустить монографию, аккумулирующую опыт работ на ЧАЭС (в основном на объекте «Укрытие»).

Ввиду большого объема материала он разделен на несколько частей. Но и при таком подходе книга смогла включить в себя описание только наиболее интересных (с точки зрения авторов) исследований, которые выполнялись при участии «Курчатовского института».

ВВЕДЕНИЕ (ко всей книге)

Уже более четверти века прошло с момента аварии на четвертом блоке Чернобыльской АЭС.

Она произошла ночью 26 апреля 1986 г. и привела к полному разрушению активной зоны реактора, верхней части здания 4-го блока станции, к сильным повреждениям деаэрационной этажерки и машинного зала.

Взрывы и возникший пожар сопровождалось выбросом огромной радиоактивности.

Ежесуточно в окружающую среду попадали миллионы Кюри, и этот процесс продолжался до 6 мая, после чего выброс резко упал (в тысячи раз) и в дальнейшем продолжал уменьшаться (рис. 1).

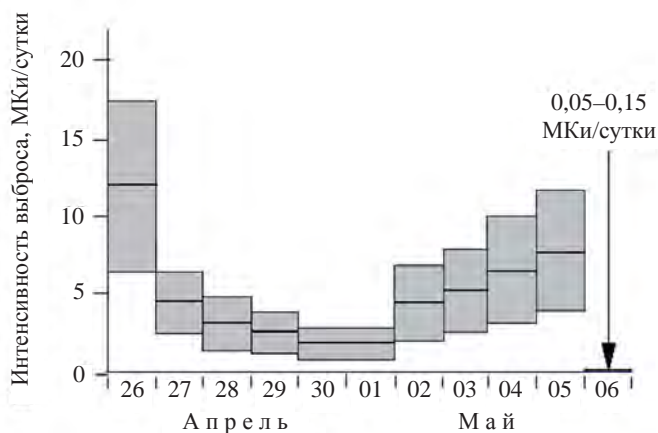


Рис. 1. Интенсивность выброса радиоактивности из разрушенного блока в период активной стадии аварии (в миллионах Кюри в сутки). Погрешность оценки выброса $\pm 50\%$. Значения выброшенной активности пересчитаны на 06.05.86 г. (конец активной стадии) с учетом радиоактивного распада¹ [1]

Всего за пределы разрушенного блока было выброшено (в процентах от накопленного до аварии в реакторе количества радионуклидов) [2]:

- радиоактивных инертных газов — 100%,
- радионуклидов йода, в том числе ^{131}I — (50–70)%,
- ^{137}Cs и ^{134}Cs — (33 \pm 10)%,
- нелетучих радионуклидов в составе частиц диспергированного ядерного топлива (среди них ^{90}Sr , ^{144}Ce , ^{239}Pu , ^{241}Am и многих других) — до 5%.

На рис. 2 представлена карта загрязнения Европы ^{137}Cs .

¹В этом случае все короткоживущие радионуклиды с периодом полураспада порядка 1 дня не вносят заметного вклада в интегральную оценку выброса.

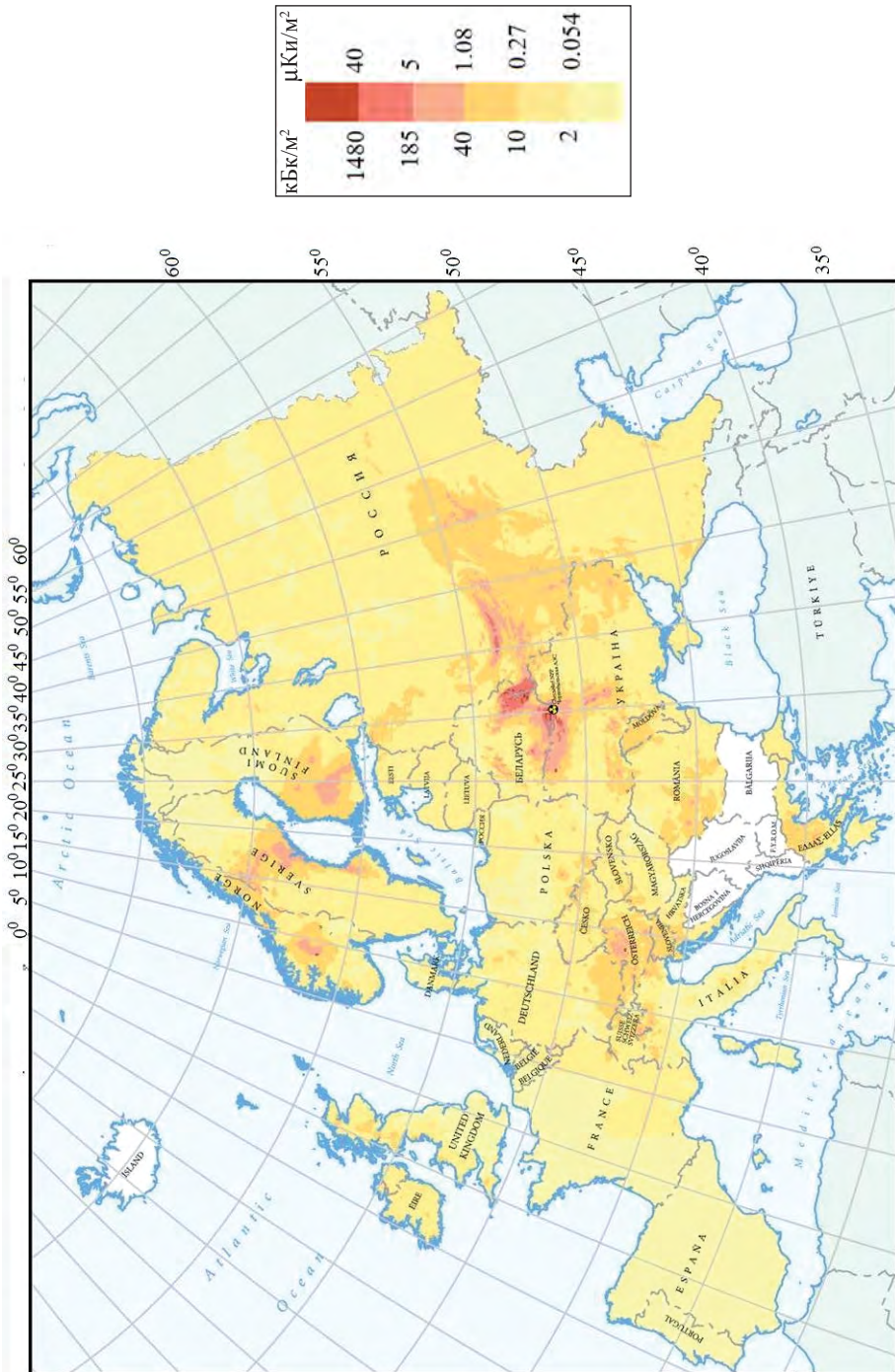


Рис. 2. Европейская карта загрязнения цезием-137 (Чернобыльское + глобальное)

Видно, какие огромные территории затронула авария на ЧАЭС.

Локализация и ликвидация последствий аварии потребовали напряженной, часто поистине героической работы сотен тысяч гражданских и военных специалистов.

Для сопровождения этих работ были привлечены сотрудники десятков научных учреждений страны. От них требовалось в кратчайшее время и с максимальной эффективностью решать задачи, многие из которых не имели ранее даже далеких аналогов.

Часто возникавшие проблемы вызывали необходимость проведения совместных «мозговых штурмов» инженеров и научных работников самых разных, иногда очень далеких друг от друга специальностей. В ходе таких «штурмов» были предложены многие новые научно-технические методы и средства, позволившие в дальнейшем выполнить необходимые работы по ЛПА.

Как известно, особо масштабные работы, включающие создание объекта «Укрытие», закрывшего разрушенный блок и практически предотвратившего дальнейший выход радиоактивности в окружающую среду, пуск 1-го и 2-го, а позднее и 3-го блока Чернобыльской АЭС, были окончены в 1986–87 гг. Однако оставалось еще много незавершенных дел, как на самой площадке станции, так и на загрязненных территориях.

Что касается «Укрытия», то в первую очередь было необходимо определить степень опасности, которую представляло ядерное топливо и радиоактивные материалы, находившиеся в нем, создать систему мониторинга ТСМ, а также выполнить целый ряд проектных, строительных и монтажных работ по укреплению внутренних конструкций объекта. Для решения этих задач (а также целого ряда задач в чернобыльской зоне) в конце 1987 г. в Чернобыле была создана комплексная экспедиция при Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (КЭ)². В наиболее напряженный период работ ее численный состав превышал 3000 человек. Стратегию и тактику проводимых работ определял Научный отдел (до 100 человек). В нем были собраны сотрудники ведущих научно-исследовательских институтов Минсредмаша СССР, НИИ Украины и Беларуси (см. [3]).

К 1989 г. стало очевидным, что существующий объект «Укрытие» не может гарантировать ядерную и радиационную безопасность при экстремальных природных воздействиях (землетрясение, ураган). Поэтому специалисты «Курчатовского института» вышли с предложением о преобразовании «Укрытия» в экологически безопасное состояние [4]. Предлагалось возвести над существующим объектом герметичное и прочное сооружение — новый безопасный конфаймент (НБК) или «Укрытие-2», которое могло бы простоять многие десятилетия. А со временем создать технологии и под защитой НБК разобрать разрушенный блок, вывезти и захоронить топливо.

²Основными задачами КЭ были определены следующие.

1. Проведение НИР по обеспечению безопасного состояния объекта «Укрытие».
2. Изучение радиационной обстановки в зоне ЧАЭС и контролируемой зоне.
3. Выполнение конструкторских и проектных работ в обеспечение программы исследований.
4. Выполнение строительно-монтажных работ в обеспечение научных исследований, возложенных на КЭ.

И ряд других задач.

Работа КЭ продолжалась до 1992 г., когда чернобыльская зона перешла под юрисдикцию Украины.

При этом встал вопрос о приемнике КЭ и о продолжении работы российских специалистов на объекте «Укрытие» и ЧАЭС. После обсуждения этого вопроса дирекция «Курчатовского института» совместно с Президиумом Национальной Академии Наук Украины выдвинули предложение о создании в Чернобыле научного центра, в который ежегодно командировались бы сотрудники «Курчатовского института» (и ряда других научных учреждений России) для работы, связанной с безопасностью объекта «Укрытие».

Такой центр был создан (Постановление Кабинета Министров Украины от 4 февраля 1992 г.) на базе КЭ и получил название Межотраслевого Научно-технического Центра «Укрытие» (МНТЦ) при НАНУ. Основной его задачей стало проведение научных и проектных работ по преобразованию «Укрытия» в экологически безопасную систему.

«Курчатовский институт» принял на себя научное руководство Отделением ядерной и радиационной безопасности (ОЯРБ) МНТЦ [3] и продолжил свою деятельность по текущей безопасности «Укрытия» и по подготовке к его преобразованию.

Уже после первых эскизных проработок НБК, а особенно после проведения международного конкурса на его проектирование, стало ясно, что преобразование «Укрытия» — очень дорогое мероприятие и потребует международной помощи.

Понадобились масса усилий и значительное время, прежде чем Правительству Украины удалось договориться о создании международного «Чернобыльского фонда». Для этого международной группой в 1996–97 гг. на основе предыдущих исследований русских и украинских специалистов был разработан Shelter Implementation Plan — План проведения работ на объекте «Укрытие» (SIP). 1998 г. можно считать началом его реализации.

Сейчас работы по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасное состояние продолжаются на Чернобыльской АЭС при финансовой, технической и организационной помощи всего международного сообщества, в том числе и России.

Как уже говорилось, почти каждый шаг в многолетней эпопее ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, обеспечении безопасности объекта «Укрытие» и при подготовке его преобразования требовал поиска нестандартных научно-технических решений.

В результате коллективом инженеров и ученых, работающих в «Курчатовском институте», других НИИ России и Украины, был накоплен уникальный опыт.

Он ценен не только для использования в случае крупных аварий.

Многие из найденных решений, созданных методик и приборов могут быть использованы для предотвращения и минимизации последствий даже относительно небольших по масштабам инцидентов в области ядерной энергетики и промышленности.

Все эти годы в «Курчатовском институте» велась работа по сбору, структурированию, сохранению и предоставлению пользователям информации, накопленной в ходе ЛПА на ЧАЭС в 1986–2010 гг. Были выпущены многочисленные публикации по этой теме (см., например, [3, 5–16]), однако они далеко не исчерпали всего накопленного материала.

В конце 2010 г. в «Курчатовском институте» было решено написать монографию, аккумулирующую опыт работ на ЧАЭС в области научно-технических методов, применявшихся при ЛПА (в основном на объекте «Укрытие»), включающую и часть уже опубликованных материалов.

Никто не мог предположить, что буквально через несколько месяцев произойдет новая крупнейшая радиационная катастрофа.

11 марта 2011 г. в результате землетрясения на японской АЭС Фукусима Дай-ичи (Ф1) произошла авария, характер и последствия которой позволили сравнивать ее масштабы с чернобыльской и даже присвоить ей 7-й уровень по шкале INES³.

Землетрясение и удар цунами вывели из строя внешние средства электроснабжения и резервные дизельные электрогенераторы. Это стало причиной неработоспособности всех систем нормального и аварийного охлаждения и в конечном итоге привело к расплавлению активной зоны ряда реакторов, взрывам водорода и разрушению 1–4 блоков.

Исходные события и характер аварий для Чернобыльской АЭС и для Ф1 были различны.

Если в первом случае имела место так называемая «реактивная авария», первопричиной которой стал разгон реактора на мгновенных нейтронах, то вторая была вызвана потерей охлаждения и перегревом ТВЭЛ-ов.

События, произошедшие в дальнейшем, также отличались. В Чернобыле после взрывов, которые за несколько секунд полностью разрушили реактор и сам блок, в течение 10 дней продолжался выброс радиоактивности.

На Ф1 опасность нарастала постепенно. В течение первых 4 дней (с 11 по 15 марта) один за другим развивались аварии на 4-х блоках, сопровождающиеся взрывами и выбросом летучих радиоактивных элементов (см. рис. 3).

Тем не менее многие проблемы, вставшие перед теми, кто работал над локализацией и ликвидацией последствий аварии на Ф1, оказались схожи с чернобыльскими проблемами как 25-летней давности, так и возникавшими в последующие годы.

Среди этих проблем — очистка территории от радиоактивных завалов, обращение с огромными объемами радиоактивной почвы и воды, проведение разведки в разрушенных и загрязненных радиоактивностью помещениях, дезактивация блоков, создание системы мониторинга скоплений ядерного топлива и еще десятки и десятки проблем.

К сожалению, почти сразу обнаружилось, что «опыт Чернобыля» был практически не известен государственным органам, управляющей компании и персоналу, работающему непосредственно на площадке Ф1. Это признал президент японского агентства по атомной энергии (JAEA) Ацуюки Судзуки, который на заседании группы INSAG в ходе генеральной конференции МАГАТЭ в Вене заявил о том, что Япония не отнеслась с нужной серьезностью к изучению аварий на ТМ1-2 и Чернобыльской АЭС.

³Шкала INES (International Nuclear Event Scale) разработана Международным агентством по атомной энергии в 1988 году и с 1990 года используется в целях единообразия оценки чрезвычайных случаев, связанных с аварийными радиационными выбросами в окружающую среду на атомных станциях.

Авария 7-го уровня характеризуется большим выбросом радиоактивности в окружающую среду (радиологический эквивалент более нескольких десятков тысяч ТБк I-131): тяжелые последствия для здоровья населения и для окружающей среды.

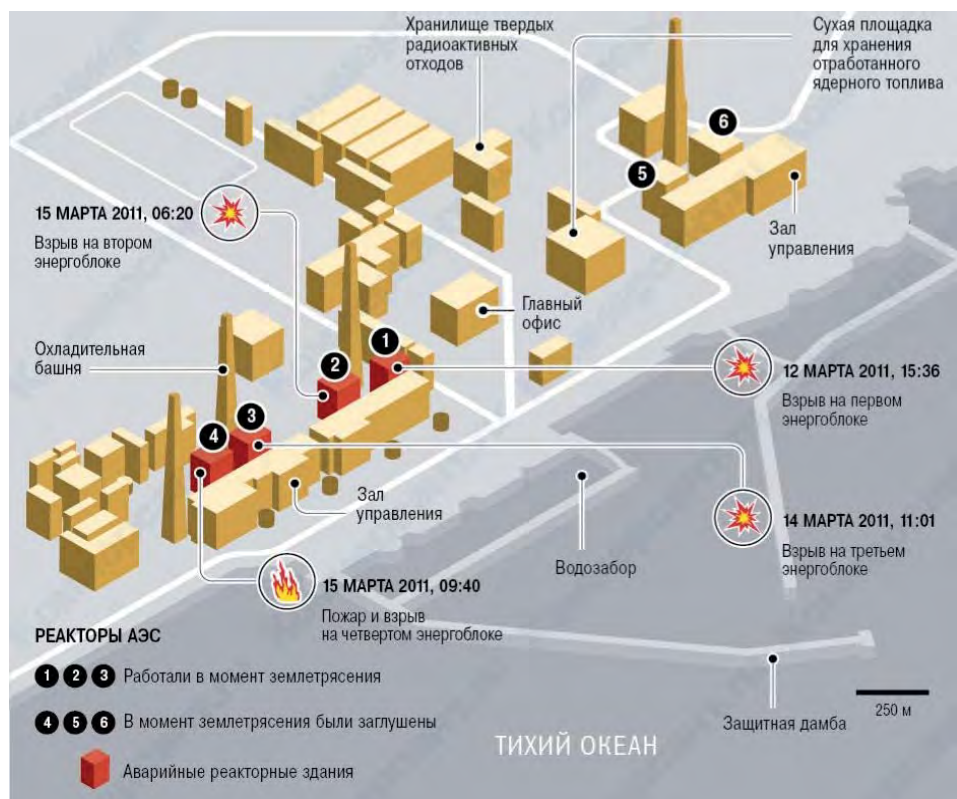


Рис. 3. Состояние энергоблоков АЭС Фукусима Дай-ичи после аварии. На рис. указаны причины разрушения блоков и время, когда это произошло

По оценкам японских специалистов, работы по ликвидации последствий аварии на Ф1 продлятся несколько десятилетий.

В свете произошедших событий предлагаемая работа по сбору и обобщению научно-технического опыта, накопленного в «Курчатовском институте» по ЛПА на ЧАЭС, приобретает дополнительную актуальность.

В виду большого объема материала его было решено разделить на несколько частей. Но и при таком подходе книга смогла включить в себя описание только наиболее интересных (с точки зрения авторов) исследований, которые выполнялись при участии «Курчатовского института».

ЛИТЕРАТУРА

1. USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy. The Accident at the Chernobyl NPP and its Consequences. IAEA Post Accident Review Meeting, Vienna, 25–29 August 1986.
2. Боровой А.А., Гагаринский А.Ю. Выброс радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС. – Атомная энергия, 2001, т. 90, вып. 2, с. 137–145.
3. А.А. Боровой, Е.П. Велихов. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварии. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2011. – 129 с.

4. Беляев С.Т., Боровой А.А. О преобразовании объекта «Укрытие». Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова. Инв. № 57-05/110 от 29.09.89 г. — 5 с.
5. Абалин С.С., Беляев С.Т., Боровой А.А. и др. Диагностические исследования аварийного реактора ЧАЭС. — Атомная энергия, 1990, т. 68, вып. 5, с. 355–359.
6. Borovoi A.A. Analytical Report (Post-Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl). IAEA, Work Material, 1990, p. 1–99.
7. Беляев С.Т., Боровой А.А., Бузулуков Ю.П. и др. Некоторые аспекты послеаварийных работ в контролируемой зоне ЧАЭС. Первая международная рабочая группа по тяжелым авариям и их последствиям. — М., Наука, 1990, с. 131–143.
8. Беляев С.Т., Бондаренко Л.Н., Боровой А.А. и др. Техника и методы изучения нейтронно-физических характеристик топливосодержащих масс 4-го энергоблока ЧАЭС. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова № 5312/3. — М., 1991. 24 с.
9. Borvoi A., Ivanov A., Sich A. Use of robotic technologies and remote systems for diagnostic and research within the Chernobyl Sarcophagus. Proceedings of ANS Fifth Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Knoxville, Tennessee, April 25–30, 1993, p. 211–216.
10. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отчет МНТЦ «Укрытие». Отв. исполнитель Боровой А.А. Инв. № 216 от 06.09.96 г., Чернобыль. 188 с.
11. Borovoi A., Bogatov S. Consequences of Chernobyl; a view ten years on. Advances in Nuclear Science and Technology, Vol. 25, Plenum Press, New York and London, 1997, p. 171–214.
12. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Богатов С.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. и др. Проблемы объекта «Укрытие», Препринт ИБРАЭ № ИВРАЭ-2002-17, М., 2002 г. — 22 с.
13. Боровой А.А. Ядерное топливо в объекте «Укрытие». — Атомная энергия, 2006, т. 100, вып. 4, с. 259–267.
14. 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.
15. Боровой А.А., Перфилов А.В. Использование специальных скважин для исследований на объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. Препринт РНЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6620/3. Москва, 2010. — 33 с.
16. Абалин С.С., Боровой А.А., Перфилов А.В. Роботы на объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6684/3. Москва, 2011. — 44 с.

14. СКОПЛЕНИЯ ВОДЫ В «УКРЫТИИ»¹

14.1. Источники, пути поступления и места скопления воды

14.1.1. Влияние воды на безопасность объекта

В «Анализе...» [1] были перечислены основные виды опасности, которые могли быть связаны с водой, попадающей в «Укрытие» (впоследствии они многократно повторялись в других работах, чаще всего без ссылок на «Анализ...»).

Основные из них три:

- попадая на скопления топливосодержащих материалов, вода может приводить к увеличению эффективного коэффициента размножения нейтронов в системе;
- она может разрушать ТСМ, способствовать неконтролируемому перемещению радиоактивности по помещениям «Укрытия» и выносу радионуклидов за пределы объекта;
- перенося растворенные соли обогащенного урана, вода может увеличивать потенциальную ядерную опасность объекта.

Остановимся на двух последних пунктах.

Водные потоки, образующиеся в помещениях «Укрытия», являются одним из основных факторов разрушения топливосодержащих материалов (см. [2] и раздел 14.3). Взаимодействуя со скоплениями топлива, они уносят с собой как *мелкие частицы* ТСМ, так и образующиеся на их поверхности *растворимые соединения, в том числе и соли урана*.

Впервые появление растворимых соединений урана было замечено в 1990 г., когда в парораспределительном коридоре на поверхности застывших струй лавы разведчики обнаружили ярко-желтые пятна (рис. 1). Как оказалось, это были оксикарбонаты урана, образовавшиеся в результате непосредственного воздействия воды и высокой влажности в помещениях. Процесс, характерный для урановых месторождений [3].

Через несколько лет вся поверхность ЛТСМ в третьем паросбросном клапане оказалась покрыта плотным слоем оксикарбонатов урана. При этом цвет покрытия превратился из ярко-желтого в темно-зеленый.

В дальнейшем похожие пятна появились и на других скоплениях лавы².

Так, в 1995 г. новообразования были обнаружены на стенах помещений, расположенных на отм. +9.000.

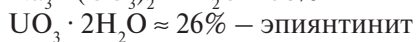
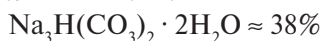
¹Вода во многих помещениях «Укрытия» подпадает под определение жидких радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности. Она содержит ядерные материалы и радиоактивные вещества в количествах, превышающих допустимые концентрации.

²Легкая растворимость продуктов, образующихся при вторичном изменении ТСМ, приводит к тому, что во влажной среде рыжие пятна из-за капиллярного подъема по микротрещинам образуются даже на поверхности заливающего топливосодержащие материалы бетона.

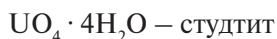


Рис. 1. Желтые пятна новообразований на потоках лавы в парораспределительном коридоре

Микрорентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы позволили определить, что новообразованные продукты разложения ТСМ являются смесью нескольких соединений (см. [1, 2], [4] и ссылки в них). Детальная расшифровка результатов выяснила количественные данные о минеральном составе «желтых пятен»:



Отмечены также:



Относительная погрешность определения составляла 40%.

Валовый анализ выявил среднее содержание урана порядка 13%.

Гамма-спектрометрический анализ показал наличие в желто-рыжих пятнах преимущественно изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs , практическое отсутствие ^{144}Ce , а радиохимическое исследование — практическое отсутствие плутония.

Возвращаясь к опасности воды в помещениях объекта «Укрытие», следует отметить, что она способствует разрушению строительных конструкций.

Кроме этих «непосредственных» воздействий на состояние объекта, вода оказывает и негативное «косвенное» влияние — нарушает нормальную работу диагностических систем, препятствует проведению исследований «Укрытия», превращает в особо опасные (с точки зрения электробезопасности) помещения объекта и т.п.

Что касается окружающей среды, то не исключен выход радиоактивной воды из объекта и загрязнение ею грунтовых вод.

К сказанному выше можно добавить следующее. Протекая через многие, в том числе сильно разрушенные и сильно загрязненные, помещения, потоки воды собираются на нижних отметках «Укрытия» (рис. 2).

В результате они могут содержать важную информацию о недоступных до сих пор контролю скоплениях топлива. Например, в случае приближении системы (ТСМ + вода) к критичности в протекающей через это скопление в воде появятся короткоживущие радионуклиды (^{131}I и др.).



Рис. 2. Скопление воды в южной части ББ-2

Поэтому все прошедшее время важной задачей для обеспечения безопасности «Укрытия» являлось принятие мер по уменьшению количества воды, попадающей в помещения объекта, организация постоянного контроля за местами ее нахождения и физико-химическими свойствами (радионуклидным составом, наличием делящихся веществ, свойствами донных отложений и т.д.) и при необходимости принятие контрмер против возникающей опасности.

14.1.2. Источники поступления воды

В течение лет, прошедших после аварии, относительный вклад различных источников поступления воды в «Укрытие» менялся, но основные из них всегда носили природный характер. Это — атмосферные осадки и конденсат, образующийся из-за разности внутренних температур помещений объекта и окружающего воздуха.

Кроме того, есть и техногенные источники. Они связаны с работами, проводящимися в помещениях объекта и, прежде всего, с системой пылеподавления, которая периодически распыляет под кровлей центрального зала пылеподавляющие составы.

Атмосферные осадки

Попадание атмосферных осадков в помещения «Укрытия» определяется их количеством, площадью внешних конструкций объекта, на которые осадки попадают и, наконец, возможностью воде проникнуть через неплотности в этих конструкциях.

Количество осадков, выпадающих в районе ЧАЭС, хорошо известно. Их среднемесячная норма варьирует от 26 мм в феврале до 78 мм в июле (коэффициенты вариации могут достигать 4), см., например, рис. 3.

Геометрическая площадь конструкций, на которые осадки попадают, также может быть определена достаточно точно (см. рис. 4).

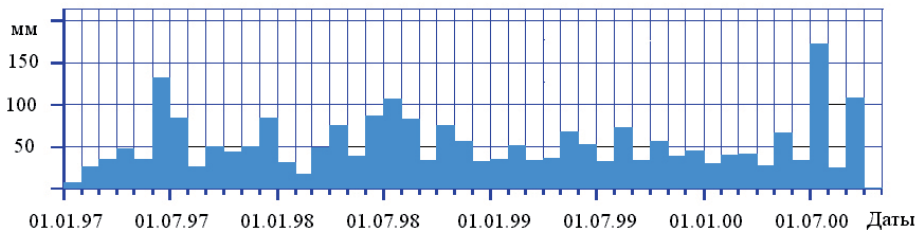


Рис. 3. Количество осадков, выпадавших в районе ЧАЭС (1997–2000 гг.)

Однако «эффективная» площадь водосбора практически всегда меньше. Значительная часть воды стекает по внешним стенам «Укрытия», часть снега сдувается с кровель, происходит испарение влаги с поверхности кровли в летний период и т.п.

Оценки неплотностей конструкций объекта, через которые вода может проникнуть во внутренние помещения, достаточно приблизительны. Поскольку невозможно точно оценить размеры щелей, возникших при сооружении «Укрытия».

Периодически проводились работы по гидроизоляции «Укрытия». Так, в девяностые годы было закрыто большое количество отверстий в кровле машинного зала, деаэрационной этажерки, реакторного блока. Был заделан ряд щелей в наклонных частях кровли, лежащих с севера и юга от трубного наката. Проведена «отмостка» вокруг стен объекта, что позволило снизить количество воды, которая попадала внутрь зданий, стекая по этим стенам.

Однако добиться полной гидроизоляции не удалось.

Вода находила новые пути, просачивалась через оставшиеся щели, и ее поступление существенно не снижалось.

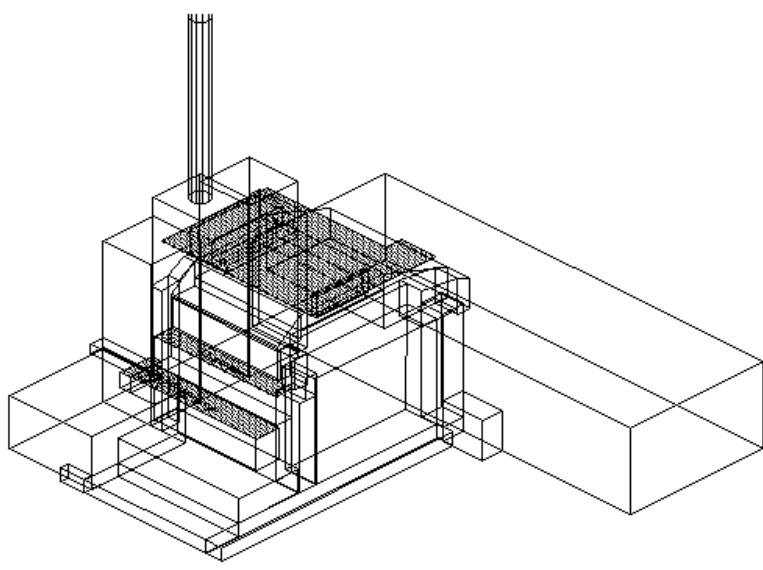


Рис. 4. Схема поверхностей (заштрихованы), с которых может происходить «сбор» воды во внутренние помещения реакторного отделения



Рис. 5. Проемы в северных щитах-ключках в местах их опирания на северную контрфорсную стену (ось 44, отметка +54.500)

Из сказанного выше очевидно, что можно было провести только очень приблизительные оценки объема поступающей снаружи воды — $V_{\text{осад.}}$. Для Блока Б и ВСРО они давали значение от **1600 м³ до 2000 м³** в год (см., например, [1], [5]).

Отметим также, что герметизация кровли объекта привела к увеличению конденсации влаги внутри него, о чем будет рассказано ниже.

В 2004–2008 гг. на «Укрытии» были выполнены масштабные работы по стабилизации его конструкций. В ходе этих работ принимались меры и по дополнительной гидроизоляции объекта.

Например, из-за трудностей, возникавших при строительстве «Укрытия», с его северной стороны щиты — «ключки» — оказались расположенными не вплотную друг к другу, а со смещением. Из-за этого между смежными щитами образовались щели шириной 30–40 см. Через них дождевые и талые воды попадали внутрь объекта. Существовали и открытые проемы в местах опирания этих щитов-«ключков» на северную контрфорсную стену (см. рис. 5).

Поэтому были изготовлены и установлены в зонах соединения специальные «нащельники» и водоотливные козырьки. Была улучшена гидроизоляция на южной стороне и в других местах объекта.

Насколько улучшилась ситуация с проникновением воды внутрь?

Как и раньше, существуют только приблизительные оценки. Согласно некоторым из них, $V_{\text{осад.}}$ составляет от **600 до 800 м³**.³

Тем не менее вода от осадков продолжает составлять основную часть поступающей во внутренние помещения «Укрытия». В этом можно убедиться на примере одного из скоплений воды в помещениях бассейна-барботера (012/13–16). Из графиков на рис. 6 видно, что существует заметная корреляция между выпадением осадков и поступлением основных масс воды на нижние отметки блока [6].

³«В 2008 году завершен проект «Стабилизация нестабильных конструкций объекта «Укрытие», в ходе которого был выполнен ремонт легкой кровли: более 600 квадратных метров металлического профиля, уложенного в 1986 году, было заменено. В объект «Укрытие» фактически предотвращено попадание воды — по некоторым оценкам, ее от 600 до 800 кубов в год» (см. <http://nuclearno.ru/text.asp?14389>).

Конденсационная вода

Весной – летом 1993 г. сотрудники МНТЦ и ЧАЭС стали отмечать повышение влажности и заметное увеличение скоплений воды в целом ряде помещений «Укрытия».

Проведенные ОЯРБ исследования позволили установить причину этого явления [7, 8].

Она заключалась в образовании большого количества конденсационной воды ($V_{\text{конд.}}$).

Объект обладал очень большой тепловой инерцией, температура в его помещениях весной и летом сохранялась заметно меньшей, чем снаружи. Попадая в «Укрытие», воздух охлаждался и отдавал часть влаги.

Осенью и зимой происходил обратный процесс – испарения воды из внутренних помещений.

Почему это явление было замечено только в 1993 г.?

Это можно объяснить, прежде всего, изменениями, произошедшими на самом объекте.

К ним можно отнести:

- охлаждение «Укрытия» за счет уменьшения тепловыделения топлива и техногенных источников тепла;
- перекрытие внутренних проходов, мешающее быстрому воздухообмену – проветриванию;
- герметизацию кровли (по той же причине);
- жаркое и сухое лето предыдущего 1992 г. могло замаскировать ряд причин, способствующих увеличению роли конденсационной воды, поэтому столь неожиданным было ее появление в 1993 г.

Специалисты КИ и МНТЦ сразу же предложили целый ряд мер по уменьшению $V_{\text{конд.}}$ [8].

Они включали в себя установку калориферов для обогрева помещений, регулировку воздушных потоков, несущих водяные пары и т.п.

Постепенная реализация этих предложений обеспечила заметное снижение $V_{\text{конд.}}$.

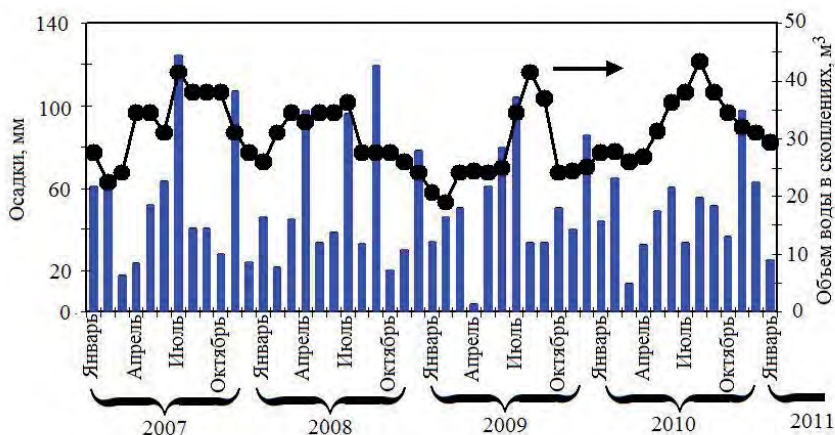


Рис. 6. Выпавшие осадки и объем скоплений воды в пом. (012/13–16)

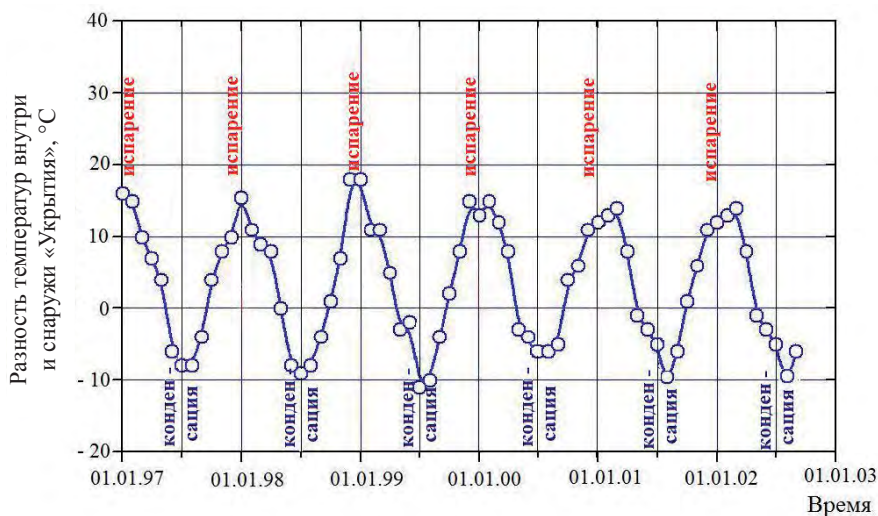


Рис. 7. Периоды испарения и конденсации воды в «Укрытии» в 1997–2002 гг.

Тем не менее в дальнейшем появление значительного количества конденсационной воды отмечалось ежегодно. Периодичность этого явления проиллюстрирована на рис. 7 для шестилетнего периода (1997–2002 гг.).

Если в расчетах по определению $V_{\text{осад.}}$ существуют большие погрешности, то еще большая неопределенность присутствует в оценках $V_{\text{конд.}}$.

В настоящее время считается, что с апреля по октябрь в результате конденсации в Блоке Б и ВСРО может образоваться до **340 м³** влаги.

В период с октября по апрель происходит испарение влаги из объекта. Оценки $V_{\text{исп.}}$ за этот период дают значение **~380 м³** влаги. Таким образом, объем воды испаряющейся из объекта немного превышает ее поступление от процесса конденсации.

Вода от системы пылеподавления

До настоящего времени основным источником поступления техногенных растворов в помещения «Укрытия» является система пылеподавления, расположенная под кровлей объекта (см. раздел 12.2). На рис. 8 приведены данные о годовых объемах составов, поступавших в подкровельное пространство «Укрытия» в 2000–2010 гг. при проведении сеансов пылеподавления.



Рис. 8. Годовые объемы составов, поступавших в подкровельное пространство «Укрытия» в 2000–2010 гг. при проведении сеансов пылеподавления

Рассматривая все перечисленные выше источники поступления воды в «Укрытие», можно сделать вывод, что ежегодно сотни ее кубометров должны либо накапливаться в объекте, либо какими-то путями его покидать.

14.1.3. Пути распространения, места скопления воды и ее выхода из «Укрытия»

Пути распространения воды

Путями, по которым вода распространяется по объекту, являются частич-но разрушенные трубопроводы, пробуренные скважины, трубные и кабель-ные проходки, люки, трещины и щели в межэтажных перекрытиях и т.п.

Систематическое изучение этих путей в помещениях реакторного отде-ления началось в 90-е годы. Сначала источниками информации служили визу-альные наблюдения, замеры, проводимые в местах расположения скоплений воды, отбираемые пробы. Позже стали использоваться специальные трассеры (индикаторы).

В результате обследования помещений в 1991–1993 гг. (доступных по до-зовым нагрузкам) было выяснено, что постоянные скопления воды в основ-ном образуются на отметках ниже +12.50. На более высоких отметках (до +39.50) могут образовываться временные небольшие скопления объемами меньше 50 л.

Помещения, содержащие большие количества воды, были взяты под на-блюдение, в них выбраны постоянные точки отбора проб («т.о»)⁴.

В результате многолетних наблюдений была составлена схема потоков воды в «Укрытии», представленная на рис. 9. На этом же рисунке приведены данные об объемах воды в наиболее крупных скоплениях на декабрь 2010 г.

Номера помещений и точек отбора проб в них даны в таблице 1.

Таблица 1. Номера помещений и точек отбора проб воды в этих помещениях (2010 г.)

№ точки отбора	6	8*	10	13	14	17	18	20
№ помещения	012/16	01/3	318/2	061/2	406/2	014/2	017/2	01/3**
№ точки отбора	21	30	31	32	35	36	37	
№ помещения	012/13	001/3	012/5	012/7	012/8	061/2	207/5	

*Скважина 2.1.116 из каскадной стены.

**Труба из ПРК.

Скопления воды

Для определения параметров скоплений воды производились измерения их глубины и оценка площади. Кроме того, описывались внешние характери-стики воды, наличие донных отложений, и оценивался объем последних.

Данные о координатах, геометрических параметрах и объемах основных скоплений воды в «Укрытии» собраны в таблице 2 (см. [6]).

⁴Следует сказать, что за прошедшие годы в регламенте отбора проб происходили изменения. Ряд точек был исключен из него из-за постоянного отсутствия в них воды, ряд стал практически недоступен по соображениям радиационной безопасности.

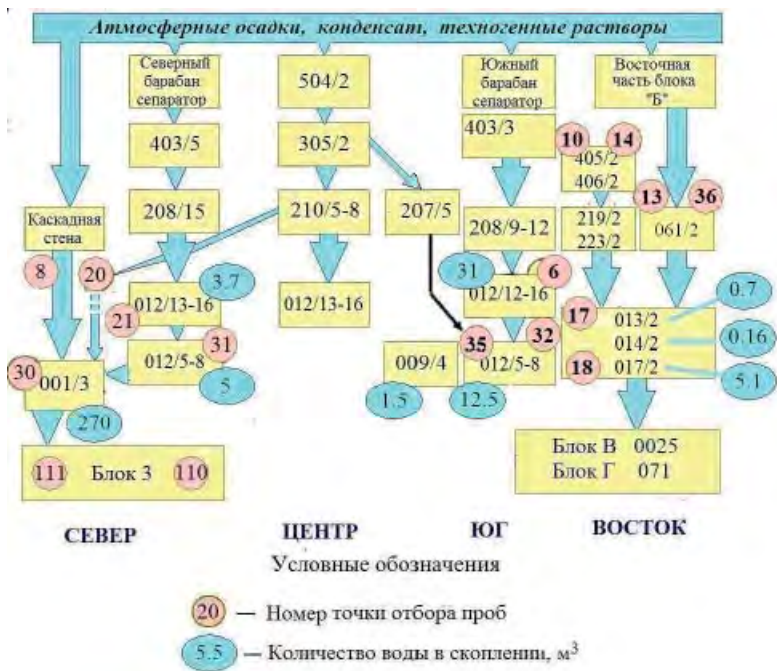


Рис. 9. Схема потоков воды в «Укрытии»

Таблица 2. Координаты и объемы основных скоплений воды в «Укрытии» (декабрь 2010 г.)

Помещение	Отметка	Ось	Ряд	Площадь, м²	Глубина, см	Объем, м³
012/5-8,	−0,65	45–49	Г-Ж	346	3–7	12,5
012/5-8	−0,65	45–49	П-Т	342	1,5–2	5,1
012/6-8*	−0,94	46–49	С-Т	2	20	4,2
009/4	−0,65	49–50	Ж-И	15	10	1,5
012/13-16	+2,20	45–49	Г-Ж	346	9	31
012/13-16	+2,20	45–49	П-Т	118	2–4	3,7
013/2	0,00	44–45	Г-Е	20	3,5	0,7
014/2	0,00	44–45	Ж-И	8	2	0,16
017/2	0,00	43–44	Г-Е	18	28	5,1
018/2	0,00	42–43	Г-И	25	0,5	0,13
061/2	+6,00	41–42	Е-Ж	30	10	3
001/3	−2,60	41–51	У-У1	250	107	270

*Прямки в помещениях 012/6–8.

Уровни и объемы воды в скоплениях колеблются в достаточно широких пределах, поскольку в значительной мере зависят от сезона и количества выпавших атмосферных осадков.

Например, в помещениях 012/13–16 2-го этажа бассейна-барботера (южное скопление) объем воды в период весна–осень в последние годы (2007–2011) увеличивался от 20–25 до 35–45 м³. Затем происходил обратный процесс [6].



Рис. 10. Первый этаж бассейна-барбертера. Отмечено расположение скоплений воды, их глубина и точки отбора проб (красным цветом)

Суммарный объем воды (ЖРО) в контролируемых помещениях, по оценкам [6], составлял (в среднем) в 2007 г. — 331, 2008 — 322, 2009 — 318 и 2010 — 337 м³, т.е. за последние четыре года эти объемы практически оставались постоянными.

На рис. 10 и 11 [1] показаны места скоплений воды в помещениях ББ1 и ББ2 и точки отбора проб.

Для наглядности использованы данные измерений 12–13 июля 2000 г., когда после прохождения ливневых дождей увеличились даже небольшие прежде скопления⁵.

⁵По данным Чернобыльской метеостанции, в первой половине июля было отмечено anomальное выпадение атмосферных осадков. Их суммарное количество за период 01–13 июля составило 112,2 мм. Только за 10 июля осадки превысили среднесуточную норму за период март–июнь в 44 раза. В результате вода обнаружилась в 11 помещениях, где она за последние полгода не наблюдалась. Многократно увеличились и потоки воды в точках пробоотбора.

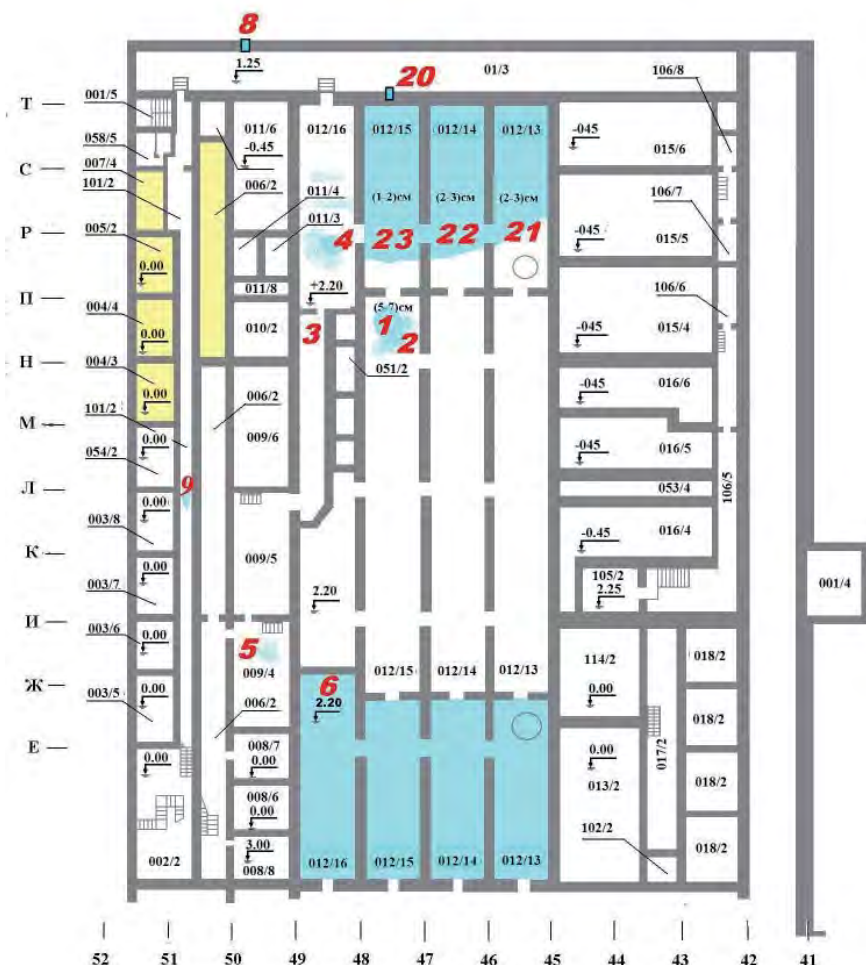


Рис. 11. Второй этаж бассейна-барботера. Отмечено расположение скоплений воды, их глубина и точки отбора проб (красным цветом)

Выход воды из «Укрытия»

Наблюдения и исследования показали, что основная часть воды из «Укрытия» заканчивает свой путь по реакторному отделению в пом. 001/3 ВСРО (см. рис. 9 и 12).

Если обратиться к схеме на рис. 9, то видно, что вода попадает в это помещение двумя **контролируемыми** путями. Это – труба, идущая из ПРК (т.о. 20), и скважина, пробуренная в каскадной стене (т.о. 8).

Кроме того, часть воды попадает в него **неконтролируемым** образом. Например, она может проходить через проходки в стене, разделяющей пом. 012/5–8 и пом. 001/3 (рис. 9, т.о. 31).

Указания на это были получены в экспериментах с трассером – бромидом натрия⁶ (см., например, [9, 10]).

⁶Бромид-ион практически не сорбируется бетоном и другими конструкционными материалами, находящимися внутри объекта «Укрытие».



Рис. 12. Расположение пом. 001/3 ВСРО и скопление воды в нем. Указаны строительные отметки для каскадной стены и пом. 0.01/3

Существует и достаточно сложный путь, на существование которого также указывают эксперименты с трассером, проведенные в ИПБ АЭС (см., например, [11]).

Этот путь предполагает, что вода из пом. 017/2 (рис. 8, т.о. 18) через дверные проемы попадает в пом. 018/2 (а также в пом. 025/2 → пом. 0025 → пом. 071).

В пом. 018/2, согласно проектной документации, находится сливное отверстие системы сбора трапных вод. По этой системе вода поступает в коллекторный трубопровод, находящийся в пом. 001/3 (т. 30), а из него — в само помещение 001/3.

Для доказательства этого в водное скопление в пом. 017/2 (т. о.18) был введен бромид натрия в количестве 10 кг. Дальнейшие наблюдения показали, что концентрация бромид стала нарастать в водном скоплении пом. 001/3. На рис. 13 [11] представлена динамика изменения концентрации трассера в помещениях 017/2 и пом. 001/3.

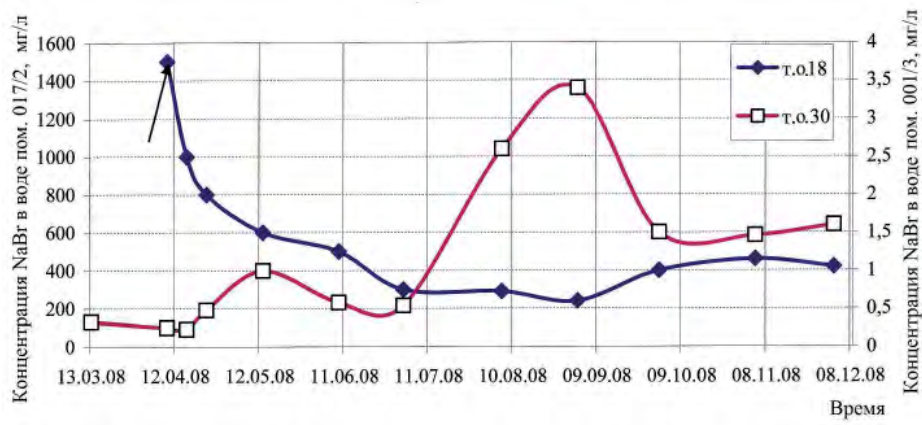


Рис. 13. Динамика концентрации бромид натрия в пом. 017/2 и пом. 001/3

Вот что говорится в работе [11].

«Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в пом. 001/3 ВСПО поступает не только большая часть водных протечек из северной и центральной части блока Б, но и часть южного водопотока. Это перетекание осуществляется через систему трапных вод в коллекторные трубопроводы, расположенные в пом. 001/3. Выход воды из трубопроводов в само помещение происходит, вероятно, по причине нарушения герметичности этих коллекторов.

Таким образом, задача удаления скоплений ЖРО на нижних отметках объекта «Укрытие» в основном сводится к организации «откачки блочной воды» из пом. 001/3».

На то, что такая, самостоятельно регулируемая, «откачка» происходит, указывает тот факт, что уровень воды в пом. 001/3 в течение всего времени наблюдения остается практически постоянным.

Куда же уходит поступающая в него вода?

Оставалось предположить, что она перетекает на третий блок.

Эту гипотезу подтвердили эксперименты с трассерами (йодистым калием и бромидом натрия).

После их появления в скоплении воды в пом. 001/3 (т.о. 30) трассеры были обнаружены в водном потоке в помещениях ВСПО 3-го блока — недалеко от разделительной стены и в приямке, в котором собираются все организованные (и частично организованные) протечки из помещений ВСПО (пом. 0005).

Позднее это удалось непосредственно наблюдать.

Как говорилось выше, в июле 2000 г. многие помещения 3-го блока ЧАЭС и объекта «Укрытие» оказались подтопленными из-за выпавших аномально интенсивных атмосферных осадков. В результате произошло аварийное отключение 3-го энергоблока.

В ходе мероприятий по устранению подтопления обследовался район разделительной стены и приямка для сбора частично организованных протечек на отметке — 6,000 м в пом. 0005 ВСПО 3-го блока ЧАЭС.

Обследование показало, что существует поток воды из «Укрытия» через разделительную стену в помещения 3-го блока (рис. 14, 15).

Итак, вода перетекает через разделительную стену из пом. 001/3 «Укрытия» в → помещение 001/3 ВСПО блока № 3 (отметка — 2,600) → помещение 0005 ВСПО блока № 3 (отметка — 6,000), где и накапливается в приямке. По мере заполнения приямка воду откачивают для переработки в химическом цехе.

Водный баланс в пом. 001/3 за 2005—2009 гг. приведен в таблице 3 (см. [12]).

Таблица 3. Поступление и расход воды в пом. 001/3 (среднее за 2005—2009 гг.)

Поступление, м ³ /год		Расход, м ³ /год	
Контролируемый источник	Измеренное значение	Направление утечки	Измеренное значение
Труба из ПРК (т.о. 20)	3	Система сбора трапных вод в помещениях ВСПО 3-го энергоблока	740 ± 160 [13] 880 ± 210 [14]
Скважина в каскадной стене (т.о. 8)	105		
Сумма	108		



Рис. 14. Поток воды, протекающий из под разделительной стены в помещения 3-го блока



Рис. 15. В пом. 001/3 ВСПО 3-го блока

Следует отметить, что данные прямых измерений количества воды, протекающей из пом. 001/3 объекта «Укрытие» в помещения ВСПО 3-го энергоблока, оставались в пределах (700–950) м³/год и в другие годы.

Например: 1998 г. – 840 м³/год, 2001 г. – 950 м³/год и т.п.

Из таблицы следует, что основное количество воды (~85%) поступает из неконтролируемых источников.

Есть ли еще какие-либо пути, по которым вода вытекает из помещений «Укрытия», попадает ли она в грунт и в грунтовые воды? Эти вопросы будут рассмотрены в следующей Главе, описывающей локальную зону объекта.

14.2. Радиационная и ядерная безопасность скоплений воды в «Укрытии»

14.2.1. Химический и радионуклидный состав скоплений воды

Отбор проб и их анализ

Систематический отбор проб воды из помещений «Укрытия» и исследование их радионуклидного состава проводятся с 1991 г.

Для выявления взаимосвязи между макрoхимическими компонентами и отдельными радионуклидами, а также с целью изучения механизма процесса взаимодействия воды с ТСМ и конструкционными материалами с 1995 г. начаты систематические исследования химического и элементного состава воды из объекта.

Сложившаяся еще в КЭ процедура отбора проб выглядела следующим образом.

Отбор проводился в специальные емкости с периодичностью, установленной программами работ. Пробы отбирали из поверхностного слоя скоплений воды без перемешивания (рис. 16). Вода, поступающая из скважин, отбиралась непосредственно с протока (рис. 17). Общее количество отобранных проб воды из помещений объекта «Укрытие» составляло 100÷150 за год.



Рис. 16. Отбор пробы из скопления воды на объекте «Укрытие»



Рис. 17. Отбор пробы воды на объекте «Укрытие»

После этого пробы транспортировались в лабораторию. В лаборатории в процессе предварительной подготовки пробы «блочных» вод отстаивали определенное время для выделения быстрооседающей грубодисперсной твердой фазы.

Осветленную воду отфильтровывали через бумажный фильтр средней проницаемости для получения фракции осадка с размером частиц не менее 3 мкм, а затем — через капроновый фильтр с размером пор 0,2 мкм.

После этого вода проходила соответствующие процедуры радиохимических, спектрометрических и других видов анализа (см. Часть 1, Глава 5). В лаборатории в каждой из проб определялось не менее 6 параметров (среди них — активность ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , суммарного Pu, содержание U, Gd, В и величина pH).

Методика изучения донных отложений включала определение содержания твердой фазы в пробах воды из основных водных массивов внутри объекта «Укрытие» и распределения радионуклидов и делящихся элементов на частицах твердой фазы различной дисперсности. Для исследования фазового распределения использовали метод последовательного фильтрования пробы воды с частицами твердой фазы через набор фильтров с размером пор 82 мкм, 10 мкм и 0,2 мкм. Полученные фракции высушивали до воздушно-сухого состояния, взвешивали и растворяли в азотной кислоте с концентрацией 7 моль/л.

Определение радионуклидов и делящихся элементов в этих растворах проводили по стандартным методикам, химический выход контролировали по результатам гамма-спектрометрического определения ^{137}Cs в осадке на фильтре и в растворе.

Химический состав «блочной воды»

Знание химического состава воды, находящейся в помещениях «Укрытия», важно, прежде всего, для понимания степени ее воздействия на топливосодержащие материалы.

Об этом уже говорилось в начале этой главы.

Химический состав во многом определяет и другие виды опасности, которые несет «блочная вода». Например, скорость разрушения строительных конструкций, находящихся в контакте с ней.

В то же время если вода содержит соли бора или гадолиния, то это положительно сказывается на ядерной безопасности «Укрытия».

Исследования показали, что химический состав «блочных вод» формируется в основном в результате их взаимодействия с конструкционным и «свежим» бетоном. В объекте сосредоточены сотни тысяч тонн бетона и бетонных конструкций, содержащих соли калия, натрия, кальция, железа, кремния, карбонаты и другие компоненты. В результате контакта воды с этими соединениями она частично их растворяет⁷.

Значительная часть воды от природных осадков проходит через завалы материалов, сброшенных с вертолетов во время активной стадии аварии и после нее. Эти материалы также дают свой вклад в формирование химического состава «блочных вод».

Источником органических соединений в воде служат пылеподавляющие растворы, в состав которых эти соединения входят⁸.

Концентрация химических соединений в воде зависит от общего количества воды, поступающей в объект, от пути ее распространения до точки отбора, температуры и ряда других факторов.

Для примера в таблицах 4 и 5 приводятся усредненные данные по измерениям, сделанным в 1998–99 гг. [1].

Таблица 4. Химический состав воды из ряда помещений объекта «Укрытие»

Номер точки отбора*	Концентрация компонента, мг/л				pH
	CO_3^{2-}	HCO_3^-	HPO_4^-	U	
6	90	570	4	20	8,8
7	510	2700	30	0.55	9,0
20	210	230	4	0.31	9,6
30	150	410	3	3.0	9,1
32	210	750	4	23	9,0

*См. рис. 9–11.

⁷То, что химический состав блочных вод в основном определяется взаимодействием воды с конструкционным и пластифицированным бетоном, подтверждается и лабораторными экспериментами по взаимодействию воды с образцами бетона из «Укрытия» [13]. Эти эксперименты показали, что даже в статических условиях концентрации карбонат-ионов, бикарбонат-ионов и pH достигают значений, характерных для блочных вод при времени контакта от 5 до 30 сут.

⁸В составе пылеподавляющих растворов отсутствуют неорганические соединения, определяющие макрокомпонентный состав «блочных» вод.

Таблица 5. Концентрации металлов в блочных водах

Номер точки отбора*	Концентрация элемента, мг/л				
	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
6	0,90	0,04	н/о	0,42	0,20
7	3,0	0,07	0,10	0,21	0,30
20	0,42	0,06	0,25	0,20	0,04
30	0,57	0,04	0,03	0,19	0,06
32	1,4	0,35	0,05	1,05	0,30

*См. рис. 9–11.

Все пробы представляют собой щелочные растворы ($pH = 8.5 \div 10$) с высокой концентрацией карбонат и бикарбонат ионов, которые и определяют величину pH.

Знание химического состава «блочной воды» позволило экспериментально определить, насколько быстро она, находясь в контакте с ТСМ, разрушает эти материалы.

Мы приведем некоторые данные, полученные при изучении растворимости ЛТСМ в имитаторе «блочной» воды (ИБВ) [14] (рис. 18).

В качестве имитатора был приготовлен раствор, соответствующий по своим компонентам средним значениям реальных проб воды из ее скоплений в объекте «Укрытие».



Рис. 18. Общий вид лаборатории в помещении 061/2 «Укрытия», оборудованном для проведения экспериментов по выщелачиванию ЛТСМ



Рис. 19. Схема проведения экспериментов с имитатором блочной воды

Для упрощения проведения радиохимического анализа реагенты, входящие в состав пылеподавляющего раствора, в ИБВ не добавлялись. Свежеприготовленный раствор имел щелочную среду с $\text{pH} = 9,3$. Схема эксперимента представлена на рис. 19.

Выщелачивание радионуклидов из образцов ЛТСМ раствором ИБВ проводили в статических условиях при комнатной температуре.

Образцы выдерживались в кассетах объемом 250 мл (рис. 20), в которые заливали по 100 мл выщелачивающего раствора.

Полное время экспозиции составляло 89 дней.

Через заданные промежутки времени отбирали аликвоты растворов по 20 мл и добавляли аналогичный объем свежего раствора. В отобранных аликвотах определяли содержание ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am ⁹.

Скорость выщелачивания ЛТСМ – L рассчитывалась по формуле:

$$L = (A \times W) / (C \times t \times S) \text{ г}/(\text{м}^2 \times \text{сут.}),$$

где: A – масса или активность компонента в растворе; C – масса или активность компонента в образце; W – масса образца (г); t – время выщелачивания (сут.); S – площадь поверхности образца (м^2).

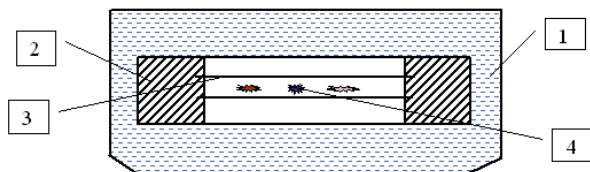


Рис. 20. Кассета для проведения выщелачивания радионуклидов из образцов ЛТСМ в статических условиях. Обозначения: 1 – сосуд с выщелачивающим раствором, 2 – корпус кассеты, 3 – мембранные фильтры, 4 – фрагменты ЛТСМ

⁹При обработке данных учитывался и такой процесс, как оседание (сорбция) радионуклидов на стенках сосудов.

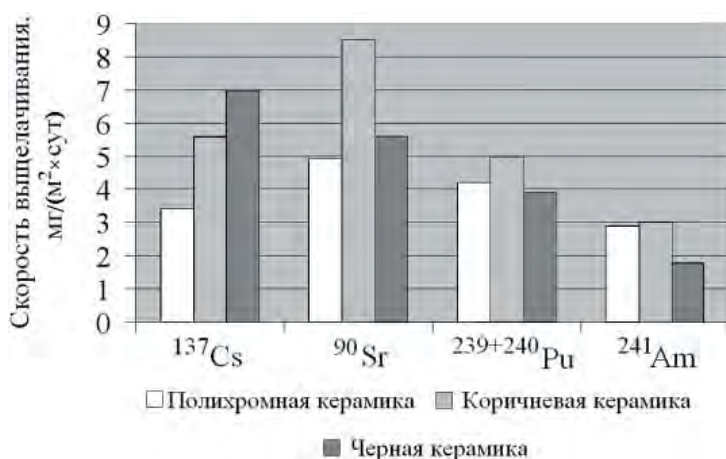


Рис. 21. Скорость выщелачивания (L) образцов ЛТСМ в ИБВ

При расчетах площади поверхности образцов предполагали, что пробы ЛТСМ имеют сферическую форму.

Результаты определения скорости растворения образцов ЛТСМ представлены на диаграмме, рис. 21.

Из приведенной диаграммы видно, что переход активности ЛТСМ в «блочную воду» происходит, но процесс этот очень медленный.

В работе [14] также говорится, что солевой состав «блочных вод» существенно не влияет на скорость растворения в них ЛТСМ по сравнению с чистой водой¹⁰.

Радионуклидный состав «блочной воды»

Протекая по помещениям «Укрытия», вода контактирует с материалами, поверхность которых загрязнена соединениями радиоактивного цезия, испарившегося из ядерного топлива при аварии, и частично растворяет их. Что касается урана, трансурановых элементов и осколков деления, оставшихся в топливной матрице, то, как показали проведенные в 1995–1997 гг. исследования, основным источником загрязнения ими «блочных вод» являются окисленные

¹⁰В опубликованной в 2012 г. подробной работе (Одинцов А.А. Изучение выщелачивания радионуклидов из ЛТСМ объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля», Вип. 19, 2012, с. 70–80) сделаны следующие выводы.

«1. Степень выщелачивания радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am из ЛТСМ зависит от физико-химических свойств ЛТСМ и уменьшается в ряду черные > коричневые > полихромные ЛТСМ.

2. По степени выщелачивания из ЛТСМ, независимо от химического состава раствора, радионуклиды можно расположить в следующий ряд: $^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr} > ^{241}\text{Am} \sim ^{238}\text{Pu} = ^{239+240}\text{Pu}$.

3. При неблагоприятных условиях в результате деструкции ЛТСМ на фрагменты, аналогичные исследованным (3–5 мм), в «блочных» водах объекта «Укрытие» черные ЛТСМ растворятся примерно через 1400 лет, а коричневые в течение 5800 лет. При этом порядка 0,1–0,2% коричневых и черных ЛТСМ растворяются практически в первые сутки контакта с водой».

топливные частицы — U_3O_8 . Скорость их растворения намного выше слабоокисленных частиц (UO_2) и тем более лавообразных ТСМ [15–17].

В таблице 6 для примера приведены среднегодовые концентрации ^{137}Cs , ^{90}Sr , суммарного Pu и U в блочной воде для четырех точек отбора. Представлены данные, разделенные десятилетним промежутком, — 2000 г. и 2010 г.¹¹

Таблица 6. Средние концентрации радионуклидов и урана в блочной воде (в 2000 г. [18] и в 2010 г. [6])

Номер точки отбора*	Концентрация компонента, Бк/м ³							
	^{137}Cs		^{90}Sr		Суммарный Pu		U , мг/л	
	2000 г.	2010 г.	2000 г.	2010 г.	2000 г.	2010 г.	2000 г.	2010 г.
6	$6,2 \cdot 10^{10}$	$3,6 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$5,4 \cdot 10^9$	$4,0 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^6$	48	31
20	$1,2 \cdot 10^{10}$	$3,9 \cdot 10^{10}$	$4,2 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^7$	1,7	42
30	$5,2 \cdot 10^9$	$8,1 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^6$	2,7	8,1
32	$1,3 \cdot 10^{11}$	$3,9 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{10}$	$5,5 \cdot 10^{10}$	$4,2 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^7$	109	34

*См. рис. 9–11.

Можно достаточно уверенно утверждать, что концентрация плутония в «блочной воде» заметно увеличилась. Однако нет никаких признаков «стремительного разрушения ЛТСМ», которое предсказывалось в ряде работ (см., например, [19, 20]).

В подавляющем большинстве контролируемых скоплений вода представляет собой среднеактивные жидкие радиоактивные отходы. Есть и исключения — вода, поступающая из скважины, пробуренной в каскадной стене (помещение 01/3, точка 8), относится к категории слабоактивных ЖРО, а вода в помещении 012/7 и 012/8 (южная часть бассейна-барботера) может быть отнесена к категории высокоактивных отходов (по ^{90}Sr). За период наблюдений был отмечен и еще ряд случаев, когда в помещениях содержание радионуклидов в воде превышало предел, установленный для среднеактивных ЖРО.

Транспортировка радионуклидов в воде происходит как в виде растворимых соединений, так и с твердыми частицами (взвесями). Содержание взвесей в пробах «блочной» воды составляет обычно $(0.02 \div 0.6)$ г/л.

14.2.2. Скопление воды в пом. 001/3

Скопление воды в пом. 001/3 ВСРО представляет собой не только самое крупное, но и наиболее представительное, поскольку здесь собираются основные водопотоки, омывающие ТСМ. Его радионуклидный состав дает «усредненную» картину загрязнения воды во всем реакторном блоке.

¹¹Условия поступления воды в «Укрытие» для этих двух лет отличаются. Как уже говорилось, летом 2000 г. наблюдалось аномально большое количество осадков, в результате чего заметно повысился общий объем находящейся в объекте воды. В 2010 г. из-за аномально высокой температуры в летние месяцы увеличилась конденсация влаги в нижних помещениях «Укрытия», что привело также к увеличению объемов ее скоплений.

Здесь накопилась и значительная масса донных отложений, содержащих радионуклиды и делящиеся вещества. Именно поэтому *изучение скопления в пом. 001/3 важно для ответа на вопросы о степени радиационной и ядерной опасности воды в «Укрытии».*

Этому посвящен ряд работ (см., например, [1], [6], [12], [21–23]), результаты которых обсуждаются далее.

Описание помещения (см. рис. 22)

При описании пом. 001/3 мы использовали данные работ [21, 23].

Длина помещения 57 м, ширина до отметки минус 1,5 м составляет 6 м. Ниже, на отметке минус 2,6 м, ширина пола составляет 3 м за счет откоса (см. рис. 22). Проектная отметка пола $-2,60$ м, потолка $+0,25$ м. Отбор проб воды и донных осадков проводят через скважину, идущую из пом. 01/3 (т.н. 30)¹².

Уровень воды в помещении находится (постоянно) на отметке минус 0,9.

На полу (на наплыве бетона) образовался слой донных отложений (рис. 23).

По наблюдениям, он состоит из двух слоев — верхнего, состоящего из илов черного цвета, и нижнего, более плотных донных отложений, содержащих ил и песок.

По подсчетам [21], объем донных отложений ~ 96 м³, что соответствует массе 150 т; массовая доля воды в иле 50 %. Объем воды и ила в помещении 001/3 рассчитывался с учетом бетонного наплыва на полу помещения. Он составлял около 300 м³.¹³

Радиоактивность воды и донных отложений

Уже первые исследования радиоактивности воды в пом. 001/3 обнаружили ее интересную особенность — циклические изменения содержания радионуклидов в этой воде. По сравнению с летом к концу зимы их содержание умень-



Рис. 22. Разрез помещений 001/3 и 01/3. Указаны строительные отметки. Вид с севера [23]

¹²В пом. 001/3 нет прямого доступа: лестница по ряду У между осями 51–51' на глубине одного пролета залита водой. Кроме того, эту лестницу от основного помещения отделяет стена, в которой имеется дверь, также на 3/4 залитая водой.

¹³Чаще всего в литературе приводится значение 270 м³.



Рис. 23. Донные осадки (ил) вблизи от разделительной стены между 4-м и 3-м блоками

шалось в несколько раз. Это видно из графиков, приведенных на рис. 24 и 25 [12].

Как уже говорилось, объясняется это тем, что вода, поступающая в пом. 001/3 из различных источников, имеет различную активность, а источники изменяют свою относительную интенсивность в зависимости от времени года.

Осенью и зимой основная часть воды (низкоактивной) притекает из скважины, пробуренной в каскадной стене (т.о. 8). В другие периоды — весной и летом — в скопление поступает много воды, протекающей по помещениям реакторного отделения. И концентрация радионуклидов в нем повышается.

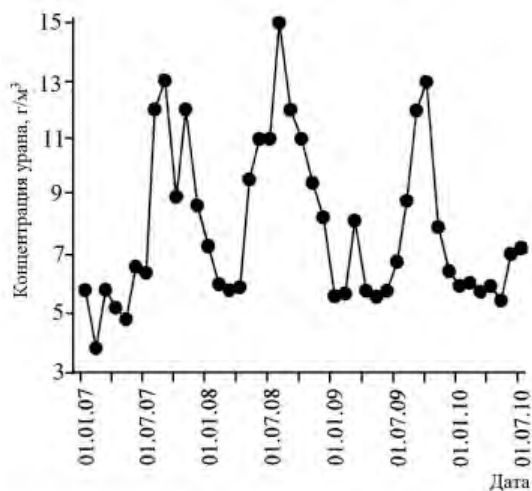


Рис. 24. Концентрация урана в воде пом. 001/3 (2007–2010 гг.)

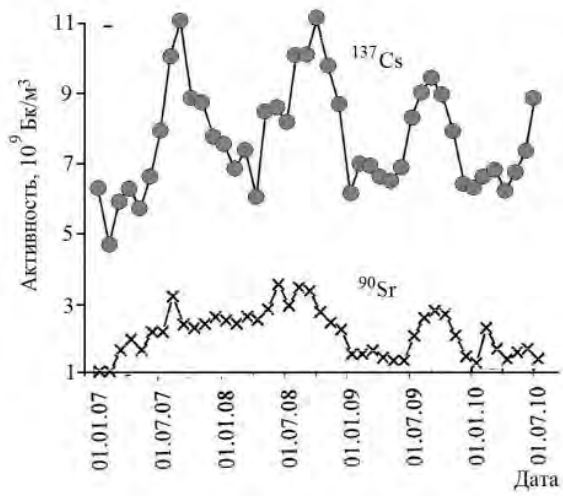


Рис. 25. Активность ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в воде пом. 001/3 (2007–2010 гг.)

Для примера в таблице 7 приведены результаты анализов проб, отобранных в т.о. 8 и 20 (см. рис. 11) в 2005 г. Их активность и содержание урана отличаются на порядки.

Таблица 7. Результаты анализов проб, отобранных в т.о. 8 и 20 (среднее за 2005 г.)

№ точки	Объемная активность, Бк/м³			U, мг/л
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	Pu	
8	2,8×10 ⁶	4,4×10 ⁵	—	0,01
20	3,9×10 ¹⁰	6,5×10 ⁹	2,2×10 ⁹	21

Цикличность наблюдается и для органических соединений, находящихся в воде пом. 001/3.

Связано это с тем, что источником их поступления в «Укрытие» служит система пылеподавления, периодически работающая под кровлей объекта. Вода с органическими соединениями также поступает из реакторного отделения.

Что касается долговременной (10–15 лет) динамики изменения концентрации продуктов деления, урана и трансурановых элементов в воде пом. 001/3, то данные по ней представлены на рис. 26–28.

Можно согласиться с выводом о том, что «наблюдается устойчивая тенденция увеличения объемной активности ³⁷Cs, ⁹⁰Sr, суммарного Pu и концентрации U в ЖРО помещения 001/3» [6].

Однако эта тенденция развивается достаточно медленно и не должна вызывать серьезных негативных последствий, если создание НБК будет окончено в ближайшие годы.

Отметим еще, что одной из особенностей «блочных вод», которую наблюдают и в скоплении пом. 001/3, является то, что активность трансуранов (Am, Cm) в них по отношению к активности (²³⁹⁺²⁴⁰)Pu больше, чем для ТСМ-объекта «Укрытие».

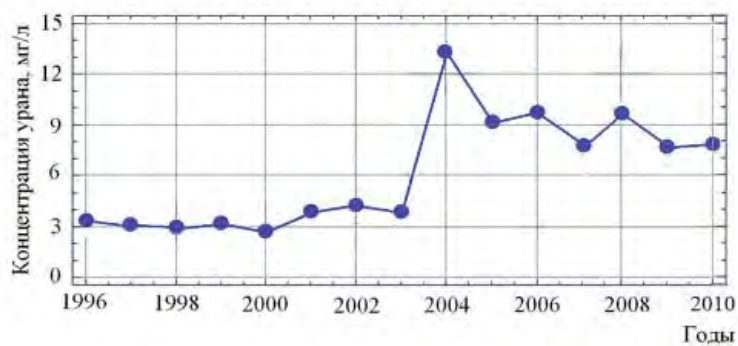


Рис. 26. Концентрация урана в воде пом. 001/3 (1996–2010 гг.)

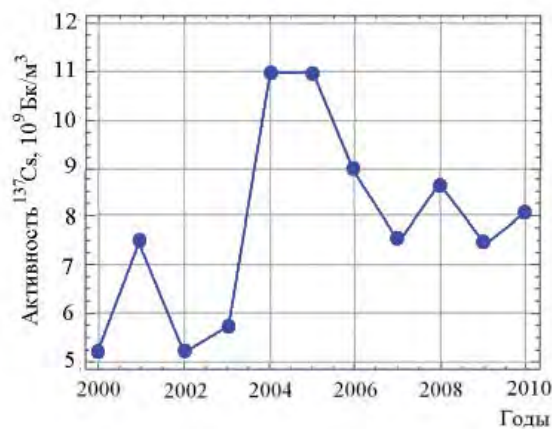


Рис. 27. Активность ¹³⁷Cs в воде пом. 001/3 (2000–2010 гг.)

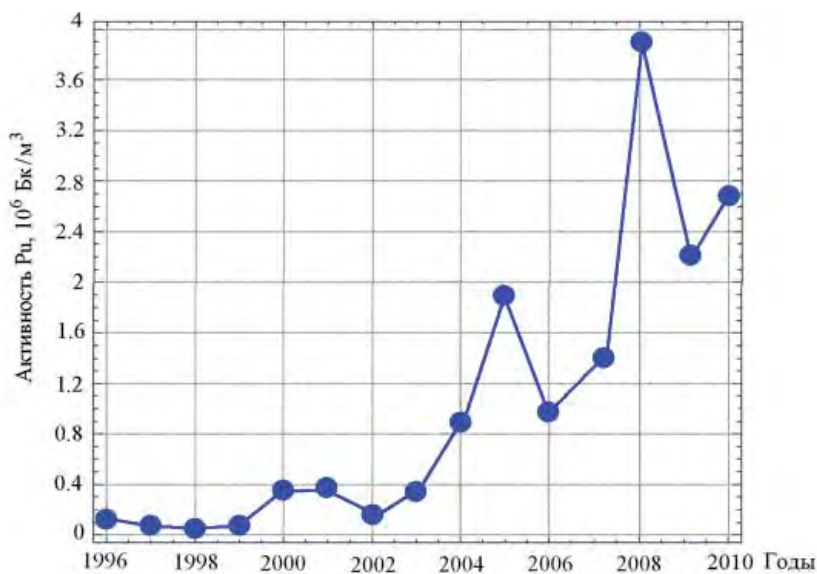


Рис. 28. Активность плутония в воде пом. 001/3 (1996–2010 гг.)

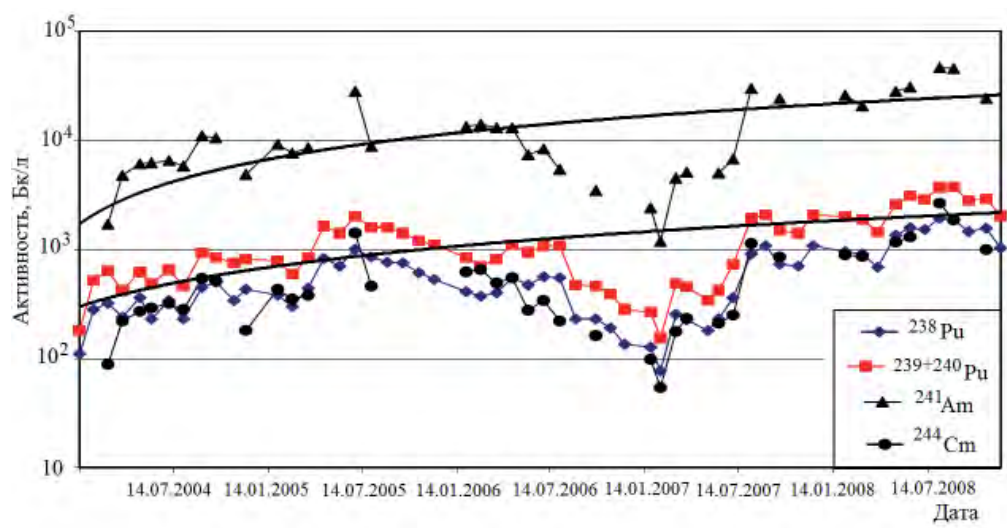


Рис. 29. Объемная активность ТУЭ в ЖРО помещения 001/3 (т.о. 30)[24]

Это видно из рис. 29.

Действительно, через 20 лет после аварии (2006 г.) расчетная активность ^{244}Cm (A_{Cm}) для топлива 4-го блока составляет $0,1 \times 10^7$ Бк/г, для ^{241}Am (A_{Am}) — 2×10^7 Бк/г и для $^{(239+240)}\text{Pu}$ (A_{Pu}) — $1,3 \times 10^7$ Бк/г [25]. Отношение $A_{\text{Cm}}/A_{\text{Pu}} = 0,077$ и $A_{\text{Am}}/A_{\text{Pu}} = 1,54$. Тогда как из графика на рис. 29 следует, что соотношение активностей в воде пом. 001/3 в первом случае больше $\sim 0,3$, а во втором ~ 10 (см. [6]).

Радиоактивность донных отложений подробно исследовалась в ряде работ (см. таблицу 8, взятую из [12]).

Таблица 8. Фракционное распределение активности в пробе донных отложений (ила) из пом. 001/3 (2005 г.)

Радионуклид	Фракционное распределение, Бк/кг				
	$D_{\text{част.}} \geq 100 \text{ мкм}$ 65,4% масс.	$D_{\text{част.}} = 10\text{--}100 \text{ мкм}$ 30,3% масс.	$D_{\text{част.}} = 1\text{--}10 \text{ мкм}$ 1,35 масс.	$D_{\text{част.}} = 0,1\text{--}10 \text{ мкм}$ 1,9% масс.	$D_{\text{част.}} = 0,01\text{--}0,1 \text{ мкм}$ 1,1% масс.
^{241}Am	$1,7 \times 10^6$	$4,5 \times 10^6$	$2,1 \times 10^7$	$9,5 \times 10^7$	$5,6 \times 10^7$
^{60}Co	$1,6 \times 10^5$	$1,6 \times 10^5$	—	$2,4 \times 10^0$	$1,5 \times 10^0$
^{137}Cs	$1,0 \times 10^9$	$1,0 \times 10^9$	$9,7 \times 10^9$	$6,7 \times 10^9$	$3,8 \times 10^9$
$^{238+239+240}\text{Pu}$	$4,8 \times 10^5$	$1,3 \times 10^6$	$5,3 \times 10^6$	$2,1 \times 10^7$	$1,2 \times 10^7$
^{244}Cm	$6,1 \times 10^4$	$1,8 \times 10^5$	$1,2 \times 10^6$	$4,6 \times 10^6$	$2,6 \times 10^6$
^{90}Sr	$2,9 \times 10^9$	$4,5 \times 10^9$	$6,3 \times 10^6$	$6,6 \times 10^9$	$6,5 \times 10^7$
Уран, г/кг	1,9	1,1	1,0	4,2	5,8

14.2.3. Радиационная безопасность воды в «Укрытии»

В начале этой главы говорилось о том, что вода может разрушать ТСМ и способствовать неконтролируемому перемещению радиоактивности по помещениям «Укрытия».

Оценим величину активности ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и массу U, которая переносится водой по помещениям объекта за год. Для этого воспользуемся данными по перетеканию ЖРО из скопления в пом. 001/3 на третий блок и среднему содержанию в них перечисленных радионуклидов.

Для примера выберем обычный год, приходящийся на прошедшее десятилетие, — 2008.

Измеренные данные следующие (см. таблицу 9).

Таблица 9. Полное количество урана и полная активность ^{37}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, поступившая на 3-й блок из пом. 001/3 (за 2008 год)

Радионуклид	Уран	^{90}Sr	^{137}Cs	$^{239+240}\text{Pu}$
Среднегодовое содержание в воде пом. 001/3	9,6 г/м ³	$2,8 \times 10^9$ Бк/м ³	$8,6 \times 10^9$ Бк/м ³	$2,6 \times 10^6$ Бк/м ³
Полное количество урана (кг) или активность (Бк) радионуклида, поступившая на 3-й блок (за 2008 год)	7,7 кг	$2,2 \times 10^{12}$ Бк	$6,9 \times 10^{12}$ Бк	$2,1 \times 10^9$ Бк

Если сравнить приведенные цифры со всем количеством урана и активностью выбранных радионуклидов, находящихся в помещениях «Укрытия» в 2008 г. (с учетом выброса и радиоактивного распада), то получившиеся значения лежат в пределах ($10^{-3} \div 10^{-2}$)%.

Поэтому неконтролируемое перемещение радионуклидов с водой не может серьезно повлиять на радиационные условия в сильно загрязненных помещениях объекта.

Что касается донных осадков, то данные по их радиоактивности по состоянию на 2008 г. приводятся в таблице 10 (см. [23]).

Таблица 10. Оценки удельной активности радионуклидов в донных осадках помещения 001/3

Радионуклид	Удельная активность высушенного осадка, Бк/г
^{60}Co	3 000
^{90}Sr	1 320 000
^{134}Cs	7 800
^{137}Cs	1 500 000
$^{234}\text{U} + ^{235}\text{U} + ^{236}\text{U} + ^{238}\text{U}$	47
$^{238+239+240}\text{Pu}$	58300
^{241}Am	8 100

В работе [21] даны оценки полного содержания урана в донных отложениях — 80 кг (^{235}U — 860 г) и плутония — 430 г (на 2000 г).

14.2.4. Ядерная безопасность скоплений воды в «Укрытии» [22]

Опасность накопления ядерного топлива в воде в виде растворенных солей урана или взвеси исследовалась в работе [26].

На рис. 30 видно, что коэффициент размножения $K_{\infty} = 0,95$ достигается при концентрации ядерного топлива в гомогенной смеси — 1500 г/л (при 2%-ном начальном обогащении и выгорании 11 кВт×сут./кг (U).

Если в скоплениях воды находится растворимая соль гадолиния с концентрацией 0,1 г/л и более, то самоподдерживающаяся цепная реакция становится невозможной при любом содержании такого топлива.

В скоплениях воды в «Укрытии» концентрация урана составляет десятки мг/л (г/м³), что во много раз меньше ядерно опасных значений. Например, в 2010 г. максимальная концентрация урана в воде в исследованных скоплениях составляла < 35 г/л.

В некоторых скоплениях обнаружены соли гадолиния, поступающие туда с водой от системы пылеподавления. Так, например, по данным на май 2006 г., в воде помещения 001/3 содержалось 0,2—0,3 мг/л гадолиния.

Отметим, что на все крупные скопления воды, кроме расположенного в помещении 001/3, накладывается и еще один запрет возникновения самоподдерживающейся цепной реакции, это — их малая глубина, менее 0,5 м.

Рассмотрим теперь потенциальную ядерную опасность донных отложений в пом. 001/3. Примем для них модель гомогенной смеси, состоящей из трех компонент — $(\text{UO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O})^{14}$. Если считать, что уран равномерно распределен по отложениям, то его концентрация составляет ~0,8 г/л, а выгорание может лежать в пределах (9÷13) МВт×сут./кг (U).

В случае бесконечной среды такого состава можно воспользоваться результатами работы [27], в которой рассмотрена аналогичная система (см. рис. 31).

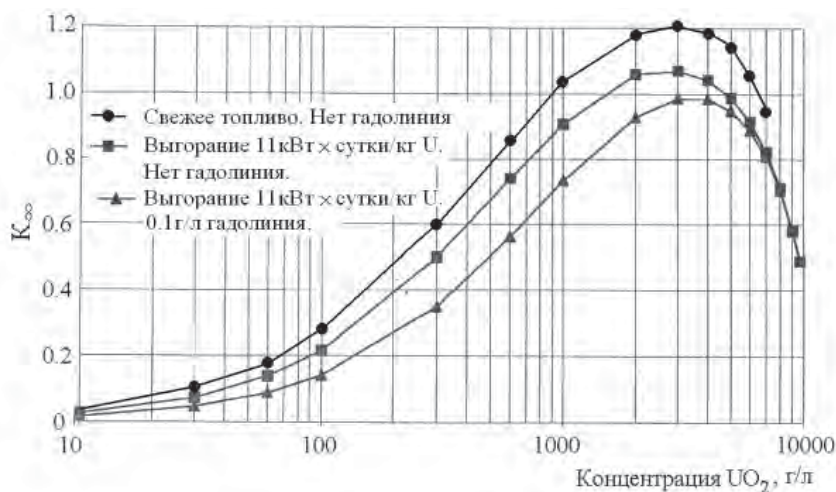


Рис. 30. Величина K_{∞} в зависимости от концентрации UO_2 для гомогенных смесей с водой и гадолинием. Начальное обогащение топлива 2% по ^{235}U [26]

¹⁴Согласно [21], основную часть донных отложений в пом. 001/3 составляет песок.

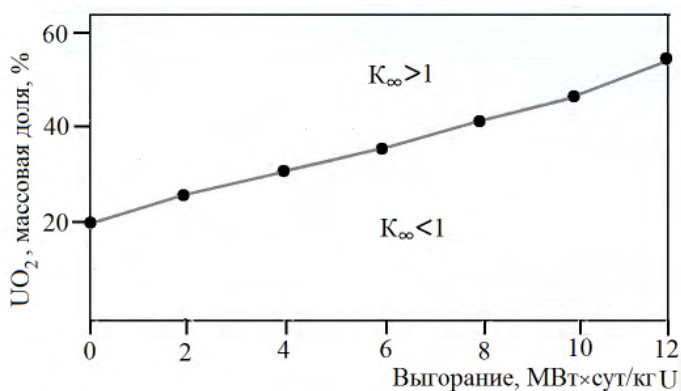


Рис. 31. Зависимость коэффициента размножения нейтронов от содержания урана и выгорания топлива в системе ($\text{UO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$)

Из рисунка видно, что отложения в пом. 001/3 ядерно безопасны. Учет любых других параметров, например, наличия других химических элементов, входящих в состав ТСМ, присутствие поглотителей и т.п. только усиливает это утверждение.

В то же время, согласно критериям ПБЯ-06-00-88, проведение дальнейших работ с таким скоплением ТСМ уже требует особого внимания¹⁵.

Таким образом, результаты исследований дают уверенность в отсутствии ядерной опасности водных скоплений в объекте «Укрытие» в настоящее время.

Однако продолжающиеся процессы вымывания урана из ТСМ и накопление его в донных осадках (особенно если интенсивность этих процессов со временем будет нарастать) требуют постоянного контроля.

Постоянного контроля требуют и любые операции по переработке блочных вод, такие, например, как упаривание.

14.3. Разрушение ТСМ, находящихся в объекте «Укрытие», под действием воды (см. [2])

Одно из «обвинений», выдвинутых против воды в начале этой Главы, заключалось в том, что «она может разрушать ТСМ». Выше уже говорилось о том, что потоки воды несут с собой незначительную часть радиоактивности, оставшейся после аварии в пределах «Укрытия». Но это не означает, что вода не может активно участвовать в разрушении ТСМ.

¹⁵ «Ядерно опасный участок — производственное подразделение (цех, участок, отделение, отдел, лаборатория, хранилище и т.п.), в котором проводятся работы с плутонием, ураном, обогащение которого нуклидом уран-235 выше 1% (масс.), если суммарная масса изотопов плутония и нуклида уран-235, находящихся в любой момент времени в данном подразделении, превышает 300 г» (ПБЯ-06-00-88 пункт 2.18).

Основным источником информации о разрушении ТСМ «блочными водами» служили визуальные наблюдения и оценки. К сожалению, они проводились не систематически, а от случая к случаю, носили локальный характер и далеко не всегда документировались.

Поэтому приведенная ниже информация во многом основывается на частных сообщениях специалистов, постоянно проводивших работы в помещениях объекта «Укрытие» (подробнее см. [2]).

14.3.1. «Пемза»

В главе 7 (1-я часть) уже рассказывалось о различных модификациях ЛТСМ в «Укрытии» (рис. 32).

За первые годы после создания «Укрытия» заметным изменениям подверглись куски пемзы, находившиеся на первом и втором этаже бассейна-барботера.

От контакта с «блочными водами» они рассыпались и в смоченном состоянии представляют собой подобие кашицы, которая при высыхании является источником пыли. Лишь изредка наблюдаются не рассыпавшиеся куски в местах, находящихся высоко над полом (к моменту слива воды из ББ пористые куски пемзы плавали на ее поверхности и по мере снижения уровня воды подплывали к месту расположения сливных отверстий).

В то же время в хранилищах ряда институтов (РИ, КИ, ИПБ АЭС) их сохранность существенно лучше.

14.3.2. «Шлак», или шлакообразные гранулированные ЛТСМ

Через ~10 лет после аварии свойства шлакообразных ЛТСМ значительно изменились.

Во-первых, стеклообразная корка растрескалась, стала хрупкой и чешуйчатой.

Во-вторых, кучи шлака на первом и втором этажах бассейна-барботера утратили свою монолитность и стали хрупкими: гранулы с хрустом рассыпаются под давлением инструмента. В кучи свободно входит пробник. Внутри них прочность шлака больше, чем на поверхности. Однако оценка этой прочности весьма субъективна. Важен тот факт, что там, где контакт кучи с окружающей средой меньше, ее прочность — больше.

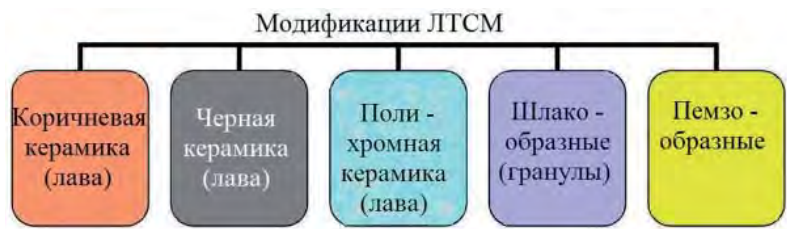


Рис. 32. Модификации ЛТСМ в «Укрытии»

К сожалению, изучить изменение свойств образцов шлакообразных гранулированных ЛТСМ в лабораторных условиях не представляется возможным из-за отсутствия их образцов.

14.3.3. Черная керамика

Механические изменения черной керамики происходили там, где она имела контакт с водой. Это наблюдалось для ряда помещений.

Так, например, за время наблюдений свойства «сталактитов», которые находятся в пом. 217/2 («44/43», «Е/Г»), практически не изменились. Это связано с тем, что свежий бетон, стекавший в пом. 217/2 с севера на юг, застыл, образовав своеобразную наклонную плоскость, которая не позволяет воде входить в контакт со «сталактитами».

Другая ситуация сложилась со «слоновьей ногой», находящейся в том же помещении и подвергающейся постоянным воздействиям воды.

В 1992 г. проводился эксперимент, целью которого было определение свойств пыли, образовавшейся на ее поверхности. С этой целью на поверхность лавы был наложен марлевый тампон, пропитанный специальным клеящим составом. После застывания состава и «приклеивания» тампона к поверхности при попытке оторвать тампон вместе с ним легко отделилась значительная часть поверхностного слоя лавы в виде фрагментов с размерами до нескольких сантиметров (фотографии этих фрагментов приведены на рис. 33).

Данный результат оказался неожиданным, так как непосредственно после аварии для взятия образцов «слоновьей ноги» пришлось использовать стрелковое оружие ввиду ее большой прочности.

Похожая картина наблюдается и в ББ. На рис. 34 представлена бетонная поверхность пола на отм. $-0,65$. При обследовании этого участка в 1988 г. было отмечено присутствие на нем слоя лавы, представлявшего собой сплошную керамику. Через несколько лет под воздействием воды, периодически заливавшей этот участок пола, лава разрушилась.

«Пагубная» для черной керамики роль воды подтверждается и тем, что в сухом и относительно стабильном по температуре помещении 304/3 куски черной керамики не претерпели заметных изменений и остались такими же крупными, какими были при первых обследованиях (88–90 гг.) (см. рис. 35).

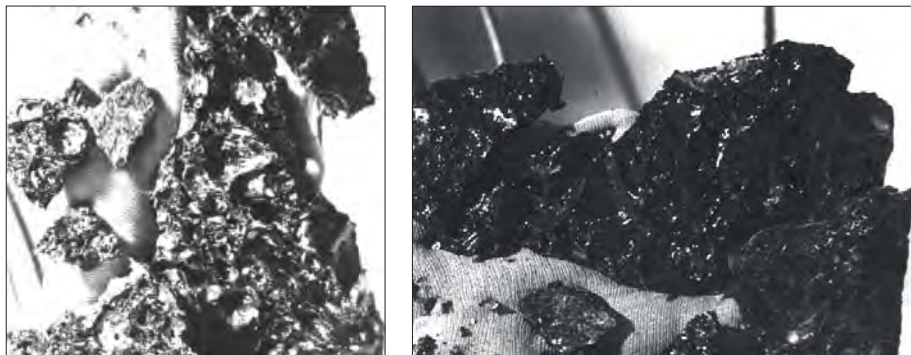


Рис. 33. Фрагменты ЛТСМ «слоновья нога», легко отделившиеся от поверхности



Рис. 34. Разрушившаяся черная керамика на полу ББ-1



Рис. 35. Куски черной керамики на полу пом. 304/3

Практически не изменилась и основная часть образцов черной керамики, которые находились в спецхранилищах ОЯРБ МНТЦ «Укрытие», «Курчатовском институте» и «Радиовом институте» (см. рис. 36).

Уже говорилось, что в помещениях с высокой влажностью в 1990 г. на поверхности черных ЛТСМ были обнаружены «желтые пятна», которые со временем захватывают все большую часть этой поверхности. Их появление также связано с химическими изменениями материала керамики под действием воды или ее паров.

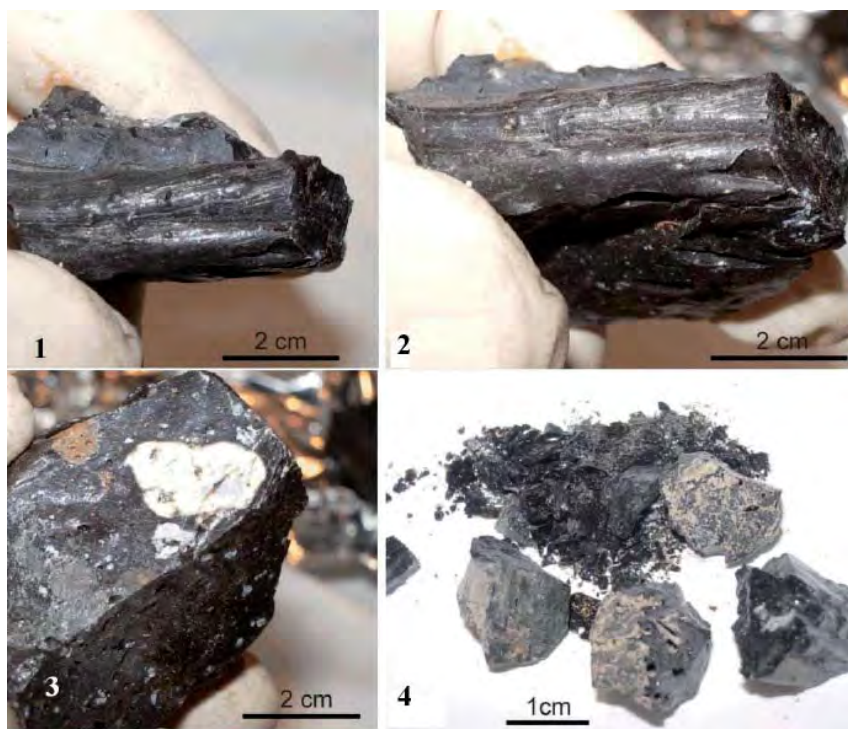


Рис. 36. Внешний вид образцов черной керамики, отобранных в 1990 г. и находящихся в «Радиовом институте». В 2011 г. разрушение наблюдалось для (4) [28]

14.3.4. Коричневая керамика

Образцы этой разновидности ЛТСМ хранятся как в «Радиовом институте», так и в КИ. Кроме того, большое количество проб коричневой керамики находится в ИПБ АЭС.

Анализ имеющихся данных показывает, что эта разновидность ЛТСМ претерпела наименьшие изменения своих свойств: ни достаточно большие образцы в Радиовом институте, ни мелкие пробы в ИПБ АЭС за время хранения (последняя ревизия проходила более чем через 20 лет после их помещения в хранилище) не претерпели значительных изменений (рис. 37).

То же самое можно сказать и о пом. 210/7: особых изменений коричневой керамики ни в четвертом клапане, ни на полу (между рядами «И» и «Ж») не обнаружено. Некоторые наблюдатели отмечают увеличение трещин в застывшей массе коричневой керамики, что может быть объяснено сезонными температурными колебаниями.

14.3.5. Возможность разрушения ЛТСМ при замерзании воды в порах

В обзоре [20] обсуждается возможность разрушения ЛТСМ при замерзании воды в порах. Действительно, ЛТСМ обладают доступной пористостью для воды, которая в зимнее время может замерзать, заметно увеличиваясь в

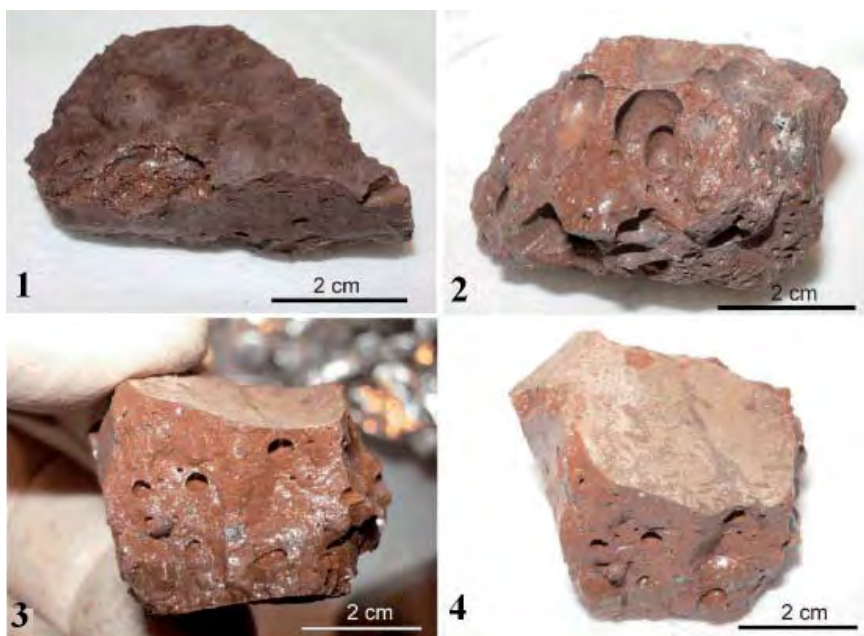


Рис. 37. Внешний вид образцов коричневой керамики, отобранных в 1990 г. и находящийся в «Радиовом институте». В 2011 г. разрушений не наблюдалось [28]

объеме. Из практики известно, что такого рода процесс является причиной разрушения горных пород.

В случае с ЛТСМ дело, однако, обстоит не столь тривиально, поскольку лавы обладают молекулярно-ситовыми свойствами и подавляющая часть объема доступной пористости занята молекулами воды, встроенными в силикатные циклы. Такая вода при низких температурах не образует кристаллов льда и не разрушает силикатных циклов.

Эта точка зрения нашла подтверждение в ходе специально поставленных экспериментов, когда производилось многократное термоциклирование насыщенных водой ЛТСМ в интервале $(-20) \div (+50)^\circ\text{C}$ с одновременной оптической микроскопией существующих (специально выращенных) микротрещин [29]. После нескольких сотен циклов не было отмечено какого-либо (даже докритического) роста трещин.

Другое дело, что при наличии в скоплениях ЛТСМ крупных полостей (пустот) замерзающая вода может привести к их расклиниванию и разделению скопления ЛТСМ на более мелкие фрагменты. Это регулярно происходит в объекте и подтверждается рядом визуальных наблюдений.

Строго говоря, при этом изменяются не свойства ЛТСМ, а их скопления.

Итак, наблюдения показывают, что главным разрушителем скоплений лавы в объекте «Укрытие» является вода.

Под ее влиянием наибольшим структурным изменениям подверглись «пемза», шлак (т.е. кучи 1-го и 2-го этажа ББ) и черная керамика.

Минимальные структурные изменения претерпела коричневая и полихромная керамика — модификации, которые в наименьшей степени контактировали с водой и не подвергались особым перепадам температур.

Для образцов ЛТСМ, находившихся в условиях спецхранилищ на протяжении 10–20 лет, сильные структурные изменения наблюдаются в редких случаях только для черной керамики.

Отметим также, что наблюдаемые в объекте разрушения скоплений происходят на макроуровне. В силу неоднородного состава, различных условий остывания и ряда других причин многие из них легко распадаются на отдельные, более однородные и более устойчивые к внешним воздействиям фрагменты.

14.4. Вода в машинном зале

Источником воды, проникающей в машинный зал, служат атмосферные осадки — дождевые и талые воды.

Общая площадь крыши над машинного залом и деаэрационной этажеркой в районе 4-го блока составляет около 12 000 м². Среднее количество осадков, выпадающих на эту поверхность, составляет ~7000 м³, например, в 1998 г. выпало 8200 м³ [1].

При аварии в крыше МЗ образовались большие проломы. После сооружения «Укрытия» эти проломы были частично закрыты металлической кровлей, но полностью доступ воде не был перекрыт (рис. 38).

После начала работы КЭ над МЗ вместо металлических блоков, уложенных в 1986 г. в осях 41–49 на поврежденные фермы, было выполнено новое покрытие (пространственный металлический блок), опирающееся на вновь возведенные стены (рис. 39).

В 1996 г. были приняты новые меры против попадания воды, стекающей с крыши, в нижние помещения МЗ (сделана «отмостка» стен). Тем не менее, по оценкам, половина осадков, то есть около 4000 м³/год, разными путями проникала в него.



Рис. 38. Кровля машинного зала. 1987 г.

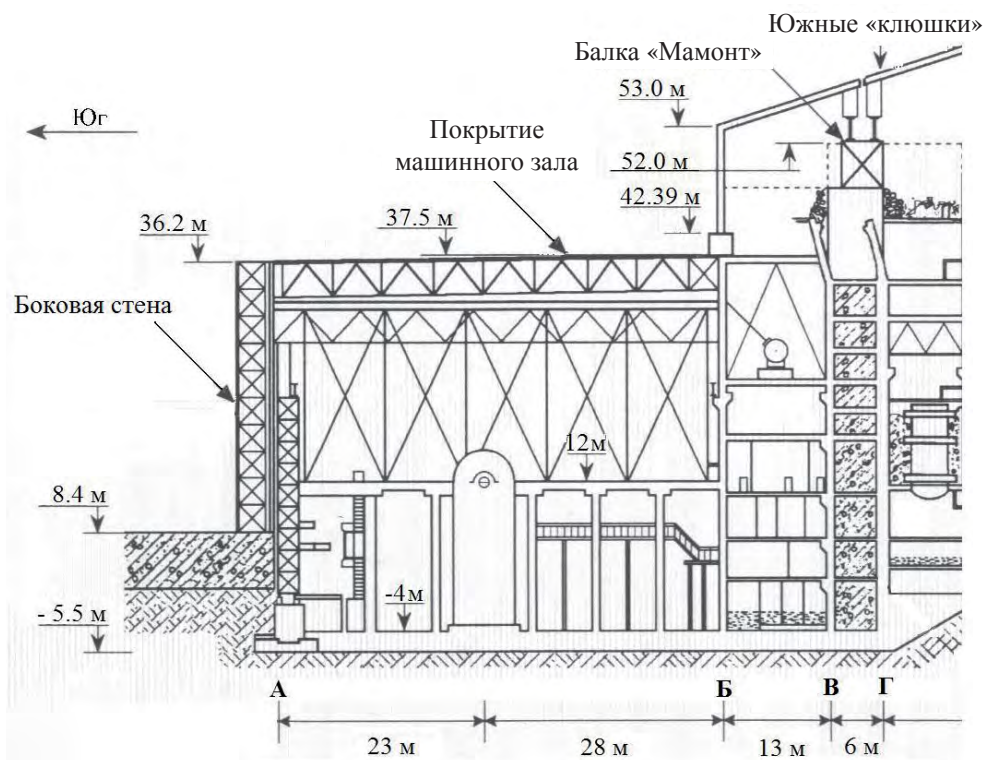


Рис. 39. Объект «Укрытие». Разрез машинного зала (см. также рис. Глава 11, рис. 3)

Этот факт согласуется с тем, что в течение года из помещений машинного зала откачивается и передается на переработку в химический цех ЧАЭС 3000–4000 м³ ЖРО (в 1996 г. ~4500 м³, в 1997 г. ~4050 м³, 1998 г. ~3100, в 1999 г. ~2800 м³).

Согласуется он и с тем, что между месячным количеством выпавших осадков и объемом откачанной за это время из машзала водой наблюдается очевидная корреляция (см. рис. 40 из [1]).

Похожий эффект мог наблюдаться, если бы в нижние помещения МЗ (Г-072/25, Г-086/3, Г-077/4, Г-089/4) в **больших** количествах поступали грунтовые воды. Однако этому противоречит тот факт, что после откачки уровень воды в перечисленных помещениях устанавливался на ~1 м ниже уровня грунтовых вод [5].

Исследования радионуклидного состава воды в МЗ велись в КЭ эпизодически.

Связано это в основном с тем, что активность ЖРО в машинном зале на два порядка меньше активности «блочных» вод, образующихся в помещениях блока «Б» и ВСРО.

Это иллюстрируют графики на рис. 41 [30].

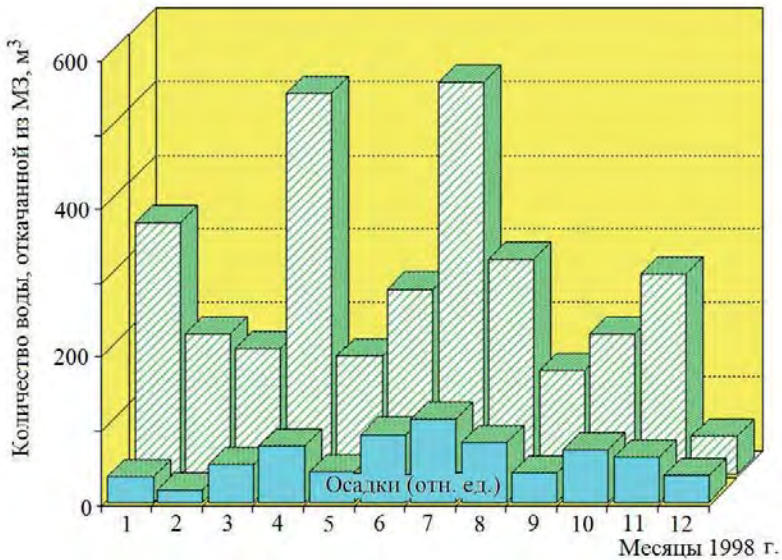


Рис. 40. Количество воды, откачиваемой из МЗ, и выпавшие осадки

14.5. Проблема очистки ЖРО, поступающих из объекта «Укрытие» [31, 32]

Проблема обращения с тысячами тонн ТРО и ТСМ, находящимися в «Укрытии», еще только обсуждается и, по-видимому, начнет реализоваться в полном объеме только через несколько десятилетий¹⁶.

Другое дело ЖРО, которые постоянно поступают из пом. 001/3 ВСРО в систему сбора трапных вод в помещениях ВСРО 3-го энергоблока. По приведенным выше оценкам, их количество составляет ~800 м³ в год.

Проблема заключается в том, что штатная технология ЧАЭС по переработке ЖРО не может использоваться для воды из «Укрытия», поскольку содержание трансурановых элементов и органических соединений в этой воде превышает допустимые пределы для выпарных аппаратов (см. таблицу 11).

Таблица 11. Критерии приемки ЖРО на выпарные аппараты ЧАЭС для трансурановых элементов и органических жидкостей

Параметр	Критерии приемки ЖРО на ЧАЭС	Концентрация в пом. 001/3
Сумма ^{238,239,240} Pu	<370 Бк/л по сумме альфа-излучателей	До 1000 Бк/л
²⁴¹ Am	<370 Бк/л	До 10000 Бк/л
Синтетические ПАВ	<25 мг/л	>50 мг/л
Пленкообразующие соединения	Должны отсутствовать	300–700 мг/л

¹⁶Одно из главных препятствий состоит в том, что долгоживущие РАО подлежат захоронению в стабильных геологических формациях. Но в настоящее время такого могильника нет, и для его создания, по оценкам НАНУ, потребуется не менее 15 лет.

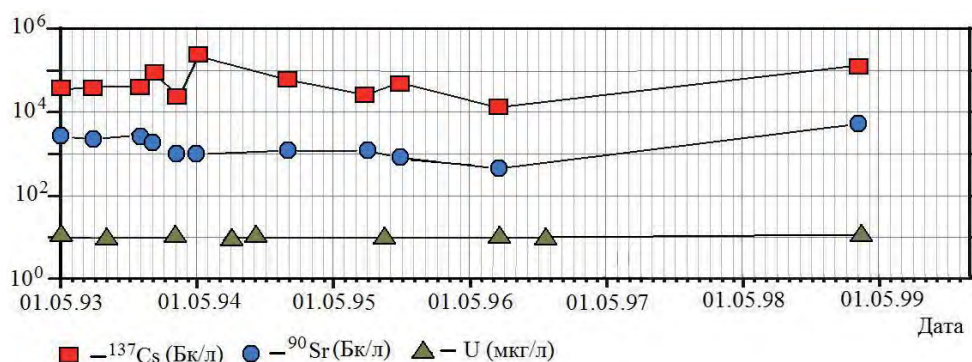


Рис. 41. Результаты анализа проб воды из МЗ, взятых в пом. 077/3 на отметке – 4,2 м, около турбоагрегата № 7 (т.о. 28). Активность ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и массовое содержание урана

Для существующей концентрации ТУЭ при переработке «блочных вод» были бы нарушены правила безопасности во время их хранения и последующего глубокого концентрирования.

Органические соединения препятствуют нормальной работе выпарных аппаратов.

Путь, по которому пришлось идти, – разбавление ЖРО объекта «Укрытие» большими объемами низкоактивных жидких отходов 3-го блока и последующее их хранение, естественно, являлся временной мерой.

На будущее в комплексной программе вывода Чернобыльской АЭС из эксплуатации предусматривается строительство завода по переработке жидких радиоактивных отходов (ЗПЖРО). Он предназначен как для переработки отходов, накопленных за время эксплуатации, так и тех, которые будут образовываться в процессе снятия с эксплуатации ЧАЭС, а также ЖРО объекта «Укрытие»¹⁷.

¹⁷Существующие отходы планируется переработать в течение 10 лет. Проектный срок эксплуатации завода – не менее 20 лет, т.е. после окончания 10 лет ЗПЖРО сможет перерабатывать жидкие РАО, которые будут образовываться в дальнейшем при выполнении работ по снятию с эксплуатации энергоблоков ЧАЭС и преобразованию «Укрытия» в экологически безопасную систему. Введение в эксплуатацию ЗПЖРО позволит осуществить постепенный перевод жидких РАО в твердую форму. ЗПЖРО представляет собой промышленный комплекс, который включает: оборудование по извлечению ЖРО из емкостей хранилищ; оборудование по предварительной обработке и уменьшению объема ЖРО; оборудование для производства операций по кондиционированию отходов (см. www.chnp.atom.gov.ua).

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отв. Исполнитель Боровой А.А. Отчет МНТЦ «Укрытие», арх. № 3836, 2001 г. Чернобыль, 337 с.
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. Мейер В.А., Ваганов П.А. Основы ядерной геофизики. — Л.: Недра, 1978. — 347 с.
4. Изучение физико-химических свойств ядерно опасных делящихся материалов объекта «Укрытие», в том числе тех, которые влияют на степень ядерной, радиационной и радиэкологической безопасности объекта «Укрытие». Отчет МНТЦ «Укрытие». Арх. № 3833, 2001 г., 109 с.
5. Обращение с водой объекта «Укрытие». Отчет по характеризации воды. Отчет Пакета С по проекту SIP-03/1/C01, TN/00139, Славутич, 2000.
6. Одинцов А.А., Хан В.Е., Краснов В.А., Щербин В.Н. Жидкие радиоактивные отходы на нижних отметках объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля». Вип. 16, 2011, с. 110–123.
7. Боровой А.А., Кумшаев С.Б., Герасимова Т.С. и др. Вода в помещениях объекта «Укрытие». Отчет МНТЦ «Укрытие», инв. № 09-013/22, Чернобыль, 1993.
8. Боровой А.А., Толстоногов В.К. и др. Результаты обследования скоплений воды в помещениях объекта «Укрытие». Предложения контрмер. Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие», ПО ЧАЭС, инв. № 2849, Чернобыль, 1993.
9. Криницын А.П., Стрихарь О.Л., Щербин В.Н. О механизме формирования жидких радиоактивных отходов в помещениях блока Б и ВСРО. В сборнике «Проблемы Чернобиля». Вип. 9, 2002, с. 98–104.
10. Контроль неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие». Отчет о НИР, договор № 154/04 ИПБ АЭС НАН Украины. Чернобыль, 2004, 74 с.
11. Контроль неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие». Отчет о НИР, договор № 267/08 ИПБ АЭС НАН Украины. Чернобыль, 2008, 92 с.
12. Одинцов А.А., Хан В.Е., Огородников Б.И. Контроль факторов радиационной опасности помещения 001/3 объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля». Вип. 15, 2011, с. 96–102.
13. Контроль за процессами перераспределения ядерного топлива и продуктов его деления в объекте «Укрытие» под влиянием природных физико-химических факторов. Отчет МНТЦ «Укрытие» (заключительный п. 1.4 плана 1996 г.), Чернобыль, 1997 г., 16 с.
14. Изучение физико-химических свойств ядерно опасных делящихся материалов объекта «Укрытие», влияющих на степень ядерной, радиационной и радиэкологической безопасности. Отчет (заключительный) ИПБ АЭС НАНУ № 3970, Чернобыль, 2007 г., 248 с.
15. Krinitsyn A.P., Simanovskaya I.Ya., Strikhar O.L. Action of Water on Construction and Fuel-containing Materials in the Facilities of the Chernobyl Sarcophagus. Radiochemistry, 1998. Vol. 40, № 3, p. 287–297.
16. Контроль накопления радионуклидов и топлива в воде разных помещений объекта «Укрытия». Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие», № 3789. Чернобыль, 1999, 39 с.
17. Кашпаров В.А., Иванов Ю.А., Зварич С.И. и др. Кинетика растворения чернобыльских топливных частиц и выщелачивания из них радионуклидов в почвах

- зоны отчуждения. Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения. Вып. 5, Киев, 1998, с. 24–33.
18. Выполнение работ по контролю и анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие». Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» по договору № 123/2000, Чернобыль, 2000. – 32 с.
 19. Баряхтар В.Г., Гончар В.В., Жидков А.В., Ключников А.А. О пылегенерирующей способности аварийного облученного топлива и лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие», № 97-10, Чернобыль, 1997. – 20 с.
 20. Жидков А.В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния. В сборнике «Проблемы Чернобиля». Вып. 7, 2001, с. 23–40.
 21. Панасюк Н.И., Скорбун А.Д., Подберезный С.С. и др. Подсчет количества радионуклидов в донных осадках помещения 001/3 объекта «Укрытия». В сборнике «Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля». Вып. 2, 2005, с. 46–48.
 22. Боровой А.А. Ядерная безопасность скоплений воды в объекте «Укрытие». – Атомная энергия, 2009, т. 107, вып. 2, с. 91–95.
 23. Панасюк Н.И., Подберезный С.С., Левин Г.В. и др. Образование радиолитического водорода в помещении 001/3 объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля». Вып. 12, 2009, с. 137–142.
 24. Одинцов А.А., Хан В.Е., Краснов В.А., Щербин В.Н. Контроль содержания радионуклидов в водных скоплениях объекта «Укрытие». В 2007–2008 гг. В сборнике «Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля». Вып. 12, 2009, с. 143–153.
 25. Боровой А.А., Довбенко А.А., Смолянкина М.В., Строганов А.А. Определение ядерно-физических характеристик топлива 4-го энергоблока ЧАЭС. Отчет ИБРАЭ АН СССР, Инв. № 52/11-20. М., 1991.
 26. Гмаль Б., Мозер Е., Претш 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-I, пункт 1. GRS-A-2414, 1997. – 44 с.
 27. Бродкин Э.Б., Хрусталева А.В. Расчеты размножающих свойств гомогенных смесей. Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова № 30/1-1030-90. – М., 1990. – 19 с.
 28. Burakov V.E. Material study of Chernobyl “lava” and “hot” particles International Experts’ Meeting on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident. Vienna, Austria, 28 January – 1 February 2013. – 47 p.
 29. Изучение механизмов и динамики разрушения топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» под действием внешних факторов. Отчет о НИР (заключительный) МНТЦ «Укрытие», № 3806, Чернобыль, 2000. – 43 с.
 30. Выполнение работ по контролю и анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие». Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» по договору № 103/98У – 112/99, Чернобыль, 1999. – 18 с.
 31. Криницын А.П., Стрихарь О.Л., Щербин В.Н. Проблема жидких радиоактивных отходов в объекте «Укрытие». В сборнике «Проблемы Чернобиля», Вып. 13, 2003, с. 81–87.
 32. Руденко Л.И., Гуменная О.А., Джужа О.В., Хан В.Е. Очистка жидких радиоактивных отходов от полимерных соединений и регенерация комплекссообразователей мембранными методами. <http://waste.ua/cooperation/2010/theses/rudenko.html>.

15. ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛОКАЛЬНОЙ ЗОНЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»¹

15.1. Первые оценки количества топлива, выброшенного в локальную зону.

Радиационные поля

15.1.1. Оценки количества топлива, выброшенного при аварии в локальную зону

Специалисты КИ в составе оперативной группы, а затем в составе КЭ и ОЯРБ МНТЦ (ИПБ АЭС) проводили целый ряд исследований в локальной зоне «Укрытия» (рис. 1 и 2). Выше уже описывались результаты изучения аэрозолей вблизи объекта², в настоящей главе речь пойдет об исследованиях радиационных полей, почвенных загрязнений и грунтовых вод в локальной зоне.

После окончания активной стадии аварии начались работы по очистке и дезактивации площадки «Укрытия» (понятие «локальной зоны» было закреплено в документах объекта позже).

Уже к первой декаде июня «...вокруг разрушенного 4-го блока был проведен большой объем дезактивационных работ. Удалены наиболее крупные загрязненные фрагменты, в ряде мест радиоактивный грунт либо перемещен к завалу с западной стороны блока, либо загружен в контейнеры. Часть снятого грунта, мусор и элементы завалов вывозились в места захоронения..., шла постоянная засыпка территории чистым грунтом и укладка на его поверхность бетонных плит» (см. Главу 1).

В результате количество топлива — $M_{л.з.}$, выброшенного в непосредственной близости от аварийного блока, определить прямыми измерениями стало невозможно.

Поэтому во всех дальнейших оценках этой величины использовались результаты работ, выполненных в конце мая двумя группами — «Радиевого института» и объединенной группой специалистов КИ и Министерства геологии. С помощью вертолетов они выполнили подробную съемку карты гамма-полей над площадкой и над блоком. До этого имелись лишь результаты «пешеходной съемки» и съемок с бронетехники.

¹Еще раз напомним, что локальная зона (см. рис. 1, 2) — часть площадки «Укрытия», непосредственно примыкающая к блоку № 4 ЧАЭС, оборудованная средствами физической защиты и специально охраняемая. Она входит в состав объекта.

От окружающей территории локальную зону отделяет существующее двойное ограждение, железобетонное — внутреннее и сетчатое — наружное, примыкающее с восточной — к главному корпусу. С западной стороны локальная зона ограничена железобетонной оградой.

На территории локальной зоны располагается ряд временных сооружений, обеспечивающих эксплуатацию объекта «Укрытие». Пропуск персонала и проезд автотранспорта на территорию локальной зоны ОУ осуществляют через контрольно-пропускные пункты. КПП расположены в периметре охраняемой зоны промплощадки ЧАЭС в юго-западной части локальной зоны.

²См. Главу 13.

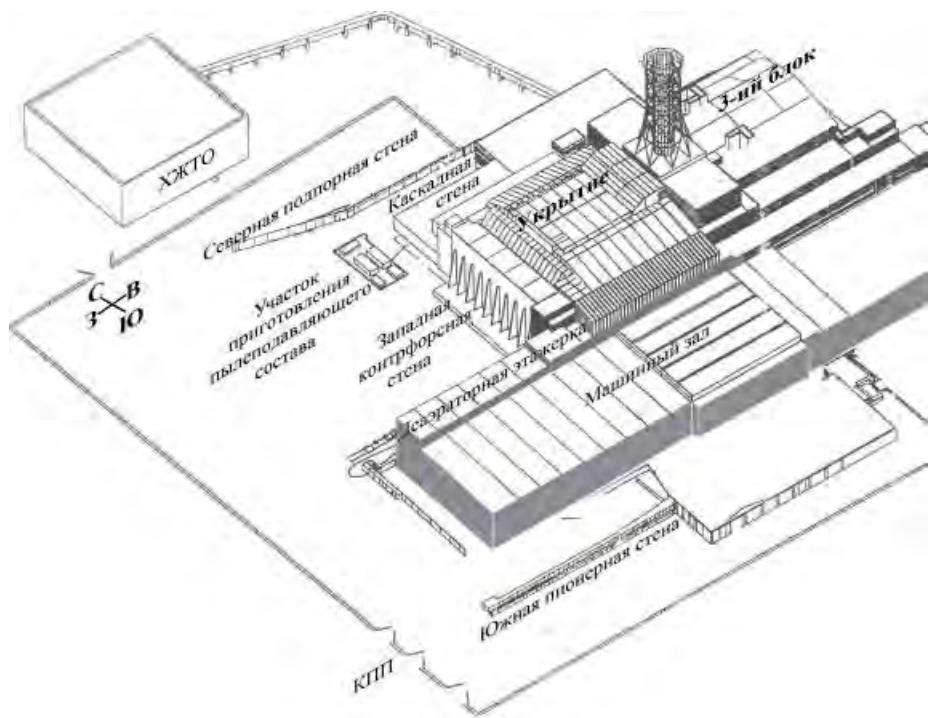


Рис. 1. Объект «Укрытие» и его локальная зона



Рис. 2. Объект «Укрытие» и его локальная зона (вид с вертолета)

Первыми начали работать сотрудники РИ (22 мая) [1, 2].

Съемка велась с вертолета Ми-8Т, пролетавшего вдоль зданий ЧАЭС. В результате этих полетов территория была покрыта «сеткой» с шагом около 50 м в районе 4-го блока ЧАЭС и с шагом 100 м на остальных участках. Для сканирования поверхности с высоты 200–300 м использовался коллимированный детектор с кристаллом NaI(Tl).

Свинцовый коллиматор обеспечивал поле обзора на поверхности земли около 40 м в диаметре.

Для калибровки показаний прибора была выбрана площадка вне территории ЧАЭС, загрязненность которой была определена с помощью отбора почвенных проб³.

В ходе работы были получены данные о плотности поверхностного загрязнения топливом, выброшенным в результате аварии.

После проведения измерений была опровергнута гипотеза о том, что значительное количество топлива находится в машинном зале. Это прямо следовало из сравнения спектров регистрируемого излучения, измеренных на трех разных участках территории (рис. 3).

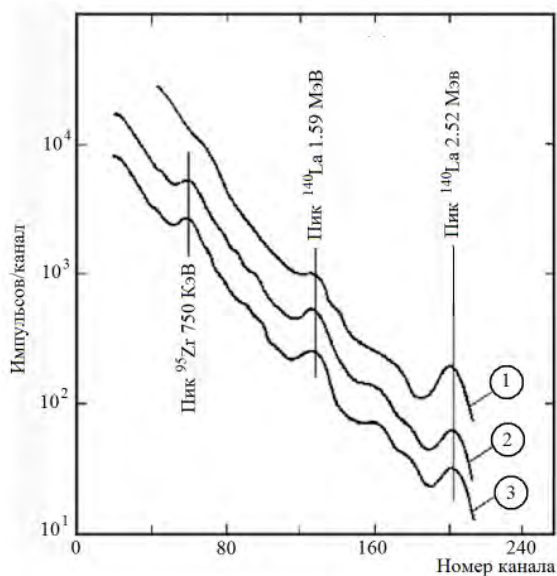


Рис. 3. Аппаратурные спектры гамма-излучения, измеренные коллимированным датчиком на высоте 200 м над территорией ЧАЭС: 1 — над зоной 4-го блока, 2 — над крышей машинного зала, 3 — над асфальтированным проездом [2]

³«На расстоянии около 1,5 км от площадки АЭС был выбран открытый участок загрязненной местности и проведен отбор нескольких проб почвы. Путем прямых гамма-спектрометрических измерений было установлено, что на 1 м² этого участка присутствует 0,28 г топлива (по содержанию ¹⁴¹Ce и ¹⁴⁴Ce). Этот участок был использован как база для сравнения при вертолетной гамма-съемке. Над ним на высоте 300 м были откалиброваны показания гамма-датчика, и далее все интенсивности привязывались к этой величине. К сожалению, первоначальные данные по содержанию урана были завышены, поэтому первоначальная калибровка, проведенная 28 мая, давала завышенные содержания топлива на 1 м².

После проведения радиохимического анализа проб с этого участка в июле в Ленинграде калибровка была пересмотрена в меньшую сторону [2]».

Вот что пишут авторы работы:

«Глядя на спектр 2 (над машинным залом), мы видим то же соотношение интенсивностей линий ^{95}Zr и ^{140}La , что и в спектре 3, и можем заключить, что самопоглощение (признак толстого слоя) в нем отсутствует».

Значит, источником излучения в районе машинного зала является тонкий слой продуктов выброса, скорее всего на крыше зала. На спектре 1 (над зоной реактора) самопоглощение в источнике настолько сильное, что линия ^{95}Zr в районе 750 кэВ практически незаметна по сравнению с более жесткими линиями 1,59 и 2,52 МэВ ^{140}La .

Таким образом, даже сравнение спектров, снятых с разных участков площадки, дает информацию о характере загрязнения».

Результаты измерений представлены на рис. 4.

По оценкам РИ, полное количество выброшенного (и не удаленного к моменту измерений) на площадку топлива (по U) составляло $\text{Мл.з} = 750 \text{ кг}$, погрешность оценивается авторами в 30 %.

Измерения, выполненные объединенной группой «Курчатовского института» и Министерства геологии [3].

В период с 30.05.86 г. по 09.06.86 г. осуществлялась программа по измерению гамма-полей над развалом реактора и вблизи от разрушенного блока с помощью вертолетного измерительного комплекса Ка-32Ч. Этот комплекс позволял при высоте полета 200 м и выше над уровнем исследуемой поверхности проводить ее сканирование по мощности экспозиционной дозы (см. рис. 5).

В ходе работы были сняты картограммы полей МЭД зоны реактора, северного и южного барабанов-сепараторов, деаэрационной этажерки, а также зон машинного зала, локальной зоны и т.п. Было проведено около 2000 измерений участков поверхности площадью от $10 \times 10 \text{ м}^2$ до $20 \times 20 \text{ м}^2$.

Большой интерес представляет картограмма относительного распределения активности на площадке станции (рис. 6), содержащая значительно меньшие погрешности, чем абсолютное распределение.

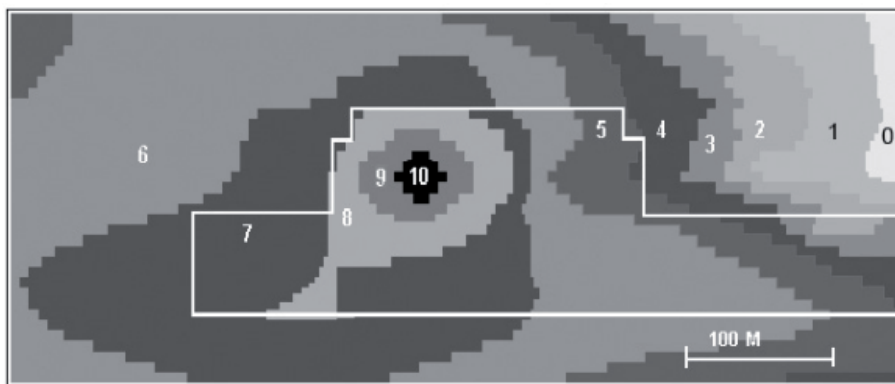


Рис. 4. Картограмма интенсивностей гамма-излучения по данным вертолетной аэрогамма-съемки над территорией ЧАЭС. Цифры означают оценки плотностей загрязнения (в пересчете на массу топлива), г/м^2 : 0 – менее 0,5; 1 – 0,5; 2 – 0,8; 3 – 1,2; 4 – 1,8; 5 – 3; 6 – 5; 7 – 8; 8 – 12; 9 – 18; 10 – оценить не удастся (интенсивность велика, но пересчитать ее в количество нельзя, поскольку неизвестно самопоглощение в зоне и в различных материалах засыпки) [2]



Рис. 5. Сканирование в локальной зоне (западная сторона). На снимке виден кабель-трос прибора. Кругом обозначена площадь обзора детектора [3]

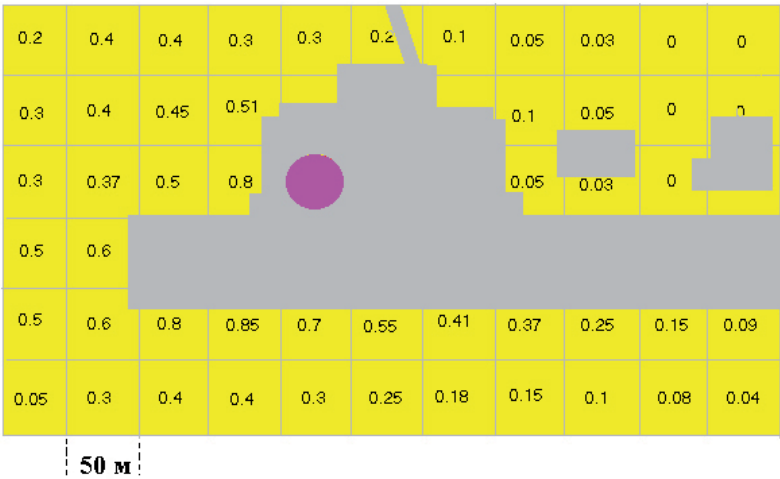


Рис. 6. Результаты вертолетных измерений количества топлива, выброшенного на площадку (относительные единицы) [3, 4]

Полученные данные позволили оценить количество топлива на площадке вокруг разрушенного блока, $M_{л.з} = 600$ кг (точность не лучше 50%).

Совокупность измерений обеих групп дала возможность построить наиболее достоверную картограмму распределения топливных загрязнений, усредненную по квадратам 50×50 м².

Для этого был применен метод, при котором данные количественных измерений РИ усреднялись и наносились на схему относительных измерений «Курчатовского института».

Затем, по специальной программе, рассчитывался наиболее вероятный коэффициент перехода. Окончательные оценки представлены на рис. 7.

Количество топлива на площадке вокруг «Укрытия» (вне пределов современного контура здания) согласно обобщенным данным $M_{л.з} = 600$ кг с погрешностью от – 30% до +50%.

Как уже говорилось, повторить вертолетные измерения стало невозможным уже по прошествии нескольких недель после их окончания.

15.1.2. Радиационные поля в локальной зоне

Распад короткоживущих радиоактивных изотопов и энергичные меры по очистке и дезактивации привели к тому, что уже через несколько месяцев после аварии радиационные поля в локальной зоне «Укрытия» уменьшились на два, а в ряде мест и на три порядка.

В первые годы после аварии они продолжали достаточно быстро падать.

В качестве примера на рис. 8 приведена радиационная обстановка в локальной зоне «Укрытия», измеренная 30 июня 1991 г.

По прошествии >10 лет подавляющая величина внешнего облучения за счет γ -квантов стала определяться загрязнениями почвы и сооружений изотопом ¹³⁷Cs и, соответственно, уменьшалась с периодом полураспада ~30 лет (рис. 9).

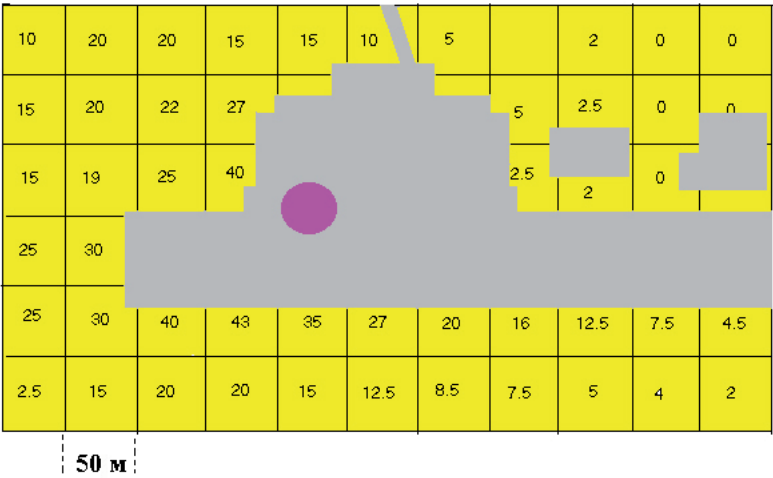


Рис. 7. Результаты вертолетных измерений количества топлива, выброшенного на площадку (в кг на площади 50×50 м²) [4, 5]

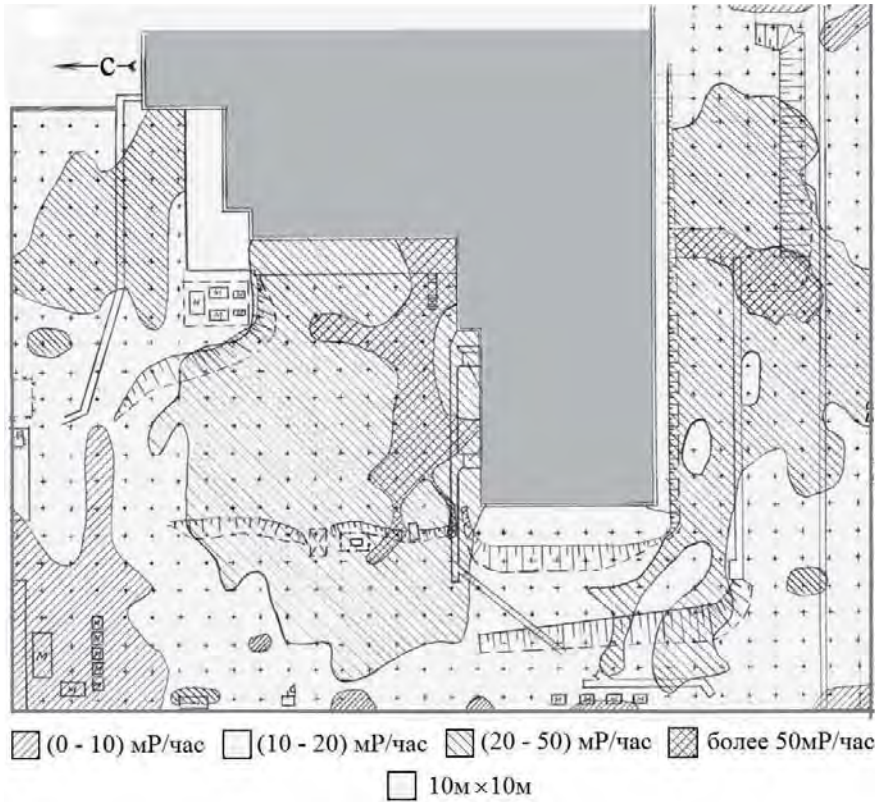


Рис. 8. Радиационная обстановка в локальной зоне «Укрытия» по состоянию на 30 июня 1991 г. на 1 м от поверхности земли (страница рабочего журнала)

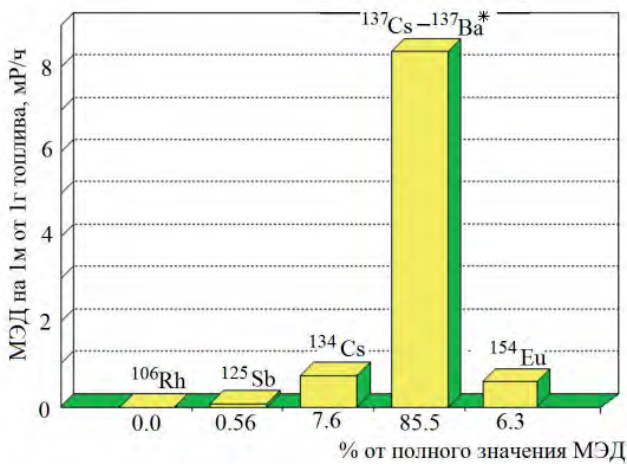


Рис. 9. Вклад различных радионуклидов в МЭД на 1 м от 1 г топлива через 10 лет после аварии

К моменту развертывания работ по преобразованию объекта (через ~12 лет после создания «Укрытия») обстановка на площадке ЧАЭС выглядела так, как это показано на рис. 10.

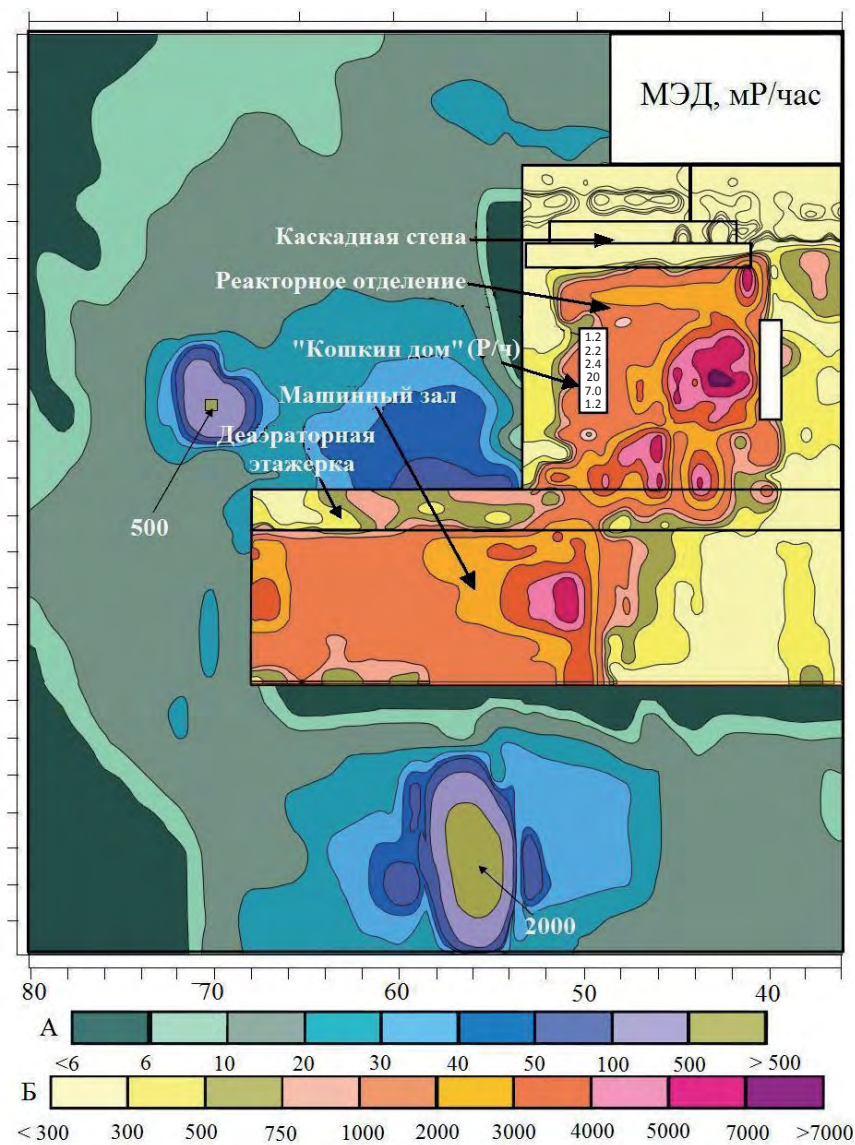


Рис. 10. Карта-схема величин МЭД в локальной зоне «Укрытия» на 1 м от поверхности земли (по данным на 12.11.98 г. — шкала А) и на его кровлях на 1 м от поверхности (по данным на 24.09.98 г. — шкала Б)

15.1.3. Программа «Сияние»

В 1992 г. был объявлен, а в 1993 г. проведен международный конкурс на проект преобразования объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему. В следующем году консорциум «Alliance» во главе с французской компанией «Campeon Bernard SGE», выигравший конкурс, приступил к работе по созданию ТЭО на «Укрытие-2»⁴.

⁴Подробнее о многолетних работах по преобразованию «Укрытия» в экологически безопасную систему будет рассказано в последней части работы.

В ходе подготовки конкурса стало ясно, что практически для всех представленных проектов, как предусматривающих возведение «Укрытие-2» непосредственно над старым объектом, так и надвижение на этот объект уже готового нового здания, построенного на некотором удалении, необходимы данные о дозовых полях вблизи «Укрытия» вплоть до высот ~ 70 м.

Поэтому МНТЦ совместно с «Курчатовским институтом» с 1992 г. начало подготовку, а затем и выполнение работ по изучению полей МЭД на различных высотах над площадкой объекта (программа «Сияние») [4], [6, 7].

В 1993 г. на базе серийного дозиметра ДРТ-01Т были разработаны и изготовлены с учетом особенностей их эксплуатации дозиметрические комплексы, предназначенные для дистанционного измерения мощности экспозиционной дозы.

Их основной конструктивной особенностью являлось разделение серийного прибора на два автономных блока.

Один из них — «детекторный», который мог доставляться в точку измерений с помощью различных подъемных устройств (штанг, кранов, шаров-зондов и т.п.).

Другой блок — «регистрирующий». Он должен был находиться у оператора, принимать сигналы от детекторного блока и преобразовывать их в значения МЭД.

Вес детекторных блоков не превышал 300 г.

Связь между детекторными и принимающими блоками осуществлялась при помощи длинного кабеля или с использованием специального радиоканала.

Уже первые измерения показали, что дозовое поле вокруг объекта «Укрытие» неоднородно и во всех точках промплощадки наблюдается устойчивая тенденция к увеличению МЭД с ростом высоты над поверхностью земли. В отдельных областях это увеличение при изменении высоты от 1 м до 70 м составляло почти порядок.

Основные измерения были выполнены в 1994 г.

Методика их выполнения приведена в таблице 1.

Таблица 1. Методы измерения, использованные в программе «Сияние»

Высота точки измерения над поверхностью земли	Метод измерения
~ 1 м	Обычная дозиметрическая разведка
~ 10 м	Использование специальных штанг. Связь детекторного блока с принимающим блоком осуществляется кабелем.
(10–50) м	Использование подъемной платформы
(30–70) м	Использование шаров-зондов, заполненных гелием. Связь детекторного блока с принимающим блоком осуществляется по радиоканалу.

Результаты измерений для двух высот (1 м и 50 м) представлены на рис. 11 и 12.

Возрастание МЭД с высотой было ожидаемым результатом.

Действительно, эффективная толщина «защиты» внешней среды от проникающего из «Укрытия» излучения на верхних отметках существенно меньше, чем на нижних отметках.

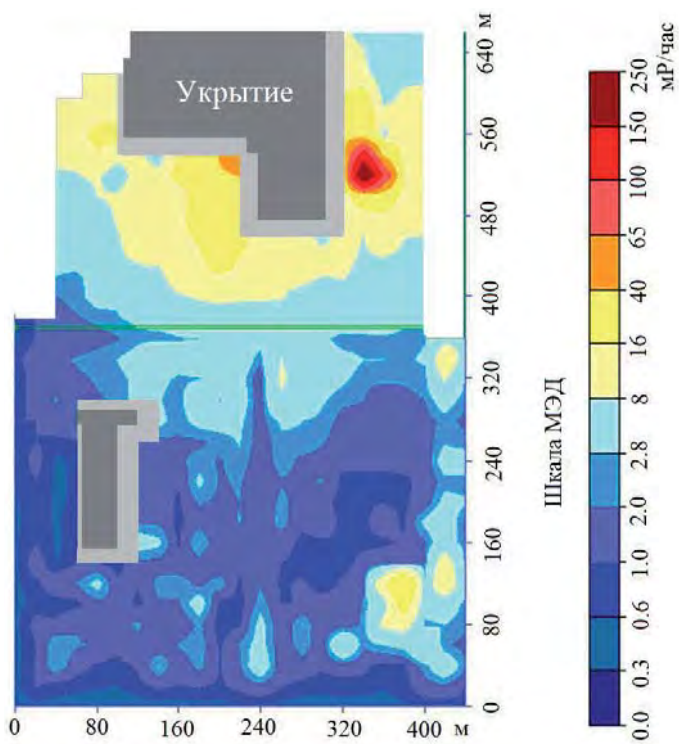


Рис. 11.Картограмма дозовых полей на площадке объекта. Измерения велись на высоте 1 м от поверхности грунта

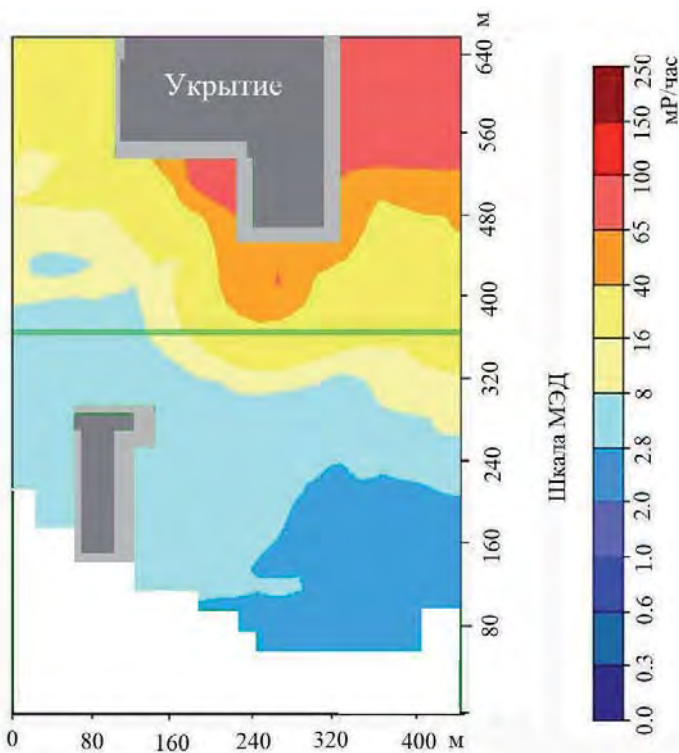


Рис.12.Картограмма дозовых полей на площадке объекта. Измерения велись на высоте 50 м от поверхности грунта

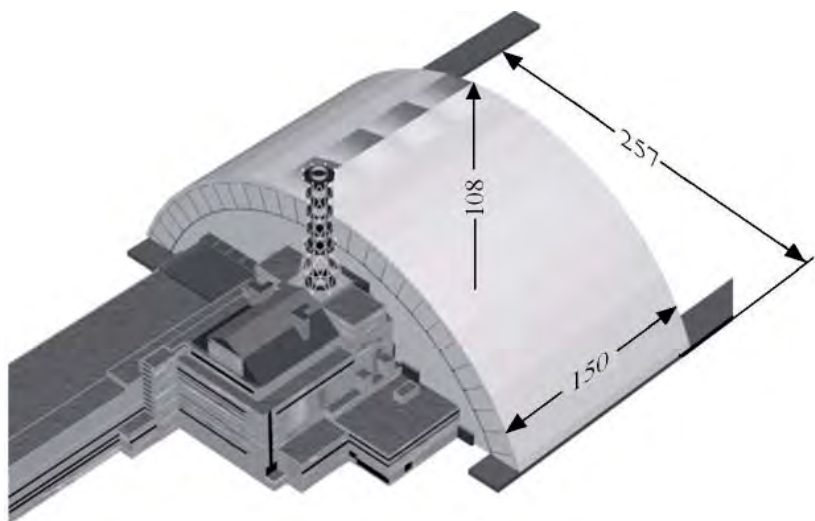


Рис. 13. Новый безопасный конфаймент — «Арка» на завершающей стадии строительства (надвинут на объект «Укрытие»). Показаны его основные размеры (вид с северо-востока)

В 2003 г. в рамках подготовки к строительству на площадке «Укрытия» нового безопасного конфаймента — «Арки» (см. рис. 13) консорциумом КСК (МНТЦ*КИЭП*НИИСК) было повторно проведено дистанционное измерение объемных гамма-полей с привязкой к местам проведения будущих работ [8, 9, 10].

Измерения выполнялись с большей тщательностью и в большем количестве точек, чем ранее (было обследовано около 3000 пространственных точек на разных высотах).

Измерялась не только величина МЭД, но и угловые и энергетические распределения гамма-излучения, а также моделировалась биозащита.

В рамках поставленной задачи была разработана методика измерений МЭД, предусматривающая применение газового аэростата или метеозонда для подъема датчиков на заданные высоты⁵.

Использовались дозиметры PDE-4 и PD-3i⁶.

⁵Опыт, приобретенный при проведении работ по измерению МЭД гамма-излучения, показал необходимость создание нового средства подъема — аэростата с полезной грузоподъемностью 2–3 кг.

Изготовленный на базе МНТЦ «Укрытие» аэростат имел две оболочки: внутреннюю — герметичную и наружную — «прочную», изготовленную из парашютного шелка. Технические характеристики аэростата: объем — 5,8 м³; масса — 3,8 кг; полезная подъемная сила при заполнении гелием — 2,6 кг.

⁶Мобильный приемо-передающий дозиметр PDE-4 системы RadStar использовался для выполнения дистанционных измерений МЭД в контрольных точках и передачи результатов измерений по радиоканалу на базовую станцию PDX-4 RaDBase.

Электронный дозиметр PD-3i использовался для измерения дозы и мощности дозы в местах выполнения работ, для контроля облучения персонала и, совместно с PDE-4, в контролируемых точках для повышения достоверности измерений.

При проведении измерений несколько дозиметров одновременно подвешивались к аэростату на разных высотных отметках.

На рис. 14 и 15 показана подготовка к измерениям газового аэростата и метеозонда.

Измерения были разбиты на две фазы.

На первой фазе проводились измерения МЭД гамма-излучения для трех вертикальных плоскостей, которые проходит «Арка» при своем движении от места сборки.

На второй фазе были проведены измерения для двух участков: в зоне монтажа «Арки» и в зоне строительства технологического комплекса.

Для подробного ознакомления с методами проведения работ и полученными результатами мы отсылаем читателя к работам [8, 9]. Один из этих результатов — модели гамма-полей в зоне возведения НБК приведены на рис. 16.



Рис. 14. Установка аэростата в рабочее положение для измерения значения МЭД в намеченной точке



Рис. 15. Установка метеозонда в рабочее положение для измерения значения МЭД в намеченной точке

15.2. Загрязнения почвы в локальной зоне «Укрытия»

Частично сняв загрязненный поверхностный слой грунта около аварийного блока, покрыв площадку бетонными плитами и засыпав чистыми материалами — песком, щебнем и т.п., строители решили важнейшую задачу — обеспечили возможность относительно безопасного проведения работ вокруг объекта.

В результате в локальной зоне возникла сложная последовательность почвенных слоев, о которой уже говорилось в 1 части настоящей работы (см. рис. 3, Глава 1, и таблицу 2 настоящей Главы).

Такая структура почвы поставила перед исследователями ряд вопросов, связанных, прежде всего, с «активным слоем».

Во-первых, какую опасность он может представлять при перемещении грунта, особенно в связи с будущими масштабными работами по преобразованию «Укрытия».

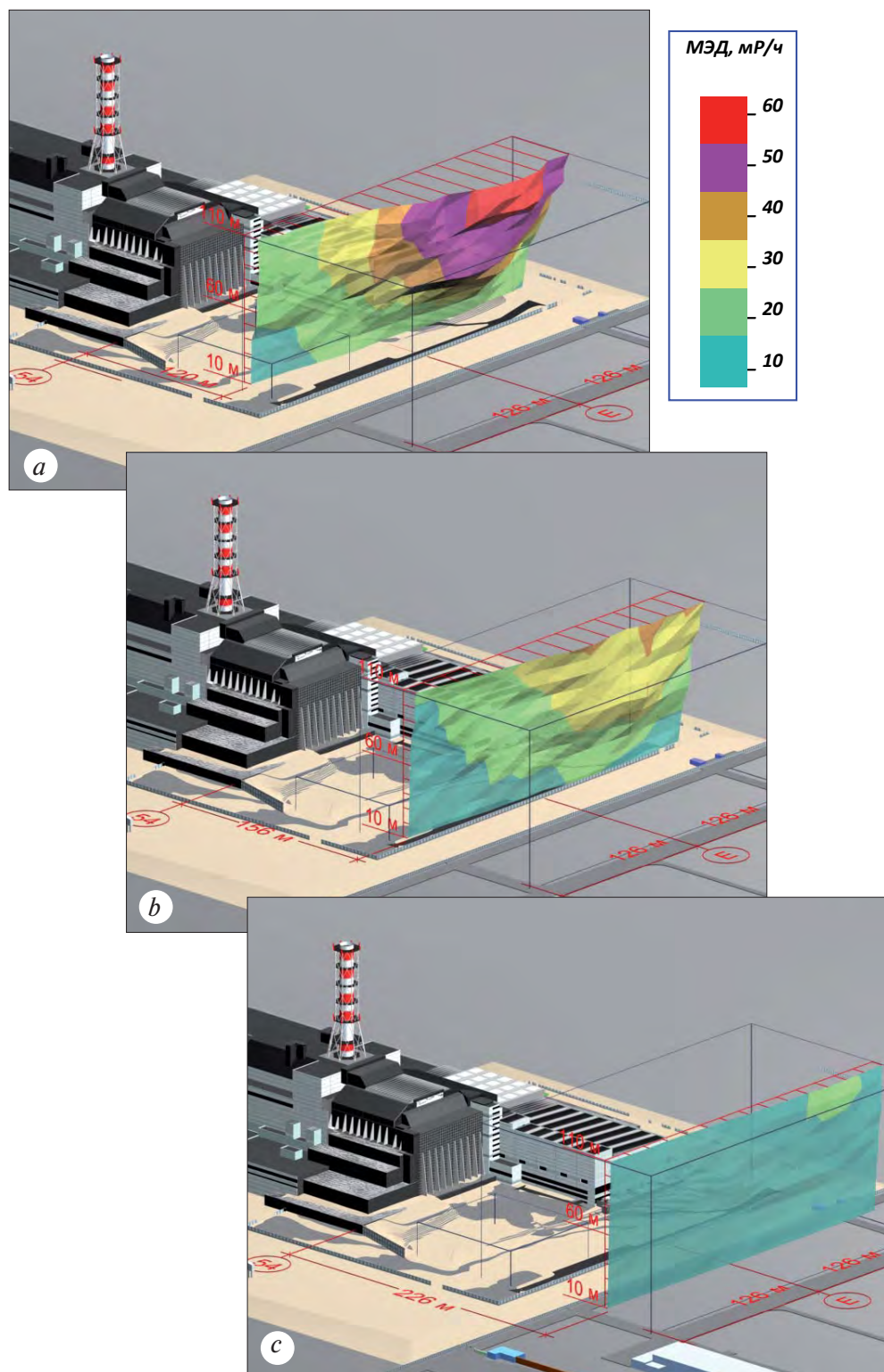


Рис. 16. Модель гамма-поля в зоне возведения НБК (июнь 2004 г.): а — сечение по оси (54 + 120) м; б — сечение по оси (54 + 156) м; в — сечение по оси (54 + 226) м

Таблица 2. Характеристики геологической модели разреза локальной зоны «Укрытия» (указаны первые 4 зоны)

№ зоны	Геологический разрез		
	Зоны, выделенные по:		Литологический состав зон
	физико-химическим условиям	стратиграфическим условиям ⁷	
I	Зона аэрации ⁸		Щебень, гравий, бетон, сухая бетонная смесь, шлак, песок
II			Почвенно-растительный слой, песок, бетон
III			Строительный мусор, песок, супесь
IV	Зона насыщения ⁹	Колебания УГВ	Естественные отложения
			Пески различной зернистости, супесь, суглинки, фрагменты строительных конструкций

Во-вторых, насколько велико его влияние на загрязнение грунтовых вод. Ведь через этот слой фильтруются все выпадающие осадки.

Возникал и такой вопрос — попадают ли воды из разрушенного блока в грунт, насколько велико их влияние на загрязнение грунтовых вод.

И, хотя в первое время (1988–89 гг.) основные усилия сотрудников КЭ сосредотачивались на исследованиях, проводимых непосредственно в «Укрытии», со второй половины 1991 г. начались работы по изучению загрязненности почвы и грунтовых вод в локальной зоне объекта.

Осуществляемая программа измерений получила название «Ареал». Основным методом исследования стало бурение скважин¹⁰, проведение радиометрических и радиохимических анализов извлекаемых кернов, гамма-каротаж, отбор и анализ проб грунтовой и поровой¹¹ воды.

Сложность выполнения вышеперечисленных задач заключается в достижении такой технологии бурения и оснастки скважин, при которой гарантированно бы не допускалось перемешивание различных литологических слоев с различными физико-химическими параметрами и фильтрационными свойствами, а как следствие — различным содержанием и составом радионуклидов. Особенно важно было не переместить при бурении основной активный слой.

Во второй половине 1991 года у северной границы промплощадки объекта «Укрытие» были заложены первые три одиночные исследовательские скважи-

⁷Стратиграфия — взаимное расположение культурных слоев относительно друг друга и перекрывающих их природных пород.

⁸Зона аэрации расположена выше уровня грунтовых вод.

⁹Верхняя граница зоны насыщения проходит по поверхности грунтовых вод.

¹⁰Хотя в локальной зоне уже существовали скважины, они после аварии и мероприятий по очистке площадки оказались недостаточно информативны для предлагавшихся исследований.

¹¹Поровые воды насыщают пористые породы — галечники, пески, слабо сцементированные песчаники, супеси, суглинки и т.п.

ны (1-Г–3-Г), пересекающие водоносный горизонт, с глубинами 9–10 метров, которые имели чисто разведывательный характер. Они были снабжены фильтровыми колоннами и отстойниками. В конце 1992 года были пробурены экспериментальные наблюдательные скважины трех «кустов» (Г-4–Г-6)¹², расположенных фронтом, поперек направления движения подземных грунтовых вод через промплощадку, причем куст Г-4 располагался в пяти метрах от каскадной стены 4-го энергоблока, а наиболее отдаленный от блока куст Г-6 – в 150 метрах западнее, на самом краю промплощадки. Расположение действующих скважин показано на рис. 17.

По программе «Ареал» предполагалось провести бурение наблюдательных скважин и в южной части локальной зоны, выше «Укрытия» по течению ГВ.

В этом случае, сравнивая данные по содержанию минеральных солей и радионуклидов в подземных водах выше и ниже объекта, можно было бы легче выявить его влияние на загрязненность ГВ. К сожалению, целый ряд объективных причин не позволил сразу осуществить этот план.

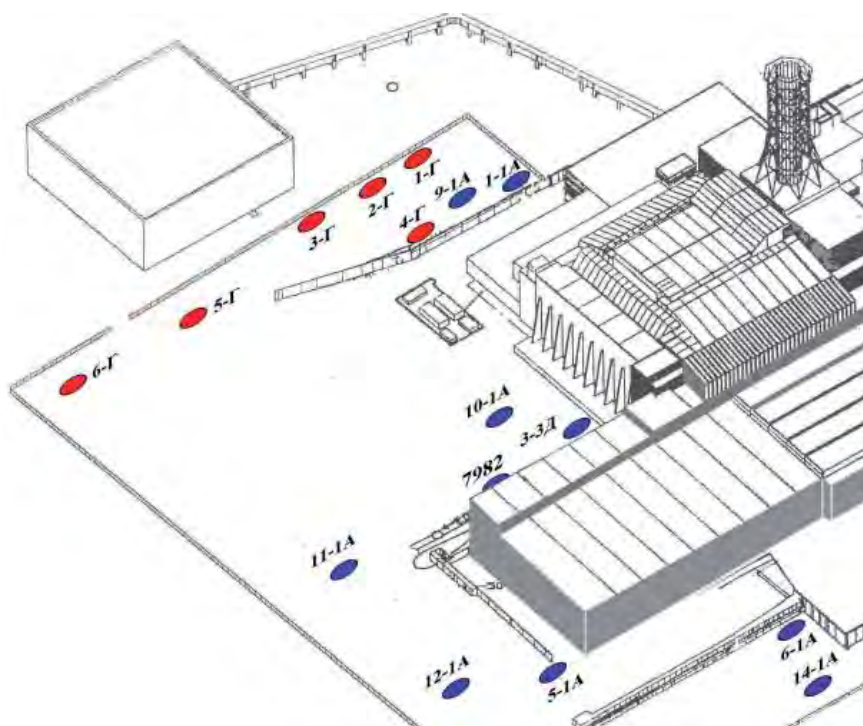


Рис. 17. Локальная зона «Укрытия». Места размещения скважин 1-Г–6-Г отмечены красным цветом. Несколько других наблюдательных скважин, которые упоминаются ниже, отмечены синим цветом

¹²Кусты 4-Г и 6-Г состоят из центральной и 4-х периферийных наблюдательных скважин. Глубина последних составляет от 2 до 6,6 м (интервал зоны аэрации). 5-Г имеет одну наблюдательную скважину глубиной 5,3 м. Периферийные наблюдательные скважины предназначались для отбора поровой воды на глубине большей, чем глубина «активного слоя». Использовались они относительно недолго, поскольку появилось подозрение, что в процессе бурения все-таки произошло загрязнение грунта активностью из вышележащего слоя.

Материаловедческие исследования кернов, извлекаемых при бурении, радиометрический и радиохимический анализы взятых из них проб (см., например, [11, 12]), а также результаты, полученные при проведении гамма-каротажа скважин, дали возможность приступить к количественному определению загрязненности грунтов в локальной зоне.

На основании исследований кернов был создан геолого-литологический разрез по скважинам 1Г–3Г и 5Г–6Г (рис. 18). На рисунке видно расположение основных почвенных слоев на этом участке локальной зоны.

Радиометрический и радиохимический анализы проб показал, что первоначальные предположения о существовании относительно компактного «активного» слоя (для скважин 1Г – 6Г его толщина составляла $10 \div 20$ см) полностью подтвердились (см. рис. 18).

В таблице 3 приведены результаты измерений МЭД в 6 скважинах при гамма-каротаже «активного» слоя, а на рис. 19 данные, полученные при опускании гамма-детектора в скважину 1Г (от поверхности до глубины 8,8 м).

На основании полученной информации были сделаны первые оценки количества ядерного топлива, выброшенного при аварии на север локальной зоны. Результаты по порядку величины не противоречили данным вертолетных измерений (см. рис. 7).

В июне 1993 г. был проведен «Международный Конкурс по разработке проекта преобразования объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС в экологически безопасную систему».

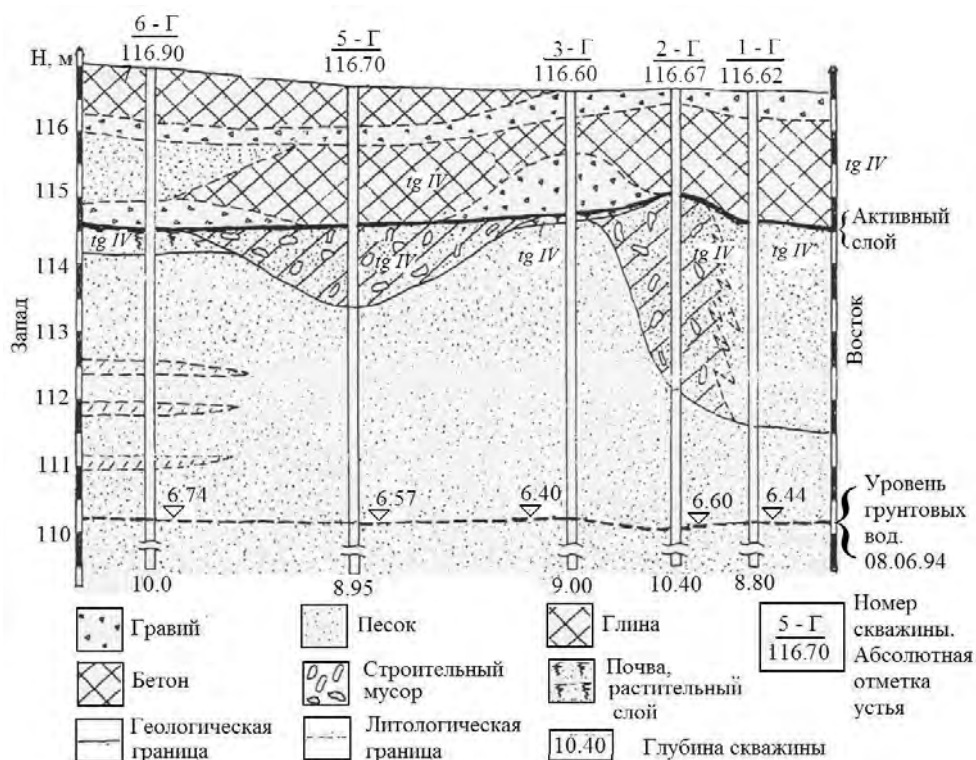


Рис. 18. Геолого-литологический разрез (упрощенный) по скважинам 1Г–3Г и 5Г–6Г. Масштаб горизонтальной шкалы – 1:100, масштаб вертикальной шкалы – 1:50. Уровень грунтовых вод – максимальный в 1994 г. (8 июня)

Таблица 3. Результаты измерений МЭД в скважинах 1Г–6Г при гамма-каротаже «активных» слоев

№ скважины	Глубина залегания «активного» слоя и его ширина, м от – до – м	Значение МЭД по данным гамма-каротажа, мР/час	Активность ¹³⁷ Cs по данным интерпретации гамма-каротажа, Бк/г
1–Г	1,7–1,8–0,10	360	55500
2–Г	1,65–1,8–0,15	645	125800
3–Г	1,8–2,0–0,20	187	48100
4–Г	2.70–2.80–0.10	2190	407000
5–Г	2,38–2,48–0,10	20	518
6–Г	2,6–2,7–0,10	60	11840

Подавляющее большинство представленных проектов (в том числе и занявшие первые места) предусматривали проведение масштабных земляных работ в локальной зоне объекта – перемещение и удаление больших объемов грунта.

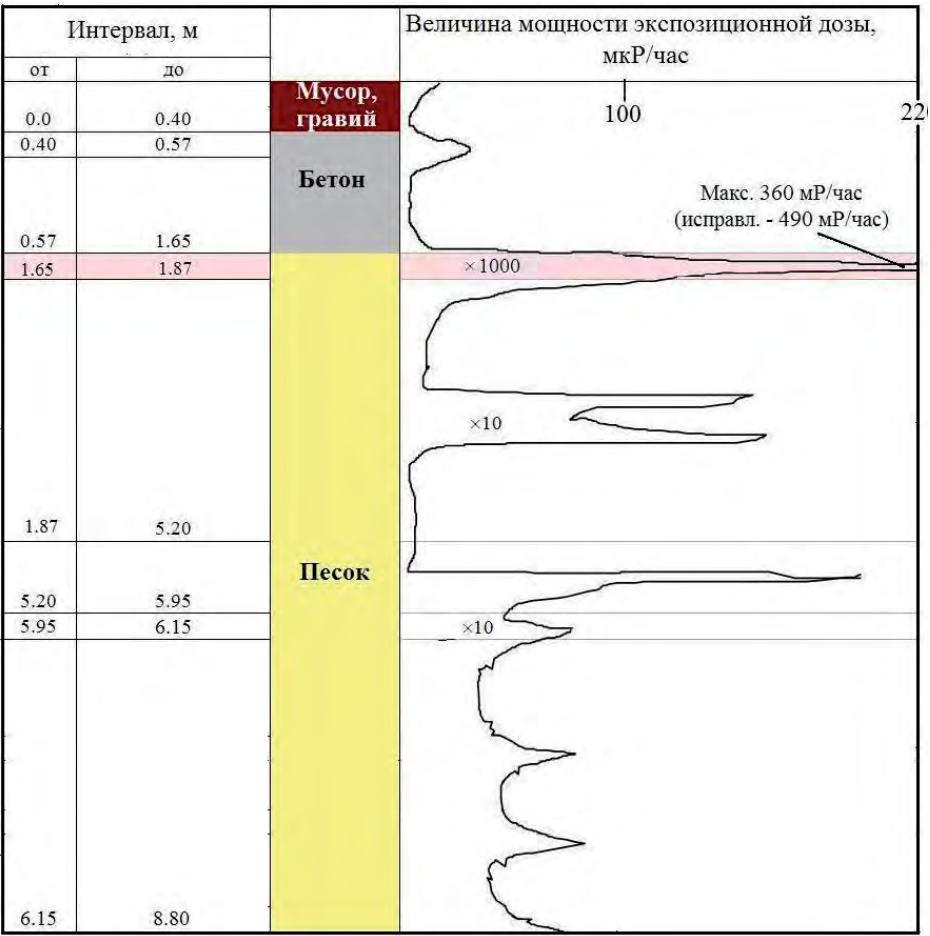


Рис. 19. Результаты гамма-каротажа скважины 1Г. Приведено значение максимальной дозы в «активном» слое (360 мР/час), исправленное с учетом поглощения излучения обсадными трубами (490 мР/час)

Поэтому в середине 90-х годов работы по исследованию загрязнения грунта и ГВ интенсифицировались. При этом стали активно использоваться дополнительные скважины, пробуренные на площадке объекта «Укрытия»¹³.

Участие в этих работах сотрудников ОЯРБ МНТЦ (и КИ) постепенно уменьшалось, и возрастала роль специалистов других подразделений МНТЦ (ИПБ АЭС), ЧАЭС, учреждений НАН Украины и др. К концу 90-х — началу 2000-х годов сложился коллектив, исследования которого стали определяющими в вопросах, связанных с загрязнениями почвы и грунтовых вод в локальной зоне (см., например, работы [13–17]).

Вот некоторые данные из этих работ.

По результатам анализов проб из кернов, извлеченных при бурении скважин, были оценены удельные активности плутония, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am и количество урана в различных слоях грунтов ЛЗ (см. таблицу 4 [14]).

Таблица 4. Распределения удельных активностей и концентраций радионуклидов в грунтах локальной зоны объекта «Укрытие» по пробам из кернов скважин

Грунты	¹³⁷ Cs, Бк/г	⁹⁰ Sr, Бк/г	Уран, мкг/г	²³⁸ Pu, Бк/г	(²³⁹ + ²⁴⁰)Pu, Бк/г	²⁴¹ Am, Бк/г
Послеаварийные техногенные	$2,0 \times 10^{-1} - 5,7 \times 10^2$	$2,0 \times 10^1 - 7,0 \times 10^1$	$2,0 \times 10^1 - 8,0 \times 10^0$	$2,1 \times 10^{-3} - 5,0 \times 10^{-1}$	$3,8 \times 10^{-3} - 1,0 \times 10^0$	$3,8 \times 10^{-3} - 1,0 \times 10^0$
«Активный» слой	$7,1 \times 10^2 - 1,9 \times 10^6$	$6,4 \times 10^2 - 2,0 \times 10^6$	$1,6 \times 10^0 - 2,2 \times 10^3$	$3,1 \times 10^0 - 1,6 \times 10^4$	$1,7 \times 10^0 - 3,0 \times 10^4$	$7,0 \times 10^0 - 3,9 \times 10^4$
Доаварийные техногенные	$4,1 \times 10^{-2} - 9,5 \times 10^3$	$5,1 \times 10^{-2} - 1,7 \times 10^4$	$1,7 \times 10^{-1} - 8,0 \times 10^0$	$4,0 \times 10^{-4} - 1,3 \times 10^2$	$9,1 \times 10^{-4} - 2,7 \times 10^2$	$7,1 \times 10^{-4} - 1,0 \times 10^0$
Естественные аллювиальные	$5,6 \times 10^{-2} - 4,76 \times 10^2$	$5,0 \times 10^{-2} - 1,2 \times 10^2$	$1,7 \times 10^{-1} - 1,4 \times 10^0$	$1,2 \times 10^{-3} - 1,6 \times 10^0$	$2,9 \times 10^{-3} - 2,5 \times 10^0$	$3,5 \times 10^{-3} - 1,8 \times 10^0$

Оценка полного [15, 16] количества ¹³⁷Cs в почве локальной зоны «Укрытия» дала значение $1,7 \cdot 10^{15}$ Бк (на 1998 г.), что соответствует ~0,6% от наработанного в реакторе 4-го блока. Используя данные по активности ¹³⁷Cs и корреляционные коэффициенты между радионуклидами, авторы [16] приводят следующие оценки их полной активности:

- ⁹⁰Sr — $1,7 \times 10^{15}$ Бк/г,
- ²³⁸Pu — $1,2 \times 10^{13}$ Бк/г,
- (²³⁹+²⁴⁰)Pu — $2,2 \times 10^{13}$ Бк/г,
- ²⁴¹Am — $3,0 \times 10^{13}$ Бк/г.

Далее они пишут: «На основании приведенных данных и использовании известной зависимости между количеством ¹³⁷Cs и количеством ядерного топлива была сделана оценка содержания ядерного топлива в грунтах промплощадки объекта «Укрытие», которая составила около $1,6 \text{ т} \pm 40\%$ ¹⁴. Это составляет менее 1% от количества топлива в активной зоне реактора на момент аварии.

¹³Работы проводились буровым участком объекта «Укрытие» в 1994–95 гг. Было оборудовано 10 кустов и 2 одиночные скважины. Из них фильтрационными колоннами снабжены 9 скважин различной глубиной от 9,6 до 16,0 м (9-1А, 10-1А, 11-1А, 12-1А, 13-1А, 14-1А) на участке пионерной стены от 20,5 до 33,0 м (5-1А, 6-1А, 7-1А).

¹⁴В окончательных выводах к статье приводится поправленное значение — $1,8 \text{ т} \pm 40\%$.

Расхождения с вышеприведенными подсчетами, выполненными РИ и ИАЭ, вероятно, связаны с последующим дополнительным привнесом на промплощадку ЧАЭС топливных частиц с бетонным раствором в процессе бетонирования помещений объекта «Укрытие» и завала в основании современных контрфорсной и каскадной стен».

По этому выводу можно сделать некоторые замечания.

Во-первых, неопределенность в измерениях выброса топлива в локальную зону с помощью вертолетных измерений — ($\pm 50\%$), скорее всего, занижена в силу того, что в конце мая — начале июня уже развернулись работы по засыпке площадки «Укрытия» чистыми материалами.

Во-вторых, погрешность метода, при котором количество топлива в грунтах ЛЗ определяется по корреляционным соотношениям (цезий-137/топливо), с нашей точки зрения, может превышать $\pm 40\%$ в силу особенностей выброса при аварии.

Напомним, что выброс состоял из двух компонент — топливной (радионуклиды в урановой матрице) и летучей (йод, цезий, благородные газы и т.п.).

Поэтому использование для всех участков локальной зоны единого корреляционного коэффициента (цезий-137/топливо), который, с одной стороны, определяется условием выброса на почву топливной компоненты, а с другой — характером оседания цезия, может привести к значительно большей погрешности (стоит вспомнить про цезиевые пятна).

Тем не менее из имеющихся данных следует, что количество выброшенного при аварии в локальную зону «Укрытия» топлива составляет менее 1% от находившегося в реакторе (как и утверждается в работе [16]).

По данным гамма-каротажа была построена карта изолиний гамма-поля в «активном» слое почвы в ЛЗ, приведенная на рис. 20.

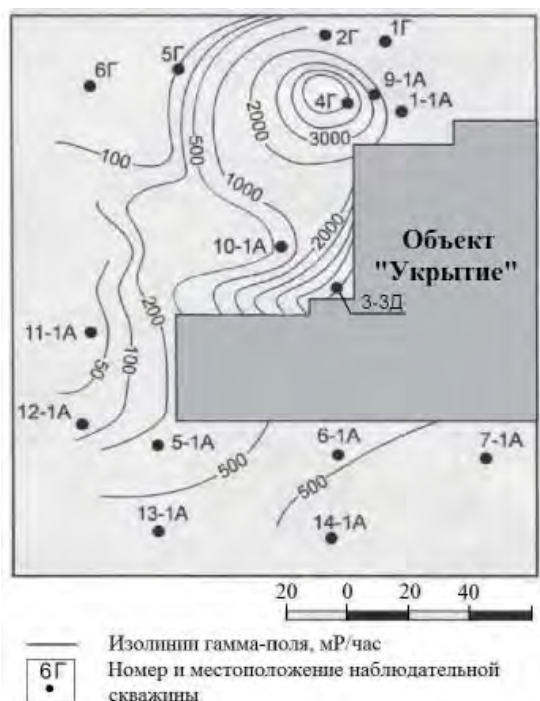


Рис. 20. Распределение значений гамма-поля (МЭД) «активного» слоя

Эта карта еще раз подтвердила необходимость принятия особых защитных мероприятий при вскрытии «активного» слоя.

Приведенные выше данные характеризовали общее распределение радиоактивных загрязнений в грунтах активной зоны.

Вместе с тем планируемые на площадке «Укрытия» мероприятия (с 1997 г. в рамках SIP) требовали более детальной информации, которая могла бы быть использована на стадии проектирования. Она должна была помочь в обеспечении безопасного проведения работ в конкретных местах ЛЗ и в организации обращения с радиоактивными отходами.

Это и определило направления дальнейших исследований.

Так, в работе [15] (2001 г.) говорится:

«Итогом собранных и проанализированных материалов явилось районирование и схематизация территории локальной зоны объекта «Укрытие» по радиационным условиям в насыпных грунтах, видам и условиям захоронения радиоактивных материалов в послеаварийных техногенных грунтах и образованиях, включая пионерную и каскадную стены.

По сходности условий захоронений, величин удельных активностей и мощностей экспозиционной дозы (МЭД) по скважинам в районе объекта «Укрытие» были выделены участки и зоны. Зоны (слои) отражают закономерности распределения радионуклидов по глубине, а участки по площади» (см. рис. 21 и таблицу 5).

Следующие шаги, которые позволили значительно продвинуться в детализации картины распределения р/а загрязнений в грунтах ЛЗ, состояли в совершенствовании и обосновании применяемых методов гамма-каротажа и использовании ГИС-технологий (см., например, [17, 18]).

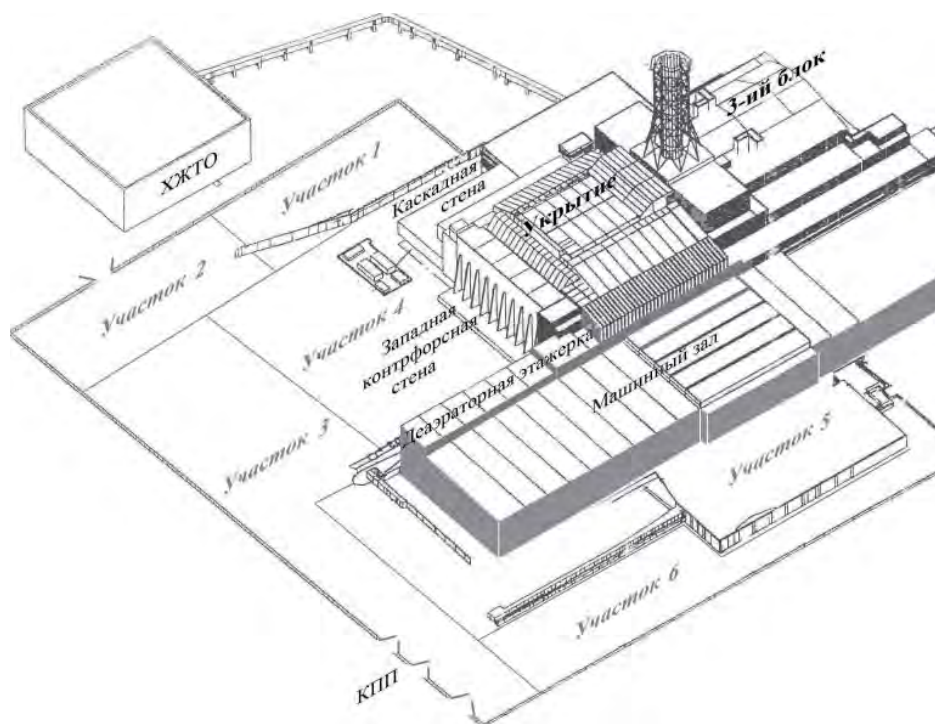


Рис. 21. Схема расположения выделенных участков в локальной зоне «Укрытия»

Таблица 5. Оценка количества ¹³⁷Cs в грунтах локальной зоны объекта «Укрытие»

Номер участка	Количество ¹³⁷ Cs, Бк по зонам (слоям)			
	I (Послеаварийные грунты)	II («активный» слой)	III (Доаварийные техногенные грунты)	IV (Естественные грунты)
1	1,4×10 ¹²	1,2×10 ¹²	—	2,1×10 ¹²
2	5,2×10 ¹²	8,3×10 ¹³	7,6×10 ¹²	8,1×10 ¹¹
3	1,3×10 ¹³	8,8×10 ¹¹	1,2×10 ¹¹	6,8×10 ¹⁰
4	3,0×10 ¹³	1,3 × 10 ¹⁵	1,1×10 ¹³	1,6×10 ¹²
5	4,9×10 ¹³	1,4×10 ¹⁴	1,9×10 ¹³	1,8×10 ¹¹
6	1,1×10 ¹³	3,5×10 ¹³	2,2×10 ¹²	6,2×10 ¹¹
Итого, Бк	1.1×10 ¹⁴	1,56×10 ¹⁵	4,0×10 ¹³	5,5×10 ¹²
Всего, Бк	1,7×10 ¹⁵		4,5×10 ¹³	

Для ознакомления с конкретными полученными результатами, на которых основывались прогнозы по распределению МЭД при вскрытии активного слоя в ЛЗ и оценке радионуклидного состава РАО извлекаемого грунта, мы отсылаем читателей к работам [19–20] и др.

15.3. Загрязнения грунтовых вод в локальной зоне «Укрытия»

15.3.1. Стена в грунте

Перейдем теперь к вопросам о загрязнении грунтовых вод в локальной зоне и опасности проникновения жидких радиоактивных отходов из «Укрытия» в грунт.

Как уже говорилось в Части 1, сразу после аварии вопрос о возможности прожигания расплавленным топливом фундаментной плиты 4-го блока и его проникновении в грунт вызывал особые опасения. Считалось, что это вызовет сильное загрязнение грунтовых вод и недопустимое распространение радиоактивности по бассейнам рек Припяти и Днестра.

Одной из превентивных мер по предотвращению такого процесса стало сооружение так называемой «стены в грунте».

Она должна была представлять собой водонепроницаемую стену, толщиной ~1 м, перекрывающую поток грунтовых вод и уходящую от поверхности земли до глубины более 30 м, где располагаются мощные слои глины, не пропускающие воду.

По проекту полная протяженность «стены в грунте» должна была составлять 8,5 км.

К работам по ее сооружению была привлечена итальянская компания Casagrande (см. [21]).

Однако «Китайский синдром» не реализовался. К осени 1986 г. визуальные наблюдения, проведенные разведывательными группами на нижних отметках

«Укрытия», нигде не подтвердили прожег или разрушение фундаментной плиты.

Этот факт так же, как измерения, доказавшие незначительность влияния грунтовых вод на загрязнение водоемов (по сравнению с первоначальным загрязнением и последующим смывом в них поверхностной радиоактивности), привели к тому, что в октябре строительство «стены в грунте» было прекращено. Ее фактическая длина составила 2,8 км, и располагается она в восточной части локальной зоны (см. рис. 22).



Рис. 22. Место расположения «стены в грунте» выделено оранжевым цветом (фото промплощадки ЧАЭС из Google Map) [21]

Единственным значимым результатом этого строительства стал подъем грунтовых вод на площадке объекта «Укрытие».

Следующим фактором, связанным с водой и вызвавшим особую тревогу Правительственной комиссии, стало предсказание многоводного паводка весной 1987 г.

Опять стал вопрос о возможности переноса не только поверхностными, но и грунтовыми водами большой радиоактивности из локальной зоны «Укрытия» в р. Припять. И, хотя расчеты и эксперименты (в том числе и выполненные в КИ) показывали, что опасения, связанные с ГВ в локальной зоне, многократно преувеличены, постоянно высказывались предложения вновь развернуть работы по защите от них водоемов.

Паводок подтвердил, что все опасения были безосновательными.

Из сказанного ясно, что достоверная и подробная информация о загрязнении ГВ и его динамике была необходимым компонентом для полноценного контроля над состоянием объекта «Укрытие» и его локальной зоны.

Осуществления этого контроля и было основной задачей программы «Ареал».

15.3.2. Гидрогеологическое строение промплощадки объекта «Укрытие»

Гидрогеологический разрез промплощадки объекта «Укрытие» представлен на рис. 23.

Верхний слой естественного грунта на ЧАЭС образовался в результате отложений из водных потоков, достигавших района станции при паводках, наводнениях и образовавшихся в старицах¹⁵ (в основном из средних и мелких песков).

Фундаменты блоков расположены на 6–8 м ниже этого слоя.

Глубина залегания уровня грунтовых вод в локальной зоне «Укрытия» изменяется от 4,5 до 14 м от дневной поверхности¹⁶. Разгрузка безнапорного водоносного горизонта осуществляется в р. Припять. Мощность этого горизонта составляет ~30 м.

Далее идет слой осадочных пород (в основном мергелистые глины и мергели), слабопроницаемый для воды. Мощность этого слоя 8,5–12,5 м.

Из рис. 23 видно, что для ряда мест в «Укрытии» существуют условия для того, чтобы блочные воды проникали в грунт и, наоборот, грунтовые воды — в блок.

Первое может происходить, например, в пом. 001/3 или на участке завала в основании каскадной стены. При наличии трещин, образовавшихся при аварии в фундаменте 4-го блока, это могло бы привести к существенному загрязнению ГВ.

Если таких трещин нет, то фильтрация воды через бетонный пол нижних помещений «Укрытия» относительно невелика. Согласно оценкам для помещения 001/3, она составляет <10 л/сутки [22].

¹⁵Участок старого русла реки.

¹⁶В ЛЗ положение уровня грунтовых вод в значительной степени определяется положением уровня воды в отводящем канале ЧАЭС.

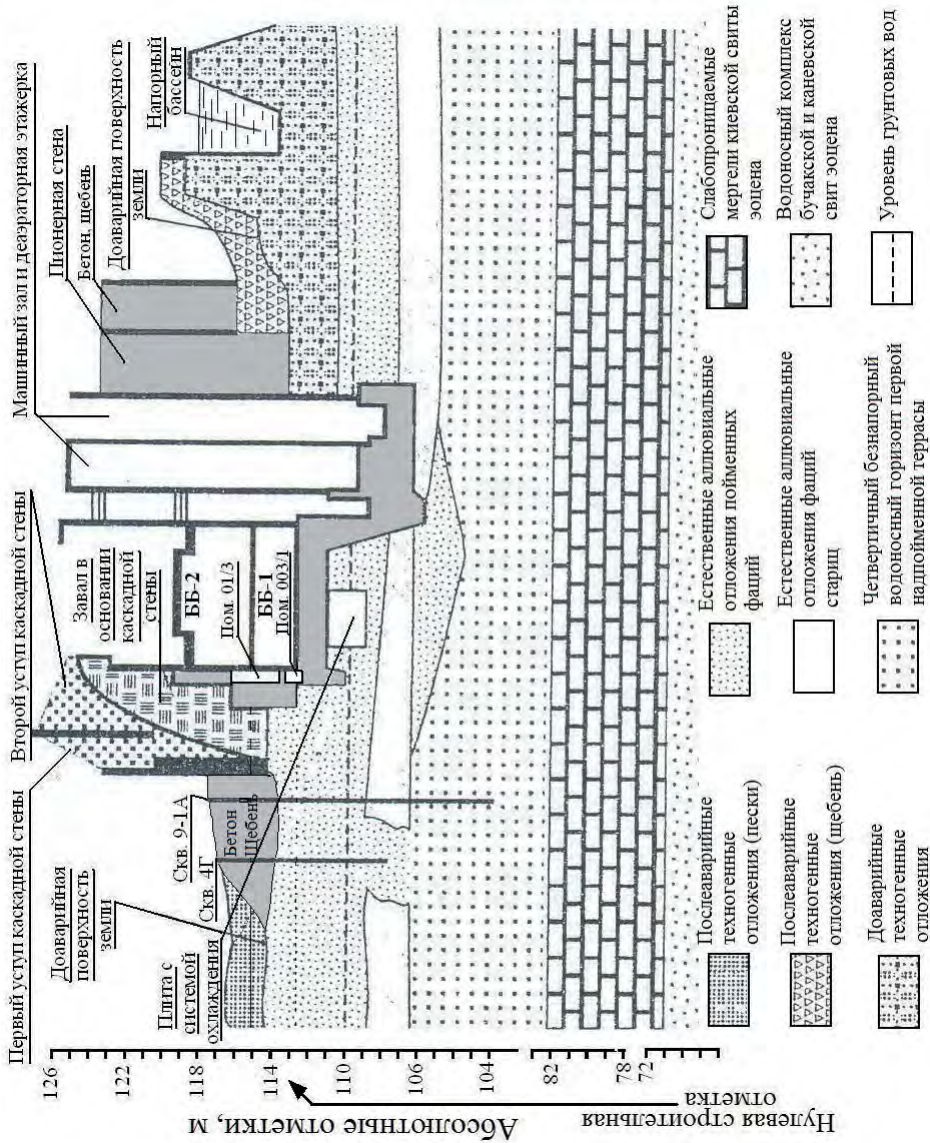


Рис. 23. Гидрогеологический разрез промплощадки объекта «Укрытие»

Для помещений машинного зала поступление блочных вод в грунт могло происходить вплоть до начала периодической откачки воды с его нижних отметок¹⁷.

Кроме того, загрязненная вода может поступать в грунт из поврежденных подземных коммуникаций ЧАЭС.

15.3.2. Отбор и анализ проб грунтовой воды

В течение многих лет сначала КЭ потом ОЯРБ МНТЦ проводили периодический отбор и анализ проб, а также измерение уровней грунтовых вод в исследовательских скважинах 1-Г–6-Г (см. рис. 24).

Пробоотбор выполнялся по следующей методике:

- Вначале осуществлялась предварительная прокачка скважины. Это позволяло проводить анализ воды, поступившей с водоносного горизонта, а не застоявшейся в скважине.



Рис. 24. Отбор проб грунтовой воды в локальной зоне «Укрытия»

¹⁷Вот, например, что отмечается в работе [23], выпущенной в 2000 г.: «Сравнивая средние, по локальной зоне, отметки УГВ по состоянию на IV квартал 2000 г. с отметками пола помещений 4-го блока и с отметками глубины заложения фундамента отдельных его частей, можно сделать следующие выводы:

- ниже УГВ находятся фундамент ВСРО (в среднем на 4,3 м) и фундамент машзала (в среднем на 2,4 м);

- ниже УГВ находится пол отдельных помещений ВСРО – от 2,5 м (пом. 0001) до 3,7 м (пом. 0005), а пол машзала – от 1,4 м (пом. Г079) до 3 м (пом. Г074/12-14);

- выше УГВ находится пол пом. 001/3 (скопление «блочных» вод и донных отложений) – на 1,2 м».

- После восстановления уровня специальным пробоотборником из нержавеющей стали (индивидуальным для каждой скважины) происходил отбор пробы.

- Пробы помещались в специальные маркированные полиэтиленовые емкости объемом 1,5 л.

- После каждого отбора проб проводилась тщательная дезактивация оборудования.

- Доставка проб в хранилище осуществлялась спецмашиной не более чем через 1 день после отбора. Анализ проб начинался сразу после их доставки.

Что касается УГВ, то его измерение в скважинах 1-Г–6-Г обычно проводилось с частотой 2 раза в месяц. Замеры выполнялись гидрогеологической рулеткой с точностью $\pm 1,0$ см. Результаты работы представлялись в виде оперативных графиков динамики изменения УГВ, совмещенных с данными по суммарному за месяц количеству атмосферных осадков и среднемесячной температуре (рис. 25).

После сооружения пруда-охладителя УГВ в районе промплощадки ЧАЭС постепенно повышался. Это повышение продолжалось и после аварии. Причиной повышения чаще всего считают послеаварийные мероприятия (например, возведение «стены в грунте») и влияние пруда-охладителя. На рис. 26 приводятся данные о динамике УГВ в скважинах 1-Г–6-Г и атмосферных осадков в 1995–2002 гг. [24].

В целом колебания УГВ в течение календарного года имеют четко выраженный сезонный характер. Это проиллюстрировано на рис. 27.

Общая картина течения ГВ в локальной зоне «Укрытия» представлена на рис. 28 (2002 г.).

Анализы проб ГВ

Грунтовые воды промплощадки ОУ представляют собой медленнофильтруемые коллоидно-дисперсные системы, поэтому после взятия пробы в процессе предварительной подготовки их отстаивали для отделения грубодисперсной твердой фазы.

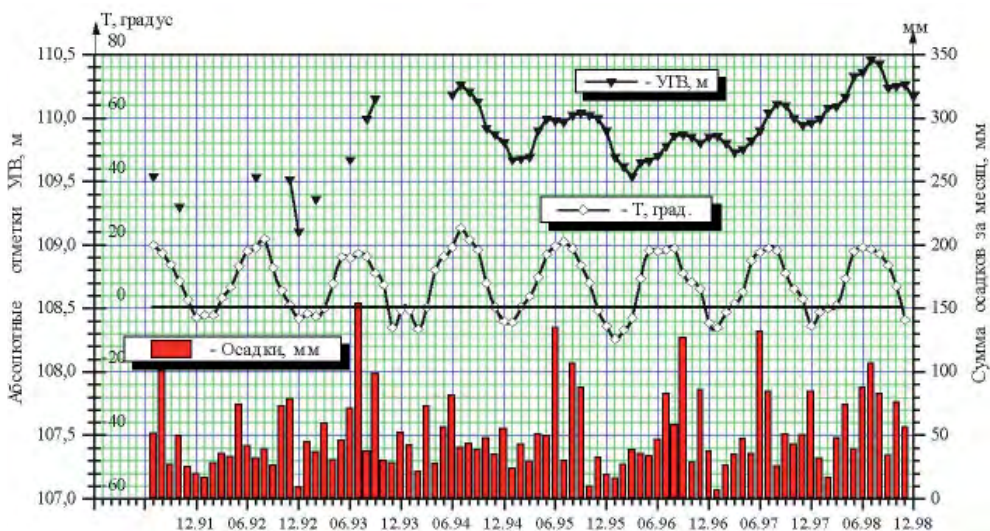


Рис. 25. График измерений УГВ, суммарного за месяц количества атмосферных осадков и температуры в скважине 1-Г за 92–98 гг. (из лабораторного журнала)

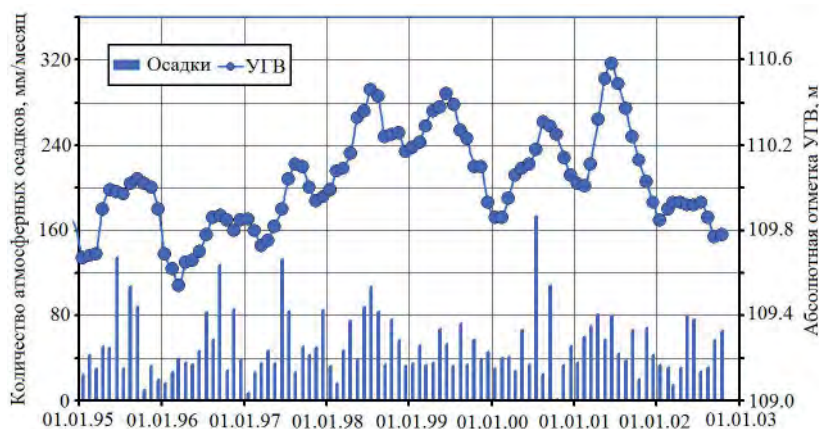


Рис. 26. Динамика усредненного УГВ в скважинах 1-Г–6-Г и атмосферных осадков в 1995–2002 гг.

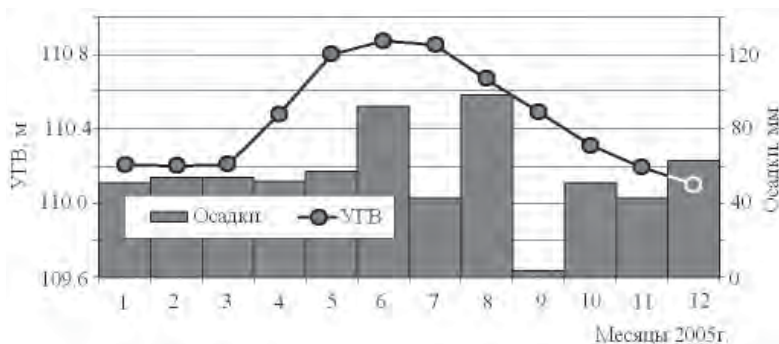


Рис. 27. Динамика изменения УГВ в скважинах группы «Г» в 2005 г.

Осветленную воду осторожно сливали и отфильтровывали через бумажный фильтр средней проницаемости для получения фракции осадка с размером частиц не менее 3 мкм. А затем фильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0,2 мкм¹⁸.

При подготовке проб воды к гамма-спектрометрическим измерениям их разбавляли до оптимальной концентрации определяемых радионуклидов и отбирали аликвотную часть раствора.

В подготовленных пробах грунтовых вод количественно определяли:

- с помощью гамма-спектрометрических измерений — активность ^{137}Cs в фильтрате и осадках;
- с помощью экстракционно-хроматографического метода — активность ^{90}Sr в фильтрате;
- с помощью жидкостного бета-спектрометра — активность ^3H в фильтрате;
- величину pH;
- концентрации pH, ионов HCO_3^- , HPO_4^{2-} .

¹⁸При необходимости фильтрат стабилизировали азотной кислотой до pH = 1 и концентрировали путем упаривания.

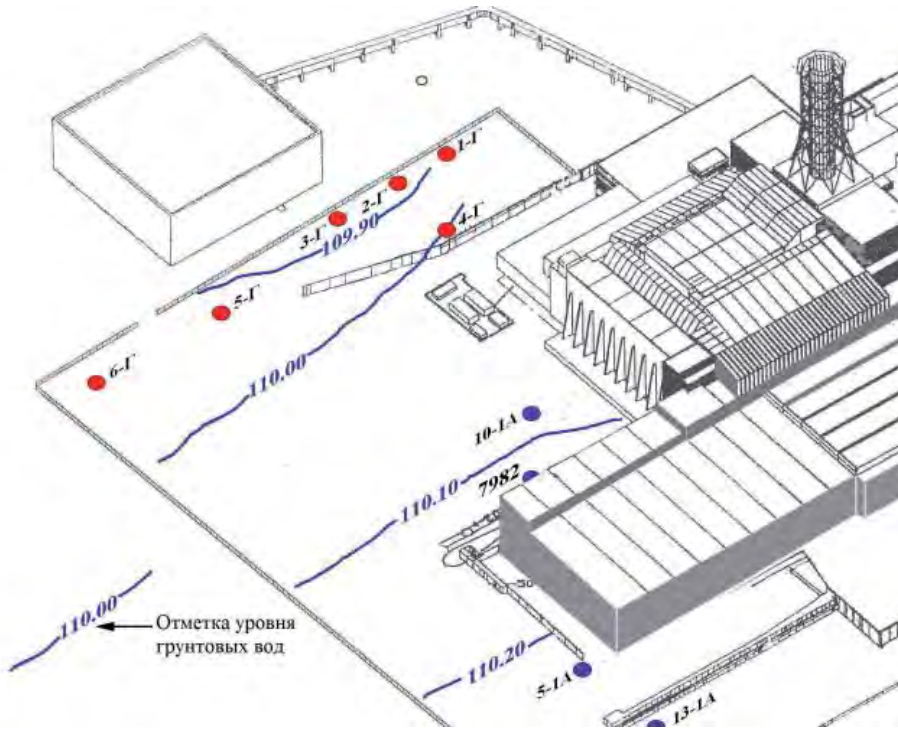


Рис. 28. Гидроизогипсы¹⁹ грунтовых вод в ЛЗ (2002 г.)

Кроме того, в грунтовых водах периодически измеряли концентрации урана и трансурановых элементов.

Для того чтобы составить представления о концентрациях ^{137}Cs и ^{90}Sr (Бк/м³) в грунтовых водах скважин 1-Г–6-Г в течение ряда лет (2000–2007 гг.), мы приводим в таблицах 6–8 соответствующие данные (см. [23–29]).

Таблица 6. Среднегодовое содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr (Бк/м³) в грунтовых водах скважин 1-Г–6-Г в 2000–2005 гг.

Радионуклид		Годы				
		2000	2002	2003	2004	2005
1-Г	^{137}Cs	$2,5 \times 10^4$	$8,4 \times 10^3$	$4,8 \times 10^3$	$9,8 \times 10^3$	$1,0 \times 10^4$
	^{90}Sr	$1,2 \times 10^4$	$5,2 \times 10^3$	$1,1 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4$
2-Г	^{137}Cs	$2,3 \times 10^4$	$5,5 \times 10^3$	$3,9 \times 10^3$	$5,7 \times 10^3$	$2,9 \times 10^3$
	^{90}Sr	$8,3 \times 10^3$	$5,6 \times 10^3$	$7,7 \times 10^3$	$1,1 \times 10^4$	$4,0 \times 10^3$
3-Г	^{137}Cs	$1,2 \times 10^4$	$4,1 \times 10^3$	$4,1 \times 10^3$	$5,8 \times 10^3$	$5,8 \times 10^3$
	^{90}Sr	$6,8 \times 10^5$	$4,9 \times 10^5$	$4,0 \times 10^5$	$8,7 \times 10^5$	$1,0 \times 10^6$
4-Г	^{137}Cs	$1,2 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	$8,9 \times 10^3$	$5,8 \times 10^3$	$5,3 \times 10^3$
	^{90}Sr	$1,5 \times 10^4$	$4,5 \times 10^3$	$4,3 \times 10^3$	$1,0 \times 10^5$	$2,9 \times 10^5$
5-Г	^{137}Cs	$9,8 \times 10^3$	$1,8 \times 10^3$	$1,6 \times 10^3$	$3,0 \times 10^3$	$1,8 \times 10^3$
	^{90}Sr	$9,3 \times 10^3$	$3,4 \times 10^3$	$3,4 \times 10^3$	8×10^3	$3,0 \times 10^3$
6-Г	^{137}Cs	$7,3 \times 10^3$	$3,2 \times 10^3$	$2,0 \times 10^3$	$4,5 \times 10^3$	$2,5 \times 10^3$
	^{90}Sr	$1,1 \times 10^4$	$8,1 \times 10^3$	$4,8 \times 10^3$	8×10^3	$8,0 \times 10^3$

¹⁹Линии, соединяющие точки с одинаковыми отметками уровня грунтовых вод.

Таблица 7. Максимальное и минимальное годовое содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr (Бк/м³) в грунтовых водах скважин 1-Г–6-Г в 2006 гт.

Скважины	^{137}Cs		^{90}Sr	
	max	min	max	min
1-Г	$8,5 \times 10^3$	$1,4 \times 10^3$	$1,1 \times 10^5$	$6,1 \times 10^4$
2-Г	$7,5 \times 10^3$	$1,1 \times 10^3$	$1,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^3$
3-Г	$4,3 \times 10^3$	$1,5 \times 10^3$	$1,9 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6$
4-Г	$7,5 \times 10^3$	$2,7 \times 10^3$	$7,4 \times 10^5$	$2,9 \times 10^5$
5-Г	$5,5 \times 10^3$	$1,1 \times 10^3$	$6,2 \times 10^3$	$1,0 \times 10^3$
6-Г	$2,8 \times 10^3$	$2,6 \times 10^2$	$1,9 \times 10^4$	$2,6 \times 10^3$

Таблица 8. Максимальное и минимальное годовое содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr (Бк/м³) в грунтовых водах скважин 1-Г–6-Г в 2007 гт.

Скважины	^{137}Cs		^{90}Sr	
	max	min	max	min
1-Г	$5,5 \times 10^3$	$1,4 \times 10^3$	$1,1 \times 10^5$	$4,3 \times 10^4$
2-Г	$2,2 \times 10^3$	$7,2 \times 10^2$	$7,8 \times 10^3$	$1,8 \times 10^3$
3-Г	$9,1 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$	$9,5 \times 10^5$	$6,2 \times 10^5$
4-Г	$7,4 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$	$1,0 \times 10^6$	$3,8 \times 10^5$
5-Г	$6,8 \times 10^3$	$6,0 \times 10^2$	$2,3 \times 10^3$	$1,0 \times 10^3$
6-Г	$6,5 \times 10^3$	$7,4 \times 10^2$	$5,3 \times 10^3$	$1,0 \times 10^3$

На рис. 29 приведены графики зависимости концентрации ^3H , ^{90}Sr и ^{137}Cs в грунтовых водах скважины 10-1А за 10-летний период наблюдений.

На следующем рисунке – 30 показано распределение радионуклидов по линии гидрологического профиля в направлении «север–юг» [30].

Рассматривая табличные значения и точки на графике рис. 30, можно заметить, что основные значения концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr лежат в пределах ($10^3 \div 10^5$) Бк/м³.

От этих данных сильно отличаются только концентрации ^{90}Sr в скважине 3-Г (иногда они достигают значений 10^6 Бк/м³) и в скважине 4-Г, которые стали возрастать начиная с конца 2004 г. [31].

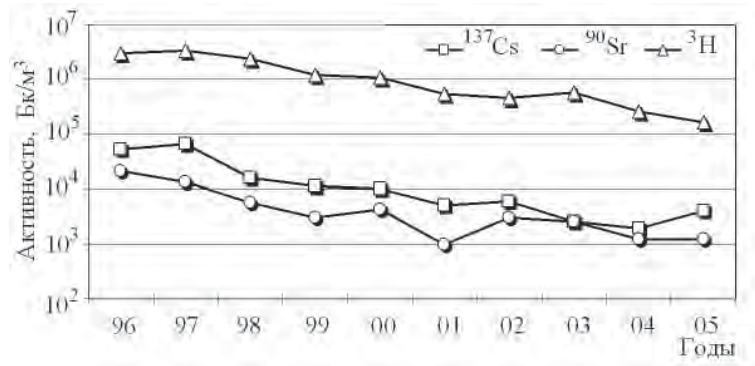


Рис. 29. Динамика изменений концентрации ^3H , ^{90}Sr и ^{137}Cs в грунтовых водах в локальной зоне ОУ (скважина 10-1А)

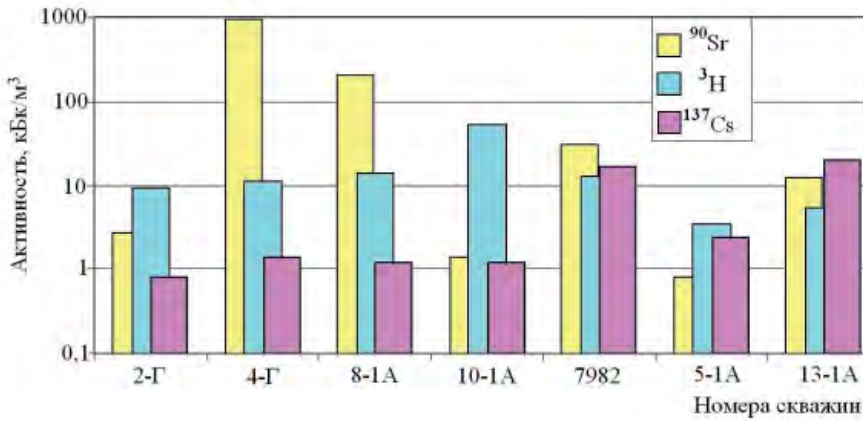


Рис. 30. Распределение радионуклидов по линии гидрологического профиля в направлении «север—юг» в 2006 г. (см. рис. 29)

Первое отличие, скорее всего, связано с попаданием в скважину 3-Г-активной воды из подземных коммуникаций объекта «Укрытие».

Что касается скважины 4-Г, то вот как выглядела для нее динамика содержания ^{90}Sr в ГВ за 2004–2007 гг. (см. рис. 31).

Из графика видно, что в 2004–2006 гг. в скважине 4-Г наблюдалась стойкая тенденция по повышению объемной активности ^{90}Sr . В 2006 г. было сделано предположение, что возможным путем поступления высоких концентраций ^{90}Sr в скважину 4-Г является поток, связанный с выходом блочных вод за пределы «Укрытия».

Однако начиная с марта 2007 г. стал наблюдаться заметный спад концентрации ^{90}Sr , и далее (в 2007–2008 гг.) он не превышал 7.5×10^5 Бк/м³, а к концу 2008 г. упал до $2,0 \times 10^5$ Бк/м³.

Какие заключения можно сделать на основании многолетних наблюдений за концентрацией ^{137}Cs и ^{90}Sr ?

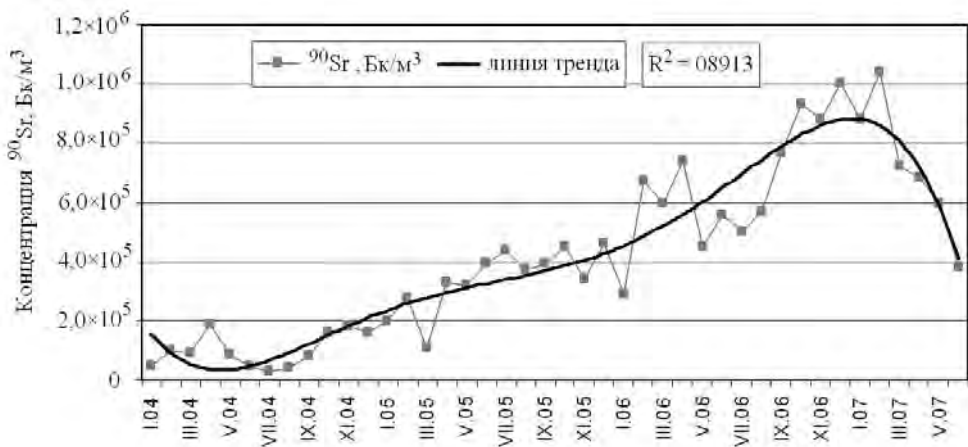


Рис. 31. Динамика изменения объемной активности ^{90}Sr в грунтовой воде из скважины 4-Г

В целом объемная активность ^{137}Cs в грунтовых водах в северной части локальной зоны не превышает значение $\text{ДК}_{\text{В}}^{\text{inhal}} (1 \times 10^5 \text{ Бк/м}^3)^{20}$, а объемная активность ^{90}Sr превышает значение $\text{ДК}_{\text{В}}^{\text{inhal}} (1 \times 10^4 \text{ Бк/м}^3)$ иногда в 50–100 раз.

Экологической опасности для воды в р. Припять это пока не представляет.

При скорости миграции ^{90}Sr в водоносном горизонте несколько метров за год²¹, километровых расстояния до р. Припять и периоде полураспада стронция-90 $T_{1/2} = 29$ лет концентрация этого радионуклида снизится в десятки раз на пути к реке из-за естественного распада.

А далее она подвергнется тысячекратному разбавлению речной водой.

Сравнение динамики среднегодовых концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr в скважинах 1-Г–6-Г за достаточно длительный период указывает на то, что загрязнение грунтовых вод в них либо остается практически на первоначальном уровне, либо немного снижается (даже для скважины 4-Г).

Содержание урана в грунтовых водах в северной части локальной зоны колеблется в пределах от 0,05 до 0,5 мкг/л.

Например, в 2002 г. концентрация урана составляла:

- в скважине 1-Г – 80 нг/л,
- в скважине 2-Г – 140 нг/л,
- в скважине 3-Г – 130 нг/л,
- в скважине 4-Г – 180 нг/л,
- в скважине 5-Г – 190 нг/л
- и в скважине 6-Г – 70 нг/л.

Такие значения характерны для природных (фоновых) концентраций в подземных водах за пределами месторождений урана и не являются радиологически значимыми.

Изотопный состав U в целом соответствует природному U, массовые доли ^{235}U и ^{238}U в исследованных пробах грунтовой воды равны массовым долям ^{235}U и ^{238}U в почве.

Активности трансурановых элементов колеблются в пределах:

- ^{238}Pu от 0,0096 Бк/л до 3 Бк/л;
- $^{239+240}\text{Pu}$ < 0 0037 Бк/л до 5,6 Бк/л;
- ^{241}Am от < 0,0015 Бк/л до 8,5 Бк/л.

Эти значения тоже не являются радиологически значимыми величинами.

Как же соотносятся между собой такие источники загрязнения грунтовых вод, как миграция радионуклидов из активного слоя и попадание в них «блочных» вод из нижних помещений объекта «Укрытие»?

Ответ на этот вопрос имеет вполне практический интерес.

С течением времени вследствие старения и разрушения материалов и конструкций под воздействием экстремальных природных условий, например, землетрясения или причин техногенного характера течь из скоплений «блочных вод» может увеличиться и привести уже к значительно большему загрязнению ГВ.

Поэтому был проведен цикл исследований на предмет обнаружения проникновения ЖРО из «Укрытия» в грунтовые воды.

²⁰Норми радіаційної безпеки України. Державні гігієнічні нормативи, НРБУ-97 ДГН. 1997 (Radiation Safety Standards of Ukraine. State Hygienic Regulations. NRBU-97 DGN. 1997).

²¹См., например, [14], [22], [32] и др.

Так, исследовалось, проникает ли тритий из «блочных» в ГВ (см., например, [15], [33–34]).

Как трассер тритий был выбран, исходя из целого ряда его свойств:

- он в больших количествах образуется при работе реактора (при тройном делении урана и плутония, активации дейтерия, содержащегося в теплоносителе в качестве примеси, утечек из тепловыделяющей графитовой кладки), перед аварией в топливе 4-го блока находилось, по оценкам, $\sim 2 \times 10^{15}$ Бк трития;
- активность трития в блочных водах «Укрытия» достигает тысяч и десятков тысяч Бк/л;
- тритий существует в «Укрытии» в виде воды, в составе молекул которой содержится тритий, такая вода является идеальным трассером, поскольку по своим химическим свойствам неотличима от обычной;
- методика регистрации трития хорошо известна, для этого чаще всего используют жидкостные сцинтилляционные спектрометры.

Вот что отмечалось в работе [15]:

«Концентрации трития в 1997–2000 гг. в грунтовых водах локальной зоны объекта «Укрытие» и прилегающей промплощадки ЧАЭС изменялись от 2,0 до 5000 Бк/л. Причем скважины, располагающиеся в непосредственной близости от объекта (10-1 А, С-11) или в пределах общей с объектом ленте тока ниже по течению грунтовых вод (9-1А, 4-Г), имеют аномально высокие концентрации трития (от 206 до 5000 Бк/л)²²...

...Пространственное распределение трития в грунтовых водах наряду с другими признаками (распределения значений рН, содержания сульфатов, хлоридов, фосфатов, нитратов, калия и др.) позволили сделать вывод о вероятном поступлении блочных вод в геологическую среду».

Здесь только надо еще раз обратить внимание на то, что в местах расположения упомянутых скважин плотность выброса радиоактивности в ЛЗ достигает максимальных величин.

В этом можно убедиться, обратившись к рисункам 4, 8, 10 настоящей Главы.

Поэтому можно предположить, что повышенное содержание трития в них связано с относительно крупными скоплениями ТСМ в «активном слое».

В работе [33] также обсуждается природа загрязнения ГВ тритием.

Не пересказывая здесь всех деталей этого тщательно выполненного исследования, приведем два графика, взятых из этой публикации (рис. 32).

Из графиков видно, что характер распределения трития по глубине грунта на северном участке промплощадки «Укрытия» сильно отличается от такого же распределения на юге.

На южном участке (в верхнем течении ГВ, до объекта «Укрытие») источником загрязнения тритием, очевидно, служит «активный слой». Хотя на глубине ~ 19 м есть небольшой (менее 2 раз) «всплеск» активности.

Что касается северного участка (в нижнем течении ГВ), то определяющее

²²В работе отмечалось, «что поверхностные (отводящий канал, напорный бассейн, различные колодцы и коммуникации) и инфильтрационные воды не могут являться основным источником поступления трития в грунтовые воды, так как удельные активности его в пробах составляют 10–130 Бк/л, что значительно ниже, чем в водоносном горизонте».

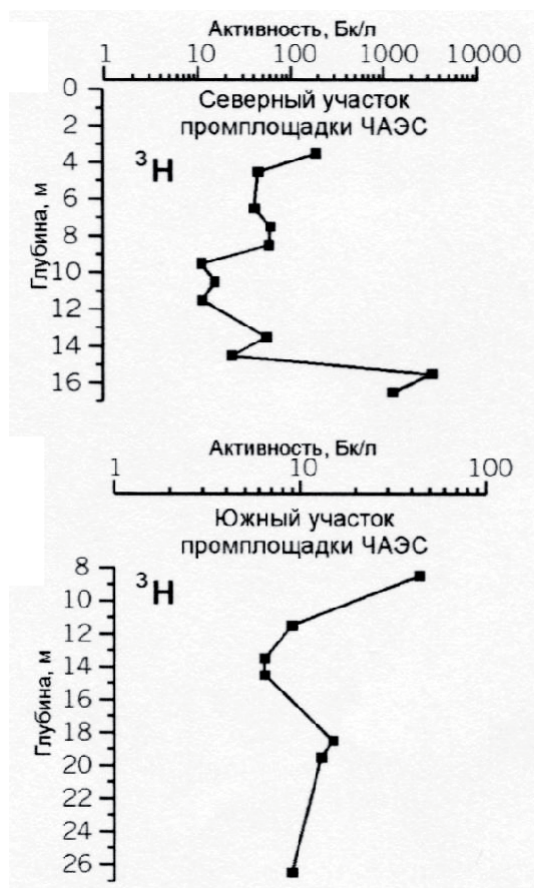


Рис. 32. Распределение активности трития по разрезу грунтовых вод четвертичных отложений промплощадки ЧАЭС [33]

влияние активного слоя наблюдается до глубин ~15 м, а дальше следует аномалия («всплеск» в десятки раз), которая с большой вероятностью может объясняться поступлением «блочных вод».

Механизм такого явления хорошо объясняет следующий график, взятый из той же работы (рис. 33).

Далее утверждается: *«Данное обстоятельство указывает на существование постоянного источника утечки «блочных вод» в геологическую среду».*

Такая же аномалия («всплеск» активности в северной части промплощадки) наблюдается и для стронция-90. Поведение ^{137}Cs на северном и южных участках не различается.

В работе [33] приводятся и данные исследований с целым рядом различных гидрохимических компонентов техногенного происхождения²³, которые ис-

²³Выбор индикаторов происходил на основе списка тех химических веществ, которые использовались для тушения пожара, снижения критичности реактора, дезактивации и пылеподавления. Все эти вещества в больших количествах вводились в разрушенный энергоблок.

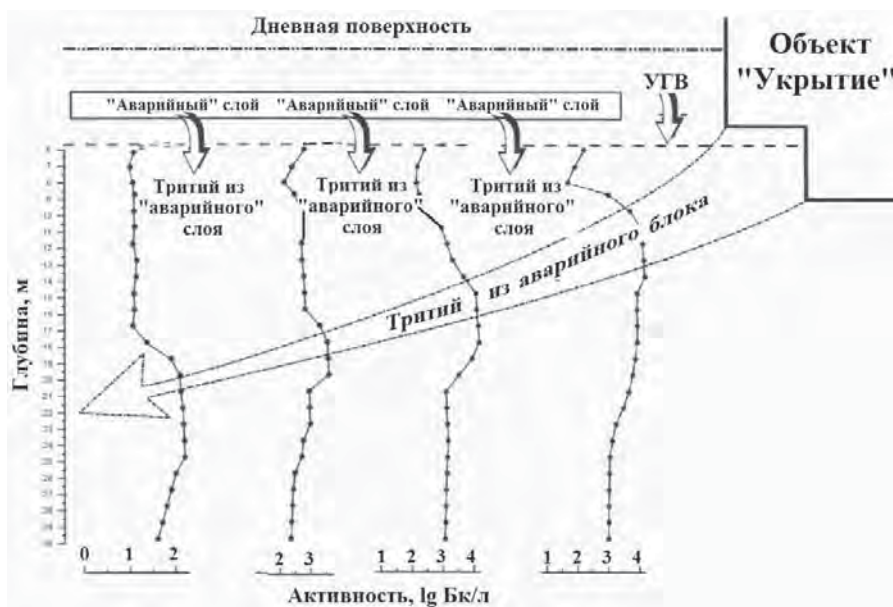


Рис. 33. Схема распространения трития в грунтовых водах четвертичных отложений северной части промплощадки ЧАЭС [33]

пользовались для индикации поступления в ГВ «блочных вод».

Авторы считают, что полученные результаты также «дают основание утверждать, что *утечка блочных вод имеет место*».

Существуют и другие точки зрения. Например, в выводах работы [31], посвященной изучению особенностей радионуклидного состава грунтовой воды скважины 4-Г, говорится:

«Характер динамики изменения концентрации стронция, урана и ТУЭ на протяжении 2005 г. не позволяет утверждать, что происходит утечка ЖРО из объекта «Укрытие» в гидрогеологическую среду и что фронт распространения блочных вод достиг места расположения скважины 4-Г».

В работе [35] приводятся графики типичных α -спектров урана из проб грунтовой воды, измеренные в 2005 г. (см. рис. 34).

«В α -спектре фракции урана в области энергий 4400–4500 кэВ не наблюдаются линии α -частиц, принадлежащих ^{236}U , наличие которых характерно для

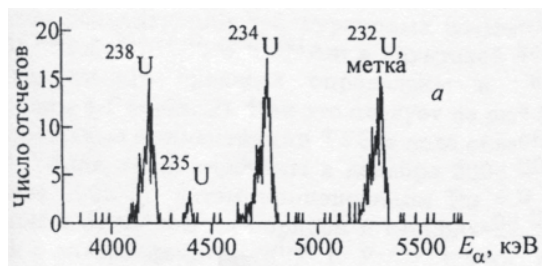


Рис. 34. Типичные α -спектры U, выделенного из проб грунтовой воды скважин 1-Г–6-Г

ЖРО, образующихся в объекте «Укрытие». Это свидетельствует о подавляющем вкладе природной составляющей U в общее количество U в исследуемых грунтовых водах».

С нашей точки зрения, все же следует согласиться с выводами [33], тем более что при оценке факторов, влияющих на безопасность природных сред, следует придерживаться консервативного подхода²⁴.

ЛИТЕРАТУРА

1. Римский-Корсаков А.А. и др. Исследование выброса аварийного реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС. Отчет РИ им. В.Г. Хлопина Инв. № 14396. Л., 1986. — 23 с.
2. Римский-Корсаков А.А., Федотов П.И., Дубасов Ю.В. и др. Исследование выброса аварийного реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС. Труды Радиового института им. В.Г. Хлопина, т. XIV, 2009, с. 10–22.
3. Лебедев В.И., Скаткин В.М., Эрлих И.А. Справка по результатам измерений полей гамма-излучений основного источника и площадей, к нему примыкающих, с помощью вертолетного комплекса Ка-32Ч. Отчет КИ № 11-04 от 12.06.86. — 4 с.
4. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отв. исполнитель Боровой А.А. Отчет МНТЦ «Укрытие», арх. № 3836, 2001 г. Чернобыль, 337 с.
5. 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.
6. Боровой А.А., Иванов А.И. Измерение внешних радиационных полей, создаваемых объектом, с целью обеспечения радиационной безопасности при производстве работ на объекте «Укрытие». Отчет МНТЦ «Укрытие» Инв. № 09-17/48, Чернобыль, 1994. — 30 с.
7. Радиационная обстановка на промышленной площадке объекта «Укрытие». Отчет РНЦ «Курчатовский институт». №130-11/4. — М., 1997 г. Ответственный исполнитель: Боровой А.А.
8. Задача 1: Измерения надземных полей гамма излучения. Фаза 1. Отчет по измерениям. SIP K 01 21 310 MR1 003 02, 30.03.04. — 122 с.
9. Задача 1: Измерения надземных полей гамма излучения. Фаза 2. Отчет по измерениям. SIP K 01 21 310 MR2 003 02, 03.06.04. — 212 с.
10. Довыдьков А.И., Краснов В.А., Мышковский Н.М., Павлюченко Н.И. Экспериментальные исследования мощности экспозиционной дозы гамма-излучения в воздушном пространстве вблизи объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля». Вип. 2. — Чернобыль, 2005, с. 69–72.
11. Определение содержания урана, плутония и продуктов деления в кернах скважин на промплощадке 4-го блока ЧАЭС (программа «Ареал»). Отчет КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова. №11.07/269. — Чернобыль, 1991. — 9 с.

²⁴Более поздние работы (см., например, [36]) согласуются с такой точкой зрения.

12. Боровой А.А., Евстратенко А.С., Криницын А.П. и др. Динамика радиационной обстановки на объекте «Укрытие». В сборнике «Объект «Укрытие» — 10 лет», основные результаты научных исследований», Национальная Академия Наук Украины, Чернобыль, 1996, с. 100—111.
13. Панасюк Н.И., Павлюченко Н.И., Правдивый А.А. и др. Оценка радиоактивного загрязнения геологической среды и подсчет количества радиоактивных отходов, локализованных в техногенных грунтах на прилегающей к объекту «Укрытие» территории. Препринт МНТЦ «Укрытие» 99-2, Чернобыль, 1999. — 16 с.
14. Панасюк Н.И., Павлюченко Н.И., Правдивый А.А. и др. Современное распределение радиоактивных веществ в геологической среде локальной зоны объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы Чернобыля». Вып. 6, 2000, Чернобыль, с. 160—168.
15. Панасюк Н.И., Павлюченко Н.И., Рудько В.М. и др. Результаты работ по оценке радиоактивного загрязнения грунтов и подземных вод в районе объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы Чернобыля». Вып. 7, г. Чернобыль, 2001, с. 97—115.
16. Панасюк Н.И., Алферов А.М., Подберезный С.С. и др. Оценка параметров радиоактивного загрязнения грунтов в районе объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы безопасности атомных электростанций i Чернобыля». Вып. 11, г. Чернобыль, 2009 г., с. 115—119.
17. Калиновский А.К., Малюк А.И., Панасюк Н.И. и др. Метод оценки радиоактивного загрязнения грунтов локальной зоны объекта «Укрытие» и промплощадки ЧАЭС с использованием гамма-кратжа. В сборнике «Проблемы Чернобыля». Вып. 8, 2001, Чернобыль, с. 21—34.
18. Подберезный С.С., Панасюк Н.И., Оружий А.П. Применение технологий геоинформационных систем при обработке данных радиоэкологического мониторинга в районе объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы безопасности атомных электростанций i Чернобыля». Вып. 2, Чернобыль, 2005 г., с. 99—103.
19. Панасюк Н.И., Скорбун А.Д., Павлюченко Н.И. и др. Оценка свойств радиоактивных отходов в грунтах основания сооружения для обоснования проекта стабилизации объекта «Укрытие». В сборнике «Проблемы Чернобыля». Вып. 13, Чернобыль, 2003 г., с. 120—126.
20. Панасюк Н.И., Скорбун А.Д., Литвин И.А. и др. Прогноз распределения радиоактивных отходов при земляных работах в котлованах для фундамента нового безопасного конфаймента. В сборнике «Проблемы безопасности атомных электростанций i Чернобыля». Вып. 14, г. Чернобыль, 2010 г., с. 102—111.
21. Карличук И. Устройство стены в грунте вокруг Чернобыльской АЭС. http://www.bohr.ru/drilling/uncategorized/ustrojstvo-steny-v-grunte-vokrug-chernobylskoj-aes_14.html.
22. Серебряков Б.Е. Расчет подземной миграции радионуклидов из Объекта «Укрытие». — Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 1, с. 38—40.
23. Выполнение работ по контролю и анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие» (заключительный отчет по договору № 123/2000). Отчет о НИР МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 2000, 30 с.
24. Выполнение работ по контролю и анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие» (заключительный отчет по договору № 141/2001). Отчет о НИР МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 2002, 55 с.
25. Выполнение работ по контролю и анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие» (заключительный отчет договор № 157/2003) Отчет о НИР МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 2003 г., 24 с.

26. Выполнение работ по контролю и анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие» (заключительный отчет договор № 154/04). Отчет о НИР МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 2004 г. — 54 с.
27. Выполнение работ по контролю и анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие» (заключительный отчет договор № 177/05). Отчет о НИР МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 2005 г. — 63 с.
28. Выполнение работ по контролю и анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие» (заключительный отчет договор № ...). Отчет о НИР МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 2006 г. — 63 с.
29. Выполнение работ по контролю и анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие» (заключительный отчет договор № 249/07). Отчет о НИР МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 2007 г. — 65 с.
30. Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие». ЧАЭС, 2006 г. — 42 с.
31. Хан В.Е., Одинцов А.А., Калиновский А.К. и др. Изучение особенностей радионуклидного состава грунтовой воды скважины 4-Г локальной зоны объекта «Укрытие». В сборнике «Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чернобиля». Вип. 4, г. Чернобыль, 2006 г., с. 111–120.
32. Джепо С.П., Кубко Ю.И., Скальский А.С., Осколков Б.Я., Носовский А.В. Прогнозное и эпигнозное моделирование изменения гидрогеологических условий промплощадки ЧАЭС». В сборнике «Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения». Вып. 5, с. 56–65.
33. Шестопалов В.М., Кухаренко Д.Е., Панасюк Н.И. и др. Радиоактивное загрязнение подземных вод в районе объекта «Укрытие»: Науч. статья «Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа»/Отв. ред. акад. НАН Украины В.М. Шестопалов. — Киев, 2000, часть 1, с. 87–125.
34. Панасюк М.И. Радиоактивное загрязнение почв и грунтовых вод в районе объекта «Укрытие». Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ИПБ АЭС НАН Украины, 2005, 212 с.
35. Одинцов А.А., Хан В.Е., Краснов В.А. и др. Радионуклиды в грунтовой воде наблюдательных скважин локальной зоны объекта «Укрытие». Радиохимия, 2007, т. 49, № 5, с. 467–472.
36. Панасюк Н.И., Алферов А.М., Скорбун А.Д. и др. Радиоактивное загрязнение подземных вод и грунтов локальной зоны объекта «Укрытие» и промплощадки ЧАЭС. Сборник «Двадцать пять лет чернобыльской катастрофы. Безопасность будущего». Киев, 2011, с. 79–84.

16. НЕКОТОРЫЕ РАБОТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ НА ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

После аварии на 4-м блоке ЧАЭС специалисты КИ, наряду с выполнением работ на разрушенном реакторе и в ЛЗ, начали проводить исследования, связанные с выбросом радионуклидов в окружающую среду и определением степени загрязнения ближних и дальних территорий.

Эти работы продолжались вплоть до весны 1992 г. и велись ОГ и КЭ как по поручению Правительственной комиссии и руководства Минсредмаша (например, программа «Полынь»), так и в инициативном порядке.

После создания МНТЦ сотрудники ОЯРБ (КИ) привлекались к работам на загрязненных территориях только периодически. Большая часть их выполнялась другими подразделениям центра.

16.1. Создание карт территорий, загрязненных плутонием

Проблема загрязнения территорий сразу стала важнейшей. Для определения необходимых мер по защите населения и возможности осуществления хозяйственной деятельности были необходимы детальные карты радиационной обстановки и выпавших на почву радиоактивных загрязнений. Составлением таких карт с первых дней после аварии занимался Госкомгидромет СССР¹.

Измерения велись с помощью аэрогамма-съемки, наземной дозиметрической и радиометрической аппаратуры, взятия проб почвы, воды и воздуха и их анализов в лабораторных условиях. Пробы исследовались во многих научных учреждениях Москвы, Киева, Минска и др.

Уже к 30 апреля в Совет Министров СССР была представлена схема радиационной обстановки в зоне ЧАЭС и на прилегающих территориях (см. [1] и рис. 1).

Однако если дозовая обстановка могла быть установлена на значительных территориях достаточно оперативно, то загрязнение почвы плутонием и другими трансуранами представляло собой достаточно трудоемкую задачу, поскольку определение количества α -излучающих радионуклидов приходилось вести с помощью радиохимических анализов отобранных проб.

Масса трансуранов, накопленная за время работы 4-го блока, измерялась сотнями килограммов, период полураспада изотопов плутония составлял тысячи лет (см. таблицу 1 и рис. 15 Главы 1).

¹Первый доклад Госкомгидромета о радиационной обстановке был сделан на заседании ПК 27 апреля 1986 г. [1]. Начиная с 29 апреля, в соответствии с решением Политбюро ЦК КПСС, на Госкомгидромет было возложено представление в ПК и Оперативную группу Политбюро ЦК КПСС информации о радиационной обстановке.

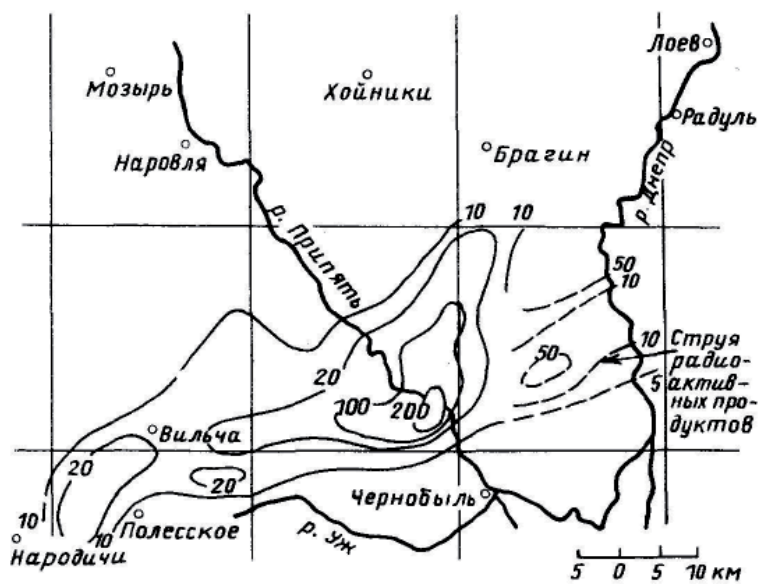


Рис. 1. Распределение МЭД (мР/час) на местности по данным аэрогамма-съемки на 29.04.86 г.

Таблица 1. Характеристики трансуранов, содержащихся в топливе 4-го блока перед аварией (26.04.1986)

№	Радио- нуклид	Период полураспада, лет	Активность полная, Бк	Активность в 1г урана, Бк	Масса полная, (кг)
1	²³⁸ Pu	87,7	$1,3 \cdot 10^{15}$	$6,8 \cdot 10^6$	2,0
2	²³⁹ Pu	$2,4 \cdot 10^4$	$9,2 \cdot 10^{14}$	$4,8 \cdot 10^5$	412
3	²⁴⁰ Pu	$6,56 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$7,9 \cdot 10^6$	185
4	²⁴¹ Pu	14,4	$1,8 \cdot 10^{17}$	$9,5 \cdot 10^8$	48
5	²⁴¹ Am	433	$1,6 \cdot 10^{14}$	$8,4 \cdot 10^5$	12
6	²⁴² Cm	163 дня	$4,3 \cdot 10^{16}$	$2,3 \cdot 10^8$	0,35
7	²⁴⁴ Cm	18,1	$4,0 \cdot 10^{14}$	$2,1 \cdot 10^6$	0,13

Выброс даже относительно небольшой части этих радионуклидов мог представлять для населения значительную опасность².

Поэтому специалисты КИ сразу же стали искать методы оперативного исследования загрязнений почвы плутонием.

Вот что вспоминает руководитель работ академик С.Т. Беляев:

«Самым главным было определить выбросы наиболее опасных для человека нуклидов — йода, цезия, стронция и плутония. В первое время особенно

²В качестве критерия для временного проживания населения летом 1986 г. были определены следующие плотности загрязнения: по цезию-137 — 15 Ки/км² ($5,5 \cdot 10^{11}$ Бк/км²), по стронцию-90 — 3 Ки/км² ($1,1 \cdot 10^{11}$ Бк/км²), по плутонию — 0,1 Ки/км² ($3,7 \cdot 10^9$ Бк/км²).

важен был плутоний: по нему нормы особенно жесткие. А измерять его не просто, так как он излучает не γ -кванты, а только α -частицы. Требуются предварительно сложные радиохимические реакции для его выделения, а лишь после этого — измерения на α -спектрометре. Это неделя хорошей работы для квалифицированной группы радиохимиков и спектроскопистов. Ясно, что на основании таких анализов оперативно снять карту загрязнений плутонием невозможно — во всей стране не хватит специалистов.

Чтобы стало ясно, насколько это тонкая работа, приведу пример. Как-то нам присылают результаты анализов из одного очень хорошего института. Там вдруг нашли огромные количества плутония в почве. Но что удивительно: из блока примерно в равной пропорции выброшены три изотопа — ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu , а в анализе присутствует только ^{239}Pu . Оказывается, при анализе пользовались посудой, в которой когда-то работали с этим изотопом, а концентрация плутония в пробах настолько мала, что этого оказалось достаточно, чтобы исказить результат. Случались и другие ошибки. Нам даже пришлось создать специальную бригаду, которая проверяла сомнительные результаты. И соотношение в анализе разных изотопов было надежным критерием достоверности» [2].

В середине мая 1986 г. в «Курчатовском институте» в результате сравнения данных спектрометрических измерений проб, взятых на территориях Украины, России, Беларуси, и данных радиохимических анализов этих же проб был определен коэффициент корреляции между активностями ^{144}Ce (γ) и суммы изотопов плутония — $A(\text{Pu})$ (α) [3]. Коэффициент оказался всюду практически одинаковым.

Этого следовало ожидать.

Церий вылетал из реактора и падал на почву в составе тех же частиц топлива, что и плутоний. Поэтому было предложено (подробнее см. [4]) использовать этот факт для быстрого определения загрязнения почвы плутонием (или топливом), используя «метод корреляции».

Вместо сложных радиохимических анализов на изотопы плутония-238, 239, 240 (практически чистые α -излучатели) или стронций-90 (β -излучатель) можно было найти содержание этих радионуклидов в пробе по соотношению:

$$A(\text{Pu}) = K_{\text{Pu}} \times A(^{144}\text{Ce}),$$

где $A(\text{Pu})$ суммарная альфа-активность ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu ;

K_{Pu} — коэффициент корреляции;

$A(^{144}\text{Ce})$ — гамма-активность ^{144}Ce .

Величина K_{Pu} составляла на 26.04.86 г. $\approx 9 \times 10^{-4}$.

Для практических целей коэффициент корреляции для всего топлива реактора можно было считать постоянным. K_{Pu} относительно слабо зависел от величины выгорания топлива, а выгорание отдельных ТВС для реактора 4-го блока мало отличалось от среднего. Это иллюстрирует рис. 2.

Аналогичное соотношение со своим коэффициентом корреляции существовало и для стронция-90.

Церий-144 как опорный радионуклид был выбран из следующих соображений:

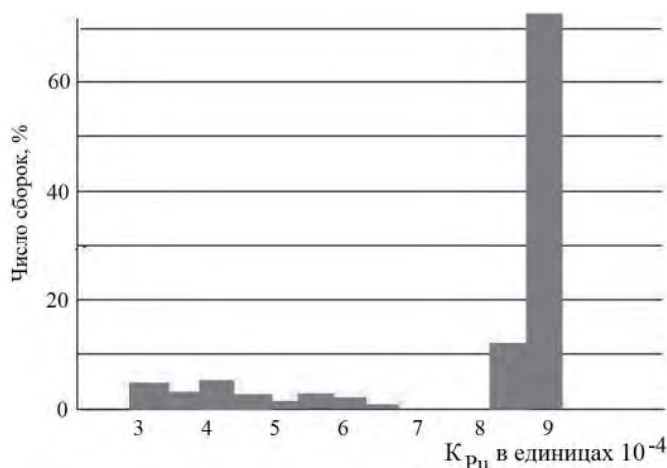


Рис. 2. Величина коэффициента корреляции K_{Ru} для различных ТВС реактора IV блока перед аварией

- прочная связь с урановой матрицей, высокая температура испарения;
- достаточно большой период полураспада (284 дня);
- достаточная интенсивность гамма-линий и их удобная для спектрометрии энергия.

Этот метод стал широко применяться, после чего сложилась трехзвенная система определения топливных загрязнений в ближней зоне.

Во-первых, измерение мощности дозы гамма-полей над территориями с помощью аэрогамма-съемки (первое, «грубое» приближение, использующее соотношение «мощность дозы» — количество топлива).

Во-вторых, оперативное исследование почвенных проб с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров (уточняющие измерения с использованием коэффициента корреляции по церию-144).

И, наконец, медленные и тщательные радиохимические анализы (проверка устойчивости коэффициента K_{Ru})³.

Полученные данные позволили уже к осени 1986 г. получить первые карты выпадения частиц, содержащих плутоний, на территории. В дальнейшем они неоднократно уточнялись (см., например, рис. 3).

Метод корреляций стал одним из основных и при определении содержания плутония, ^{90}Sr , других труднолетучих радионуклидов в образцах ТСМ, воды и воздушных фильтров, взятых из объекта «Укрытие». Он позволял оперативно получать необходимую информацию и обладал достаточной для большинства задач точностью.

Благодаря этому методу были сделаны первые оценки количества топлива, выброшенного во время аварии на ЧАЭС за пределы разрушенного блока (см. Часть 1 настоящей работы).

Метод стал основой для создания в КИ базы данных по загрязнениям территории.

³До конца 1986 г. всем НИИ СССР удалось провести около сотни таких анализов.

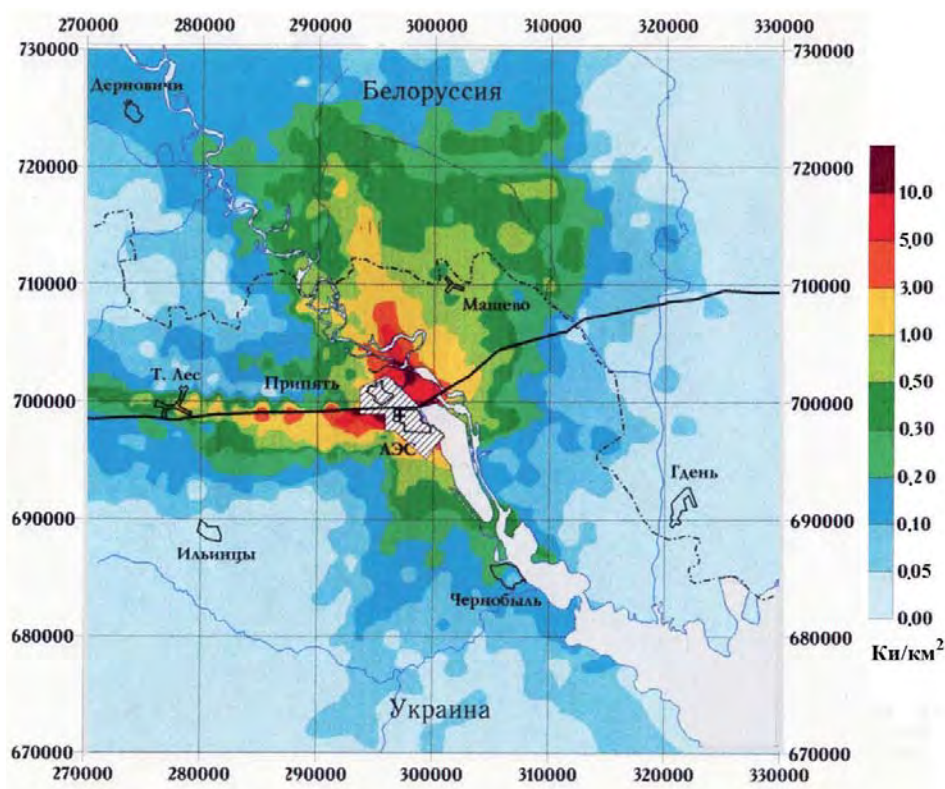


Рис. 3. Карта-схема плотности загрязнения плутонием (239+240) 30-километровой зоны ЧАЭС [5]

16.2. Город Славутич

Как уже говорилось выше, специалисты КИ часто привлекались ПК к измерениям, проводившимся за пределами площадки станции и даже за пределами 30-километровой зоны.

Они участвовали в обследовании «рыжего»⁴ леса, определении загрязненности ряда населенных пунктов, работах по дезактивации территорий, домов в г. Припять, изучению береговых аномалий⁵ и в решении многих других задач.

Например, осенью 1986 г. сотрудники ОГ первыми пытались обратить внимание ПК на неудачно выбранное (с радиоэкологической точки зрения) расположение будущего города энергетиков Славутича.

Вот что вспоминает один из специалистов ОГ [6]:

«Город предполагали расположить в достаточном удалении от границы Чернобыльской зоны, в ~50 км от станции. Место было выбрано удачно: красивое и удобное для железнодорожного сообщения. Но мы (сотрудники

⁴См. ниже.

⁵Было установлено, что часть радиоактивных выпадений на поверхность воды сносится к берегу. В результате этого вдоль берега возникает полоса более загрязненного грунта, чем на прилегающей к нему территории.

ОГ КИ) уже в то время знали, что вылетевший при аварии из реактора долгоживущий радионуклид цезия-137 разнесся на очень большие расстояния.

Чернобыльская зона была местом сосредоточения выброшенных частиц топлива и связанных с этими частицами радиоактивности. Цезий же легко испарялся и летел независимо от топлива, на мельчайших частицах пыли и дыма. Там, где радиоактивные облака касались земли в результате дождя или сложных воздушных течений, на почве образовывались радиоактивные «пятна» — «цезиевые пятна».

К этому времени пятна уже обнаружили на Украине, в Белоруссии и России за сотни километров от Чернобыля. В особенно активных «пятнах» здоровье живущих там людей подвергалось серьезной угрозе. Было решено их переселить.

И вот, слушая докладчиков, я думал о том, что в районе будущего города могут быть цезиевые пятна. Никаких конкретных данных о радиационной обстановке сообщено не было, только удаленность города от ЧАЭС. И после совещания я подошел к руководителю нашей оперативной группы и попросил поговорить с военными. Они дают нам вертолет, а мы берем пробы почвы непосредственно в месте, где будет строиться Славутич, и анализируем их».

Отбор проб произошел 17 октября 1986 г.

Он проводился в районах двух населенных пунктов — Мекшуновка и Червона Гута, а также ж/д станции Нерефа (см. рис. 4). Эти места были выбраны в соответствии с первоначальными планами размещения города Славутич.

Результаты анализов проб, усредненные по району отбора, показали, что содержание в почве изотопов плутония и стронция-90 приблизительно одинаково для всех населенных пунктов и составляет менее 10% от величины ДК_Б.



Рис. 4. Районы отбора проб и первоначально предлагавшееся расположение г. Славутич. КИ и Радиевый институт, 17.10.86 г.

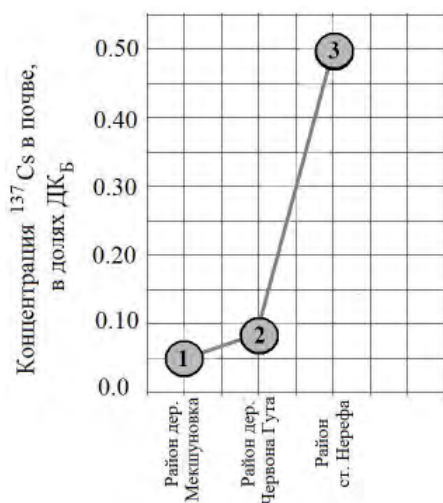


Рис. 5. Зависимость концентрации ^{137}Cs в почве от района отбора проб (концентрация приведена в долях ДКБ)

Что касается содержания цезия-137, то оно выявило явную тенденцию к возрастанию по направлению точек $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ (см. рис. 5) и в конечной точке составляло уже 50% от ДКБ.

Полученные результаты были оформлены в виде докладной записки.

В ней было предложено сместить расположение города к северу, поскольку в лесах южнее станции Нерефа очевидно находилось «цезиевое пятно».

Сотрудник ОГ вспоминает [6].

«Мы не могли представить себе, как люди, большинство из которых пережило аварию и выселение из города Припять, будут жить в месте, где постоянно трещит счетчик радиоактивности. И его надо брать с собой, чтобы пойти собирать в лесу грибы или ягоды. И надо постоянно думать, съесть сорванное яблоко или лучше не есть.

Для существования в таких условиях надо было иметь глубокую веру в расчеты медицины и очень крепкие нервы. Вряд ли можно было ожидать эти качества у людей, переживших аварию...

Написав все эти соображения, я передал докладную записку и карту с измерениями (раскрашенную для убедительности цветными карандашами) в ПК и представителю Госкомгидромета...

Прошло значительное время. На очередном из заседаний ПК разбирались вопросы, связанные со строительством Славутича. После того, как все разошлись, я подошел к карте. И буквально замер от неожиданности. Мы рекомендовали немного изменить расположение города, отодвинуть его от цезиевого пятна. Город, действительно, отодвинули.

Но в другую сторону!

И теперь он только приблизился к центру загрязненной области».

Переделывать что-либо было поздно. Председатель ПК на обращенные к нему вопросы руководства КИ сказал примерно следующее:

«Строители настояли. Им удобнее и много дешевле проводить коммуникации. Грунт более приемлемый. А исправить ситуацию? Можно, конечно. Мы об этом думаем и работы начали. Будем проводить тщательную

дезактивацию и города, и окрестностей. Сильно зараженные места пока оградили, поставили знаки радиации».

Дезактивация проводилась много лет. И затраты на нее вряд ли были даже сопоставимы с затратами на перепланировку расположения города и переноса ж/д станции⁶.

16.3. Лесные пожары и распространение радиоактивных загрязнений [8, 9]

Впервые об опасности возникновения лесного пожара на территории, загрязненной радионуклидами, заговорили на Правительственной Комиссии в связи с проблемой «Рыжего леса». Такое название получил участок леса, практически примыкающий на западе к территории станции (к площадке «Открытых распределительных устройств ЧАЭС» – ОРУ и «Стройбазе»). По этому участку проходила шоссейная дорога Чернобыль – Припятъ. И именно он подвергся мощнейшему радиационному удару при аварии (см. рис. 6).

В течение короткого времени сосновый (в основном) лес, находившийся на оси западного выброса, погиб, при этом хвоя деревьев приобрела необычную рыжую окраску (рис. 7).



Рис. 6. Современный вид со спутника на территорию ЧАЭС и «Рыжий лес». Красная стрелка – направление первоначального выброса («Западный след») при взрыве реактора 4-го блока

⁶В 1989–1992 годах в городе был выполнен большой объем работ по дезактивации, и в настоящее время его территория по радиационным показателям не отличается от таких городов, как Чернигов или Киев. Тем не менее наличие вокруг Славутича загрязненных лесных массивов, а также возможность употребления в пищу продуктов нецентрализованной поставки (грибов, ягод, молочных и мясных продуктов, доставленных с загрязненных территорий) обуславливают вероятность получения повышенной дозы радиации [7].



Рис. 7. «Рыжий лес» (лето 1986 г.)

Впоследствии массив погибших и пожелтевших деревьев продолжал увеличиваться. Через год после аварии его площадь составляла уже около 400 га⁷.

В случае пожара (а стояла жаркая и сухая погода) этот мертвый лес, находящийся в непосредственной близости от станции, мог стать мощным источником ее нового загрязнения, а возможно, представлял опасность и для территорий, находящихся за 30-километровой зоной.

Уже первые систематические измерения, выполненные специалистами Минобороны, гражданских институтов, в том числе КИ и «Радиового института», показывали очень большие значения МЭД (от единиц до сотен Р/час), особенно на опушке леса, прилегающей к территории станции.

В июле 1986 г. большое беспокойство вызвала оценка военных, доложенная в Генеральный штаб, а затем и на ПК — на территории «Рыжего леса» общая величина выброшенной радиоактивности может превышать 10 миллионов Кюри! Это означало, что надо немедленно (без предварительной подготовки) принимать меры по захоронению деревьев и почвы на этом участке и проводить работы в очень тяжелых радиационных условиях.

Подключившиеся к этой проблеме сотрудники ОГ КИ сумели буквально за сутки организовать как вертолетные измерения дозовых полей над «Рыжим лесом», так и создать специальные расчетные программы, позволившие сделать реальные оценки выброшенной на его территории активности⁸. Эти оценки дали значение ~1 миллион Кюри.

Проблема захоронения «Рыжего леса» была отложена и окончательно решена только во второй половине 1987 г.⁹ (рис. 8).

⁷Отдельные пятна «Рыжего леса» встречались на расстоянии до 9 км к северу и 6 км к западу от ЧАЭС.

⁸Эта работа описана в книге Р.В. Арутюняна «Чернобыль — Фукусима: ядерное противостояние» (издательство «Наука», в печати).

⁹В настоящее время существует многочисленная литература по вопросу захоронения «Рыжего леса», к которой мы и отсылаем читателей.



Рис. 8. Территория «Рыжего леса» после захоронения деревьев

К проблеме возгорания загрязненного леса специалисты ОЯРБ МНТЦ вернулись через несколько лет.

Лето 1992 г. было жарким и сухим. В 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС постоянно происходили лесные пожары¹⁰, рис. 9 (А, Б, В).

В тушении одного из них принимали участие сотрудники ОЯРБ МНТЦ. Они и сообщили руководству ОЯРБ, что персонал, занятый на тушении пожара, не применял никаких мер для предохранения от радиоактивных аэрозолей. Этот факт вызвал серьезное беспокойство. Действительно, опыт работы на площадке ЧАЭС говорил о том, что при сгорании загрязненных материалов заметная часть радионуклидов распространяется вместе с дымом.

Было решено провести подробные измерения активности аэрозолей в дымовом шлейфе лесного пожара и сообщить о результатах руководству зоны.

Такая возможность представилась 29 июля 1992 г.

Измерения проводились в двух точках (см. рис. 10). Эти точки были выбраны из следующих соображений.

В первой точке предполагалось получить сведения о степени подъема (и, возможно, переноса) радиоактивности, а также о радионуклидном составе аэрозолей, которые могли вдыхать люди, участвовавшие в тушении пожара (пожарные, обслуживающий персонал, лица, привлекаемые к тушению пожара и т.п.). Для этого воздухоотбор следовало осуществлять непосредственно в горящем лесу, что и было сделано в районе деревни Буряковка.

Во второй точке предполагалось получить сведения о переносе радионуклидов в составе шлейфа дыма и теплого воздуха, который гнал порывистый

¹⁰«Грандиозными оказались последствия лесных пожаров в сухой весенне-летний сезон 1992 г. Весенние пожары, начинаясь поджогами в населенных пунктах, быстро распространялись по сухой ветоши залежных полей (сгорело свыше 30 км²) и охватывали соседние леса. Летние пожары приняли катастрофический характер верховых. Общая площадь горельников только в украинской части зоны отчуждения составила, по разным оценкам, 120–150 км²» [10].



А



Б



В

Рис. 9 (А, Б, В). Лесной пожар и его последствия в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС

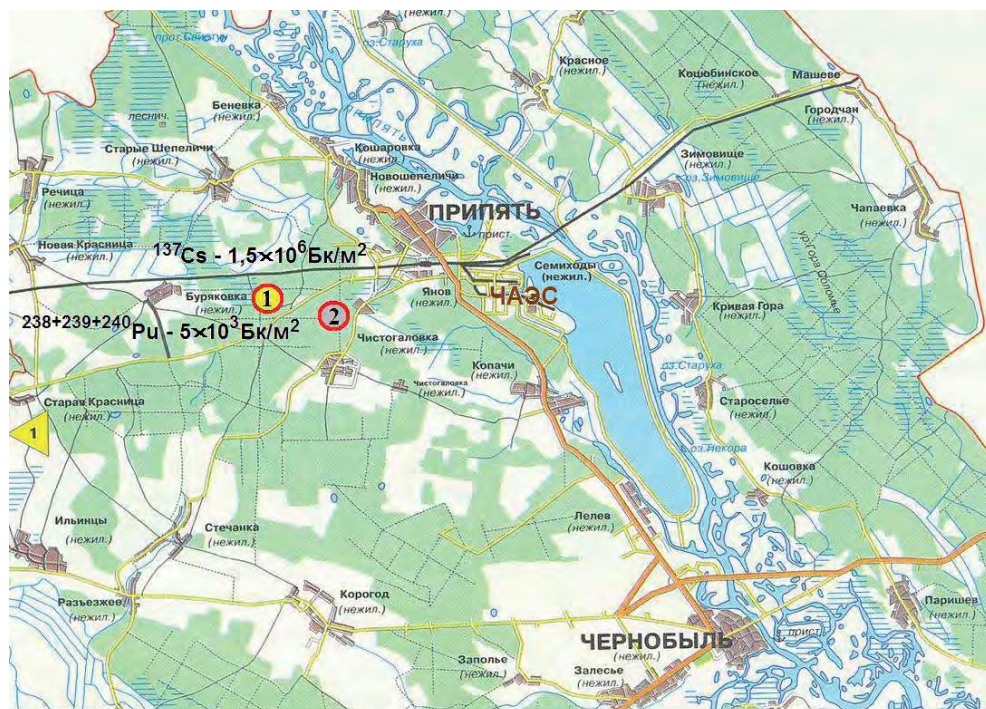


Рис. 10. Места отбора проб (точки 1 и 2) при пожаре 29 июля 1992 г. Указана средняя плотность поверхностного загрязнения почвы ^{137}Cs и изотопами плутония

ветер (1–3 м/сек) со стороны очага пожара. Для этого было выбрано место с подветренной стороны в районе деревни Чистогаловка. Точка отбора находилась в 2–2,5 км от фронта пожара.

Для проведения измерений в ОЯРБ была сформирована мобильная группа. В ее распоряжении имелась аспирационная установка производительностью $\sim 75 \text{ м}^3/\text{ч}$, работающая от автомобильного аккумулятора напряжением 12 В (рис. 11).

Отбор аэрозолей производился на фильтр ФГШ-15-1,5 площадью $0,51 \text{ м}^2$. Фильтродержатель установки, расположенный вертикально, конструктивно представлял собою корзину-цилиндр из нержавеющей стали диаметром 27 см и высотой 60 см. Его нижний край при проотборе находился на расстоянии 1,33 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 днем на кромке пожара близ шоссе Припять — Полесское в 3 км восточнее дер. Буряковка и продолжался 55 мин. Здесь же перпендикулярно распространению дымового шлейфа на высоте 2 и 5 м от земли были растянуты два вертикальных планшета размером $75 \times 75 \text{ мм}$ из марли, пропитанной смесью машинного масла с автолом. Их экспозиция продолжалась сутки.

К моменту начала пробоотбора большой участок леса уже выгорел. Продолжала гореть лишь лесная подстилка (мох, сфагнум, сосновая хвоя), образуя густой дым молочного цвета. На открывшемся песке лежал белесоватый пепел, который был также взят для анализа.

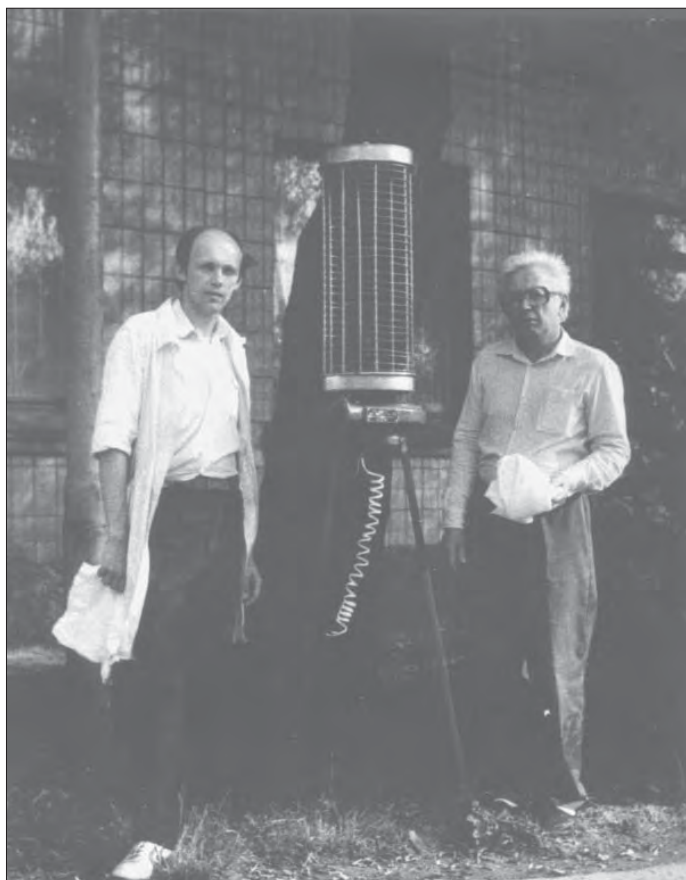


Рис. 11. Сотрудники ОЯРБ у мобильной аспирационной установки, с помощью которой проводились измерения при пожаре в зоне 29.08.92 г.

Второй пробоотбор (точка 2) был начат около 18 ч. того же дня близ шоссе Чистогаловка-Ильинцы в 2–2,5 км от фронта пожара, откуда западный порывистый ветер гнал шлейф дыма. Пробоотбор продолжался 72 мин. 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 темно-серым. Оказавшиеся на нем кусочки коры были перед началом анализа удалены.

Сразу после отбора пробы были доставлены в ОЯРБ для проведения гамма-спектрометрических и радиохимических анализов.

Результаты этих анализов представлены в таблице 2.

Уже первое сравнение полученных значений концентрации цезия-137 и плутония в воздухе со существовавшими в то время нормами радиационной безопасности (НРБ-76/82) показало, что в точке 1 существовало двухкратное превышение этих норм по суммарным изотопам плутония (см. таблицу 3).

Концентрация ^{137}Cs в этой точке была менее критической и находилась на уровне $\text{ДК}_\text{б}$.

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

Радионуклид	Аэрозоли, Бк/м ³		Планшеты, Бк/планшет, точка 1		Пепел, Бк/г, точка 1	Выпадения, Бк/г, точка 2
	Точка 1	Точка 2	Высота H = 2 м	Высота H = 5 м		
¹⁴⁴ Ce	0,34	<0,08	33	57	54	30,7
¹⁰⁶ Ru	0,37	<0,1			48	
¹³⁷ Cs	17	1,1	420	680	1100	
¹³⁴ Cs	1,22	0,06	28	54	82	
¹⁵⁴ Eu					12	
²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	0,064	0,013				
Выгорание МВт×сут/кг U	11,3	8,3	10,4	12,6	11,8	

Таблица 3. Концентрация цезия-137 и плутония в воздухе в единицах ДКА

Радионуклид	ДКА (НРБ-76/82), Ки/л	Концентрация в точке 1, в единицах ДКА	Концентрация в точке 2, в единицах ДКА
¹³⁷ Cs	$1,4 \times 10^{-11}$	3×10^{-2}	2×10^{-3}
²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	$9,0 \times 10^{-16}$	2	< 0,4

Во время лесного пожара неизбежно возникают восходящие потоки воздуха, захватывающие вместе с пеплом радиоактивные частицы.

Очевидно, что в месте отбора первой пробы, находящемся на периферии пожара и продуваемом свежим воздухом, концентрация аэрозолей будет существенно меньше, чем в центре лесного пожара, где нет продувки, но интенсивно ведутся работы по ликвидации пожара с применением воды.

Последнее важно, поскольку при испарении воды восходящие потоки пара и воздуха особенно сильны. Отсюда можно сделать обоснованное предположение о возможном многократном превышении ДКА по плутонию в центре лесных пожаров, возникающих в 30-километровой зоне отчуждения ЧАЭС.

Первым и очевидным выводом из полученных данных было то, что персонал, принимающий участие в ликвидации пожаров, возникших в 30-километровой зоне отчуждения ЧАЭС (пожарные, шоферы спецмашин, милиция, бригады ликвидаторов и т.д.), должен в обязательном порядке иметь и использовать при работе средства индивидуальной защиты дыхательных путей от радиоактивных аэрозолей.

Дирекция ОЯРБ МНТЦ обратилась в администрацию зоны отчуждения с соответствующим представлением.

Сначала оно было воспринято скептически, но потом, после соответствующих проверок, вызвало серьезную обеспокоенность и послужило одним из аргументов для создания специализированного предприятия по уходу за лесом — «Чернобыльлес» (сейчас это предприятие называется «Чернобыльская Пуща»¹¹).

¹¹Государственное специализированное производственное комплексное лесное предприятие «Чернобыльская пуща» осуществляет лесохозяйственную деятельность (посадка леса, рубки ухода и т.д.), а также выполняет противопожарные мероприятия в лесных массивах чернобыльской зоны отчуждения.

В дальнейшем, анализируя полученные результаты и знакомясь с работами в этой области, сотрудники ОЯРБ пришли еще к ряду выводов, которые сводятся к следующему (см. [9]).

- При лесном пожаре в 30-километровой зоне отчуждения аэрозольные частицы дымового шлейфа содержат радионуклиды, характерные для выпадений на местности в результате аварии на ЧАЭС в 1986 г.

- Основным источником радиоактивных аэрозолей является горящая лесная подстилка, а охваченные огнем деревья поставляют в воздух относительно малое количество цезия-137 и стронция-90 и лишь следы плутония и церия-144. При низовом пожаре страдает в основном верхний слой подстилки. При верховом пожаре часто происходит ее полное выгорание. Именно такие пожары представляют наибольшую радиационную опасность.

- На территориях, которые характеризуются плотностью выпадения $P_{\text{в}}$ свыше 5 кБк/м^2 , на кромке распространения пожара концентрация $P_{\text{в}}$ в аэрозолях может превышать уровень $\text{ДК}_{\text{А}}$.

- Основными носителями радиоцезия в дымовом шлейфе являются субмикронные аэрозоли (с частицами менее $0,4 \text{ мкм}$ связано до 40% полной активности), что обеспечивает их длительное существование в атмосфере и перенос на большие расстояния. При метеоусловиях наблюдавшегося лесного пожара 10-кратное снижение концентрации радиоактивных аэрозолей в дымовом шлейфе происходило лишь на удалении 2–2,5 км от фронта пожара.

К настоящему времени вопрос о радиационной опасности лесных пожаров в 30-километровой зоне ЧАЭС рассматривался во многих работах, среди них можно назвать — [11–16].

В заключение этого раздела мы приведем карту размещения основных лесных массивов в чернобыльской зоне с указанием выгоревших участков леса (темный цвет) (см. рис. 12 [17])

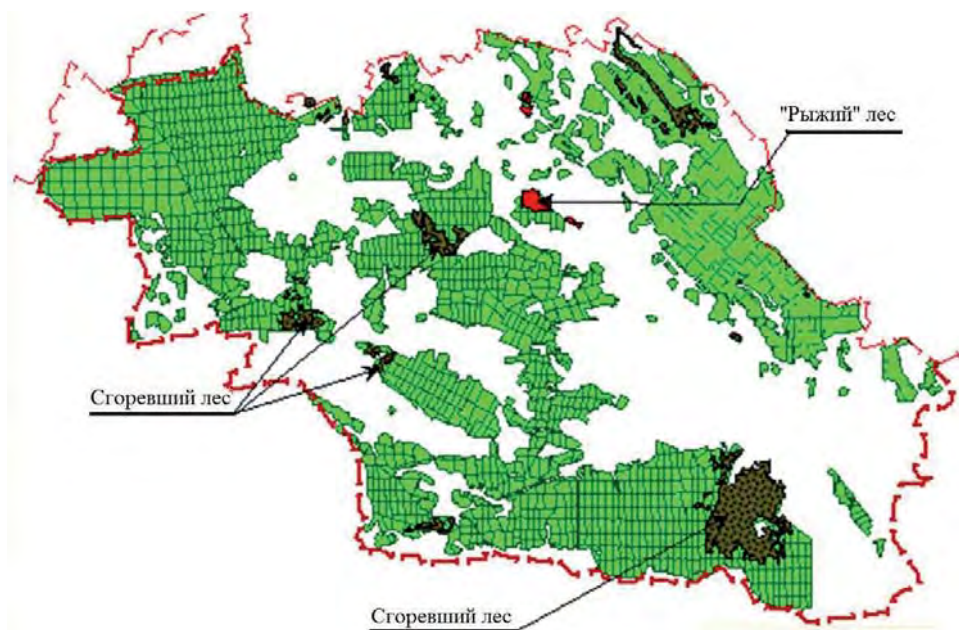


Рис. 12. Карта размещения основных лесных массивов в чернобыльской зоне с указанием выгоревших участков леса (темный цвет)

16.4. Обследование населенных пунктов. «Корад»

Согласно закону, принятому в 1991 году, для населения, проживающего в местности, подвергшейся загрязнению при аварии на ЧАЭС, вводились четыре зоны, которые определялись плотностью загрязнения по ^{137}Cs :

- $1 \div 5 \text{ Ки/км}^2$ — зона с особым социально-экономическим статусом, где население не отселяли, но следили за состоянием здоровья проживающих, и вводились определенные льготы;
- $5 \div 15 \text{ Ки/км}^2$ — зона с правом на отселение, там проводилось подворное обследование, люди имели право заявить, что они не хотят здесь оставаться, и государство обязано было бесплатно их переселить;
- $15 \div 40 \text{ Ки/км}^2$ — зона отселения, люди имели право отселиться;
- более 40 Ки/км^2 — зона обязательного отселения, откуда людей должны были вывозить в обязательном порядке, а инфраструктура подлежала разрушению.

Исполнение этого закона требовало проведение подворного обследования, особенно там, где величина загрязнения колебалась в пределах $5 \div 40 \text{ Ки/км}^2$. Поэтому Госкомгидромету совместно с заинтересованными министерствами и ведомствами было поручено завершить в уже в 1991 году подворную радиационную паспортизацию населенных пунктов, расположенных в контролируемой зоне.

Дело это оказалось гораздо более сложным, чем простое проведение дозиметрических измерений (МЭД).

Из-за пятнистости загрязнений и их различной заглубленности в почву необходимо было отбирать несколько проб на каждом подворье. При отборе одной-двух проб результаты получались крайне неточными, а отбор достаточного количества проб (≥ 10) требовал больших трудозатрат.

Пример обычного разброса значений поверхностного загрязнения ^{137}Cs одного из подворьев, в котором измерения проводили специалисты КИ в 1988 г., приведен на рис. 13.

К 1989 г. в КЭ был уже накоплен опыт использования коллимированных детекторов, с помощью которых проводились исследования на 4-м блоке и на площадке ЧАЭС. В первой части настоящей работы (раздел 2.2.2) говорилось об успешном применении гамма-визора при исследовании распределения поверхностной активности на засыпке центрального зала разрушенного реактора (сентябрь 1986 г.) В дальнейшем были выполнены работы по поиску фрагментов ядерного топлива и пятен повышенной активности внутри помещений и на крышах 3-го и 4-го блоков, на промплощадке станции и др. (см., например, [18–23]).

Поэтому на основе полученного опыта под руководством В.Г. Волкова [18] был достаточно быстро разработан ряд приборов, которые могли оперативно выполнять на местности дистанционные измерения поверхностного загрязнения.

В 1989–1991 гг. такие измерения проводились сотрудниками КЭ в населенных пунктах 30-километровой зоны.

В одном из первых радиометров в качестве детектора использовался сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) диаметром 50 мм и длиной 50 мм, с толщиной защиты 35 мм и углом коллимации 90° .

Прибор имел специальную подставку и устанавливался на фиксированном расстоянии от земли.

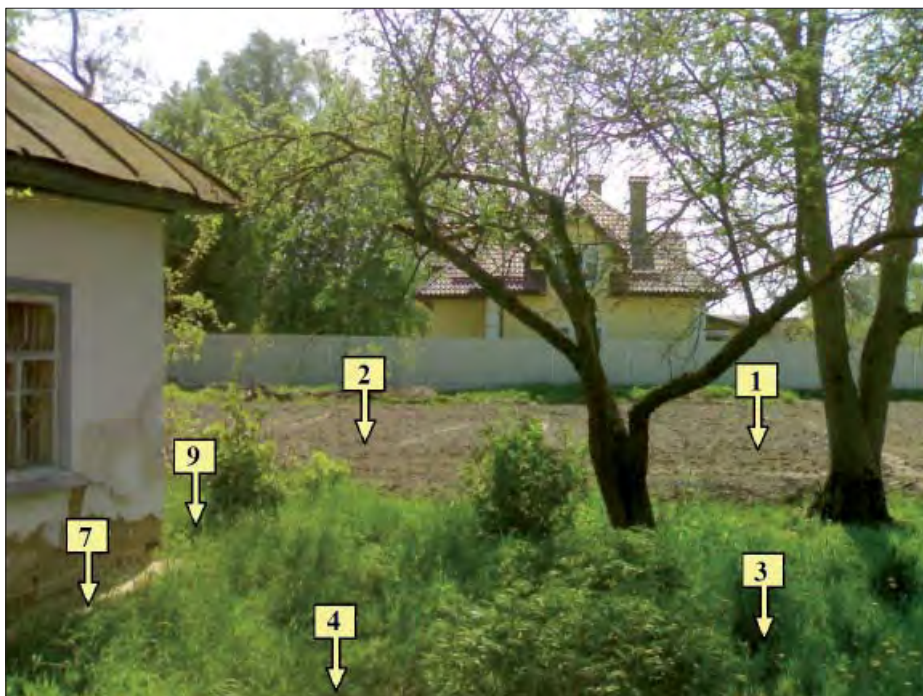


Рис. 13. Результаты обследования загрязненности почвы (^{137}Cs). На указателях приведены значения (в $\text{мкКи}/\text{м}^2$), полученные при измерении отобранных в этих точках проб грунта. Как обычно, более высокий уровень загрязнения наблюдался под водостоком — (7–9) $\text{мкКи}/\text{м}^2$. На вспаханном участке перед обработкой был удален тонкий верхний слой почвы

Радиометр калибровался с помощью точечного источника ^{137}Cs .

Чтобы учесть фоновую компоненту счета (относительно небольшая часть гамма-излучения могла пройти через боковую защиту), прибор устанавливали так, чтобы коллиматор был повернут вертикально вверх. Счет детектора в таком положении считался фоновым и вычитался из счета, зарегистрированного при рабочем положении радиометра.

Всего таких приборов изготовили 8 и с их помощью провели измерения в районе ЧАЭС (см. рис. 14), в ряде кварталов г. Чернобыля, деревнях, находящихся в зоне отчуждения, вдоль течения р. Припять и др.

Вначале регистрация ^{137}Cs проводилась по скорости счета радиометра в энергетическом диапазоне $\Delta E_2 = (600\text{--}720) \text{ кэВ}$, т.е. в пике полного поглощения (рис. 15).

Этот метод позволял строить достаточно точные карты загрязнения цезием в том случае, если заглубление радионуклида в почву не превышало $\sim 4 \text{ см}$. Это условие выполнялось в 1989–1990 гг. практически для всех необрабатывавшихся после аварии территорий.

Если же встречались обработанные участки, например, вспаханные, то точность калибровки нарушалась — заметная часть γ -квантов, проходя через слой почвы, теряла энергию, и при регистрации не попадала в выбранный энергетический диапазон. Что приводило к занижению измеренной загрязненности почвы по отношению к реальной.



Рис. 14. Проведение измерений с коллимированным радиометром [23]

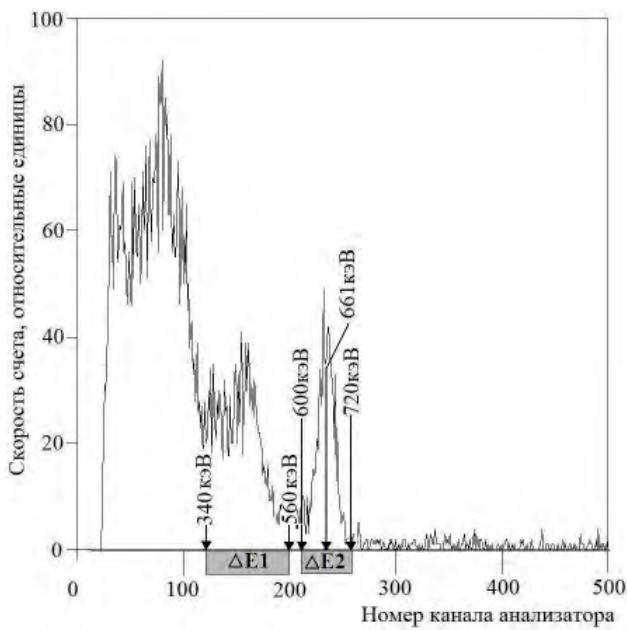


Рис. 15. Спектр γ -излучения ^{137}Cs , регистрируемый кристаллом NaI(Tl) , и энергетические диапазоны $\Delta E_1 = (340\text{--}560)$ кэВ и $\Delta E_2 = (600\text{--}720)$ кэВ, выбранные для определения поверхностного загрязнения с помощью радиометра

Для того чтобы устранить этот эффект, было предложено изменить энергетический диапазон регистрации γ -излучения ΔE_2 . В качестве нового диапазона был выбран $\Delta E_1 = (340\text{--}560)$ кэВ.

Расчеты и контрольные эксперименты показывали, что в нем скорость счета гораздо слабее зависит от глубины проникновения ^{137}Cs в почву.

«Слабая зависимость скорости счета гамма-локатора в этом диапазоне от величины заглубления радионуклида объясняется тем, что скорость счета в

нем формируется как за счет регистрации детектором нерассеянного (первый компонент), так и рассеянного излучений (второй компонент).

Второй компонент в указанном энергетическом диапазоне спектра обусловлен регистрацией фотонов, однократно рассеянных в почве на малые углы. По мере заглубления радионуклидов первый компонент уменьшается (за счет ослабления нерассеянного излучения), второй — возрастает (за счет накопления рассеянного излучения).

Эти два конкурирующих процесса практически компенсируют друг друга, обеспечивая слабую зависимость» [23].

Накопленный опыт позволил специалистам КИ создать достаточно универсальный прибор для дистанционного определения на местности количества ^{137}Cs в почве с учетом его заглубления. В дальнейшем он широко применялся при полевых исследованиях. Прибор получил название «КОРАД» (коллимированный радиометр гамма-излучения¹²) [24–26].

Принципиальным отличием от прежних приборов стало то, что радиометр может измерять скорость счета детектора в трех энергетических диапазонах:

- комптоновском — $\Delta E_1 = (340–560)$ кэВ,
- в пике полного поглощения — $\Delta E_2 = (600–720)$ кэВ,
- и в высокоэнергетической области — $\Delta E_3 = (740–900)$ кэВ.

По счету в первом диапазоне определяется полное количество ^{137}Cs , находящееся на данной площади.

Счет слабо зависит от величины заглубления радионуклида и от характера его распределения (вплоть до глубин до 3λ , где λ — длина свободного пробега в почве гамма-излучения ^{137}Cs).

Отношение счета во втором диапазоне к счету в первом чувствительно к величине заглубления цезия, и по нему можно оценить, насколько глубоко проник он в почву.

Расчеты и эксперименты показали, что при равномерном, треугольном или экспоненциальном распределении радионуклида по глубине ошибка в определении полного количества ^{37}Cs не должна превышать 20%¹³.

Наконец, третий диапазон измерений необходим для определения фона, связанного с присутствием в почве естественных радионуклидов (изотопов U и Th и 40 K).

В радиометре используется коллимированный сцинтилляционный детектор NaI(Tl) размером 50×50 мм.

Программное обеспечение радиометра позволяет осуществлять его калибровку перед измерениями¹⁴, выбирать условия и режим измерения, измерять спектры γ -излучения на местности, осуществлять обработку, запоминание, протоколирование, визуальную индикацию результатов измерений на экране встроенного дисплея.

«КОРАД» позволяет хранить в памяти величины поверхностной активности и полного содержания ^{137}Cs в слое почвы, измеренные в 1000 точках, а также записывать 44 спектра излучения.

¹²Радиометры гамма-излучения РКГ-09Н (КОРАД). Номер по Госреестру 13514-93. Год регистрации 1993. См. <http://www.all-pribors.ru/si/radiometry-gamma-izlucheniya-rkg-09n-korad-35426>.

¹³Ознакомиться с обоснованием такого метода определения характера распределения ^{37}Cs по глубине слоя почвы можно по работам [23, 25].

¹⁴Калибровка происходила с помощью плоских источников.

Прибор определяет поверхностную активность ^{137}Cs с пространственным разрешением $\sim 2 \text{ м}^2$ при заглублении радионуклидов в почве до 30–40 см.

Энергетическое разрешение детектора для γ -излучения с энергией 661 кэВ составляет $\sim 8\%$.

Внешний вид радиометра показан на рис. 16 (А и Б).

Сравнение результатов, полученных с помощью радиометра «КОРАД», с результатами анализов проб почвы проводилось неоднократно (см. рис.17).

Полученные данные показывают, что стандартное отклонение между данными пробоотбора и радиометрии не превышает 22%.

Математические модели, разработанные для радиометра «КОРАД», показали, что с его помощью можно не только определять степень загрязнения и глубину его проникновения в почву, но и толщину чистого слоя, если этот слой находится на поверхности загрязненного участка (например, положен сверху при работах по дезактивации).

Была выработана и утверждена методика, по которой с помощью радиометров «КОРАД» проводились детальные обследования населенных пунктов на территории, подвергшейся загрязнению в результате аварии на ЧАЭС. Эти обследования позволяли принять оптимальный план действий по дезактивации и реабилитации, а после выполнения запланированных работ определить их эффективность.

Полученные данные наносились на электронные карты местности с масштабом — 1:2000.

«При среднем уровне активности $\sigma \approx 3,7 \times 10^5 \text{ Бк/м}^2$ с помощью каждого прибора «Корад» удавалось делать 100÷150 измерений в день. Обычно на каждом подворье проводилось ≈ 15 –20 измерений. Затем данные перекачивались в компьютер, и в лабораторных условиях проводилась их обработка, и создавался банк данных» [23].

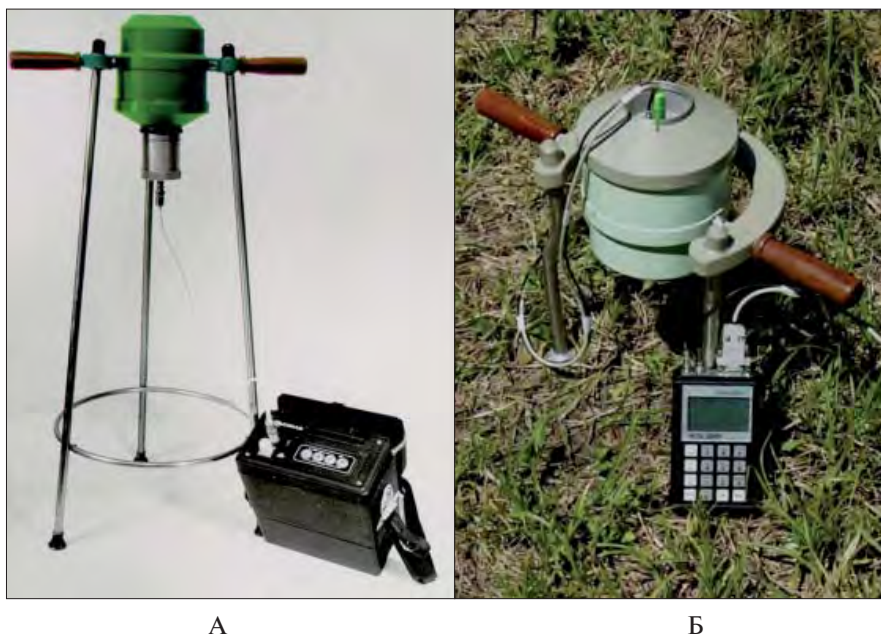


Рис. 16 (А и Б). Коллимированный радиометр гамма-излучения «КОРАД»

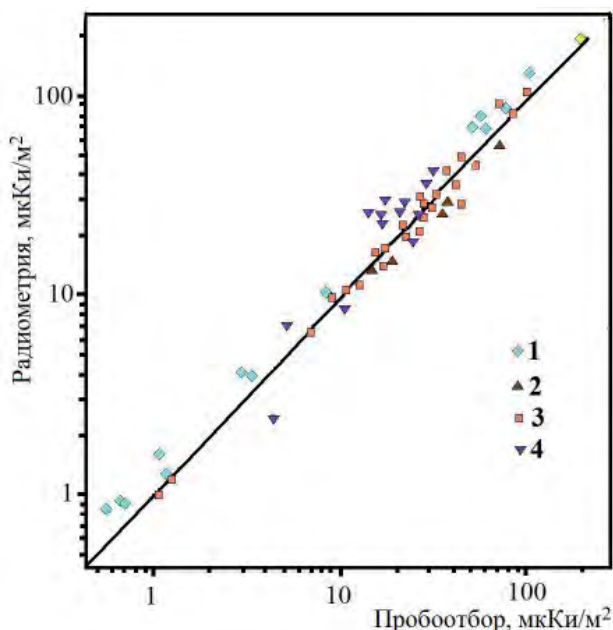


Рис. 17. Результаты верификации радиометра «КОРАД», выполненные:
 1 – НПО «Тайфун» (16 площадок, 1994 г.);
 2 – РНЭЦ Госкомчернобыль РФ (12 площадок, 1993 г.);
 3 – ГЕОХИ РАН (1995–2002 гг.);
 4 – зарубежными специалистами (Roed et. al., 1996; Heinemann, Hille, 1997)

В качестве примера использования всех возможностей радиометра можно привести работу, выполненную в 1994 г. для оценки эффективности дезактивации, проведенной в деревне Хальч Гомельской области (см. карту на рис. 18).

В результате аварии на ЧАЭС почва в деревне была загрязнена ^{137}Cs (северо-западный след, см. Глава 10, рис. 1). По уровню выпадений ее территория относилась к зоне с поверхностной активностью цезия в $(5 \div 15)$ Ки/км², в которой должно было выполняться подворное обследование. По его результатам в ряде мест почва была дезактивирована — ее верхний слой снимали, покрывали чистыми материалами и т.п.

Наибольшее опасение вызывали загрязнения, обнаруженные около детских учреждений. Поэтому там дополнительная проверка эффективности принятых мер была выполнена с помощью радиометра «КОРАД».

«Измерение распределения уровней загрязнения ^{137}Cs было проведено в районе школы на площади 3 га. Общее число точек измерения было около 800. Среднее значение запаса составляло 0,44 МБк/м² (12 мкКи/м²), его величина менялась в пределах от 0 до 2,6 МБк/м² (70 мкКи/м²), а среднее значение глубины проникновения было 1,2λ (15 г/см²). Расстояние между точками измерения (в среднем около 5 м) зависело от градиентов пространственного распределения запаса. ... На момент проведения измерений основная часть двора была почищена. Однако отдельные наиболее загрязненные места были найдены на обследуемой территории, например, сливы с крыш». [23].

Данные проведенных измерений позволили построить карты распределения загрязнения, глубины его проникновения в почву и толщины чистого слоя, положенного при дезактивации (рис. 19).

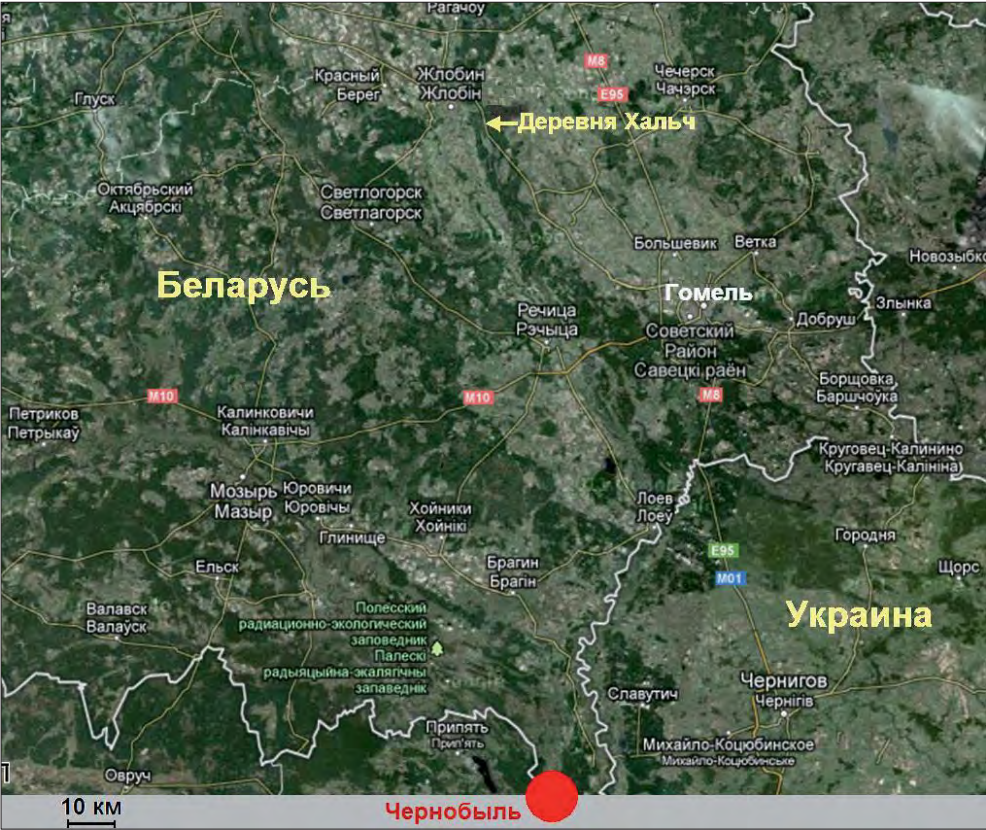


Рис. 18. Гомельская область, деревня Хальч

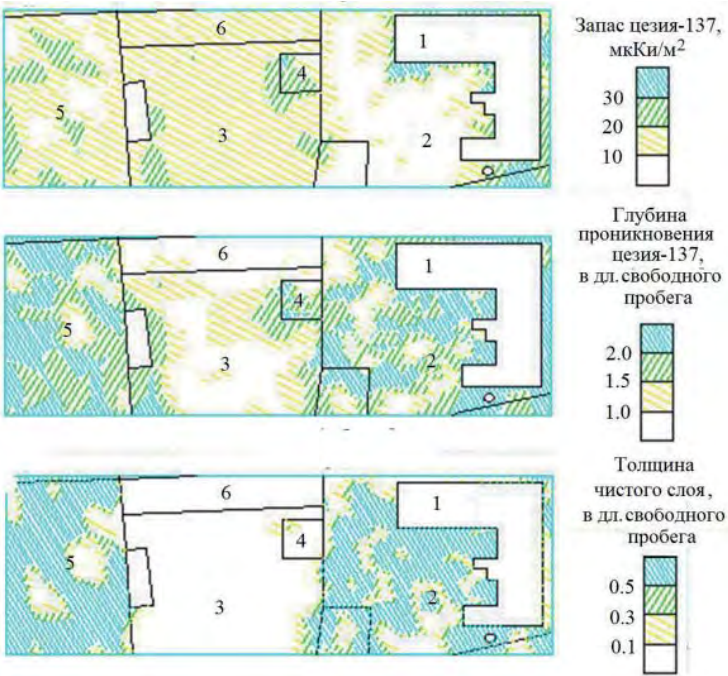


Рис. 19. Карты загрязнений ^{137}Cs , полученные в 1994 г. с помощью радиометра «КОРАД» в деревне Хальч Гомельской области в районе школы [23]

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернобыль. Пять трудных лет. М.: ИЗДАТ, 1992.
2. Беляев С.Т. Ликвидация последствий чернобыльской катастрофы. Природа, № 11, 1990 г.
3. Кулаков В.М., Пчелин В.А., Родионов Ю.Ф. Докладная записка академику С.Т. Беляеву. 15 мая 1986 г. — 2 с.
4. Borovoi A.A., Fission product and transuranic release during Chernobyl accident (to be presented at International Conference «The fission of nuclei — 50 years», Leningrad 1989). Препринт КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова, Чернобыль, 1990, 20 с.
5. Агеев В.А., Выричек С.Л., Гайдар А.В. и др. Загрязнение территории зоны отчуждения ЧАЭС основными долгоживущими радионуклидами. В сборнике «Объект «Укрытие» — 10 лет. Основные результаты исследований. МНТЦ «Укрытие». Чернобыль, 1996 г., с. 140—147.
6. Боровой А.А. Мой Чернобыль. — Новый мир, 1996, № 3, с. 132—180.
7. Коловоротный С. Славутич — уникальный объект для медицины. Газета «Аптека» № 254 (33), 28.08.2000 <http://pda.apteka.ua/article/32771>.
8. Некоторые данные о состоянии воздушной среды 30-километровой зоны отчуждения ЧАЭС в условиях значительного экологического возмущения (лесной пожар). Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» о НИР (работа внеплановая). 1992. — 12 с.
9. Пазухин Э.М., Боровой А.А., Огородников Б.И. Лесной пожар как фактор перераспределения радионуклидов чернобыльского генезиса в окружающей среде. — Радиохимия, 2004, т. 46, № 1, с. 93—96.
10. Наумов А. Пожары в зоне ЧАЭС. <http://h.ua/story/27403/>
11. Опасность верховых пожаров в лесах Чернобыля. http://chornobyl.in.ua/wp-content/uploads/type_forest.gif
12. Абдурегимов И.М., Однолько А.А. Пожары на радиационно-загрязненных территориях//Природа, 1993, № 1, с. 28—30.
13. Абдурегимов И.М., Однолько А.А. Чернобыльское эхо лесных пожаров//Лесное хозяйство, 1994, № 2, с. 30—32.
14. Азаров С.И. Оценка предрасположенности ландшафтов чернобыльской зоны отчуждения к пожарам. Проблеми Чорнобильської зони відчуження. Науково-технічний збірник. Т. 3, Київ, Наукова думка, 1996, с. 204—208.
15. Будыка А. К., Огородников Б. И. Специфика радиационной обстановки при лесных пожарах в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. <http://nuclearwaste.report.ru/material.asp?MID=416>.
16. Будыка А.К., Огородников Б.И. Влияние некоторых природных процессов на образование и характеристики аэрозолей в районах, загрязненных радионуклидами. Радиационная биология. Радиоэкология, 2001, том 41, № 4, с. 408—412.
17. Пожары и их последствия в чернобыльской зоне <http://chornobyl.in.ua/pozar-chernobyl-zone.html>
18. Волков В.Г. Информационно-измерительные системы и методы радиационной и тепловой разведки при работах по ликвидации последствий инцидентов на объектах использования атомной энергии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2007 г.

19. Волкович А.Г., Ликсонов В.И., Лобановский Д.А. и др. Измерение распределения поверхностной плотности активности в шахте реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС. — Атомная энергия, 1990, т. 69, вып. 3, с. 164–167.
20. Волкович А.Г., Коба Ю.В., Ликсонов В.И. и др. Применение коллимированного детектора при ликвидации последствий аварии в машинном зале 4 энергоблока ЧАЭС, Атомная энергия, 1990, т. 69, вып. 6, с. 389–391.
21. Волкович А.Г., Ликсонов В.И., Лобановский Д.А. и др. Измерение гамма-поля, создаваемого объектом «Укрытие» с помощью коллимированного спектрометра. — Атомная энергия, 1991, т. 71, вып. 6, с. 534–539.
22. Волкович А.Г., Потапов В.Н., Смирнов С.В. и др., Измерение полей фотонного ионизирующего излучения в реакторном зале 4-го блока ЧАЭС. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 3, с. 203–207.
23. Чесноков А.В. Методы обследования радиационно опасных объектов в чрезвычайных ситуациях. Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2010. — 278 с.
24. Говорун А.П., Ликсонов В.И., Ромашко В.П. и др. Спектрально-чувствительный переносной коллимированный гамма-радиометр КОРАД. — ПТЭ, 1994, № 5, с. 207–208.
25. Говорун А.П., Ликсонов В.И., Потапов В.Н. и др. Метод определения плотности загрязнения и оценка глубины проникновения в почву Cs-137. — Атомная энергия, 1995, т. 78, № 3, с. 199–204.
26. Линник В.Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. Москва, 2008. <http://oldvak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/vak/announcements/geogr/LinnikVG.pdf>.

17. РОБОТЫ В ОБЪЕКТЕ «УКРЫТИЕ»

17.1. Почему был написан настоящий раздел

Главных причин — две.

Во-первых, интерес к опыту использования дистанционно управляемых самоходных агрегатов (ДУСА) на объекте «Укрытие» стал увеличиваться по мере развертывания работ по его преобразованию в экологически безопасную систему.

Согласно существующей концепции преобразования, после создания нового безопасного конфаймента планируется выполнить частичную разборку верхних разрушенных конструкций 4-го блока. Следующим шагом должно стать извлечение из «Укрытия» ядерного топлива и радиоактивных материалов, их кондиционирование¹ и окончательное захоронение.

По существующим оценкам, подготовка и выполнение этих операций могут занять десятилетия. Все это время ТСМ будут «храниться» под защитой НБК.

Именно на этапе извлечения ТСМ использование робототехнических систем представляется необходимым.

Поэтому в последние годы разработкой таких систем начал активно заниматься Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины и целый ряд других организаций.

Если бы эта книга писалась до 11 марта 2011, то вторая причина не проявила бы себя. Поскольку предполагалось, что опыт, накопленный за десятилетия использования роботов на объекте «Укрытие», должен был быть достаточно известен и усвоен на международном уровне. Особенно в такой продвинутой в этой области стране, как Япония.

На деле этого не произошло.

Уже в первые дни после начала работ по локализации аварии на АЭС «Фукусима-1» обнаружилось, что роботов, способных вести разведку в условиях высоких радиационных полей внутри разрушенных зданий, в распоряжении японских специалистов нет.

Пришлось прибегать к помощи США и Франции.

Вот что сообщалось в печати.

18.03.2011 г. *«В ближайшие два дня в Японию из Франции прибудет партия роботов для ликвидации последствий аварий на атомных электростанциях. Все роботы разработаны и построены на предприятии GIE Intra. Направляемые в Японию автоматические устройства предназначены для проведения срочных операций в условиях сильной радиации. Они способны осуществлять замеры уровней излучения, а также проводить различные технологические работы, в том числе и по расчистке площадки АЭС.*

Во Франции как государственные, так и частные структуры со времен чернобыльской катастрофы занимаются разработкой и выпуском так называемых утилитарных роботов, способных осуществлять технологические операции» [1].

¹Операция, при которой РАО переводят в форму, пригодную для хранения, переработки, транспортирования и захоронения.



Рис. 1. Роботы PackBot американской компании iRobot

25.03.2011 г. «Группа Special Ops, относящаяся к Силам самообороны Японии, попросила американскую компанию iRobot оказать помощь, выделив своих роботов для спасательных мероприятий на ядерной установке «Фукусима-1».

Недавно стало известно, что четыре робота, в том числе PackBot 510 (см. рис. 1) и Warrior 710 от iRobot, выехали в Японию вместе с командой сотрудников компании для оказания помощи операторам «Фукусимы-1».

Роботы, предоставленные iRobot, будут выполнять различные миссии помощи.

В частности, роботы PackBot 510 оснащены полезным грузом — установкой HazMat, которая может определять величину температуры, показатели гамма-излучения, уровень взрывоопасных газов и паров, а также токсичных химических веществ. Все эти данные в режиме реального времени будут поступать на пульт дистанционного управления контроллеров» [2].

11.04. 2011. «Японские эксперты, ликвидирующие последствия аварии на АЭС «Фукусима-1», используют роботы для замера уровня радиации на станции.

Судя по первым результатам этих замеров, нынешний уровень радиационного излучения в помещениях около первого и третьего реакторов создает условия, крайне трудные для работы людей. Выяснилось, что если сотрудники проведут 4,5 часа у реактора № 3, то максимально допустимая доза их облучения будет превышена.

В ближайшие часы японские власти также намерены отправить роботов в помещения около реактора № 2.

Тем не менее представитель компании TEPSCO, которой принадлежит аварийная АЭС, признал: «Возможности роботов ограничены. В здание должны войти люди» [3].

Через некоторое время начинает выясняться, что привезенные роботы также не могут работать в условиях сильных разрушений (подобных чернобыльским). В Японии срочно конструируют собственные механизмы [4] (рис. 2).



Рис. 2. Робот, созданный специалистами региональных университетов Чика и Тохоку (Япония), специально для работ внутри разрушенных реакторов АЭС «Фукусима-1»

Следующий заголовок говорит сам за себя.

07.07.2011. «Вликвидации последствий аварии на атомной станции Фукусима роботы терпят неудачу.

Роботы из-за сложных условий и радиации оказались не в состоянии выполнить их миссии на аварийной ядерной электростанции «Фукусима-1» в Японии. Первый робот-неудачник был разработан Технологическим институтом Чика (Chiba Institute of Technology) специально для выполнения спасательных мероприятий и восстановительных работ в условиях радиационного или биологического заражения.

Робот был направлен глубоко в недра второго реакторного блока электростанции для оценки количества и загрязнения воды, скопившейся в подвале здания.

Эта работа, являющаяся совершенно невыполнимой для человека из-за высокого уровня радиации, оказалась сложна и для робота, который застрял в одном из лестничных пролетов. Основной причиной неисправности стало повреждение кабеля робота, по которому передавалась энергия для его функционирования, команды управления, обратный видеосигнал с камер и телеметрические данные.

Но не только кабель был виноват во возникшем сбое, до этого, **попав под воздействие радиации, со сбоями работала электроника системы управления**, что стало причиной «неуклюжих» движений робота и порчи соединительного кабеля».

Вторым роботом, так же потерпевшим фиаско во время работы на Фукусиме, стал летающий робот T-Hawk разработки компании Honeywell. И в этом случае **причиной неисправности аппарата стала радиация, которая вызвала сбой в работе электроники**, после чего вышел из строя блок управления двигателями. Робот T-Hawk совершил аварийную посадку на крыше второго реакторного блока станции и больше не отзывался ни на какие команды управления, перестав при этом передавать телеметрические данные.

Точная причина того, что вызвало такую фатальную неисправность, в настоящее время неизвестна. [5].

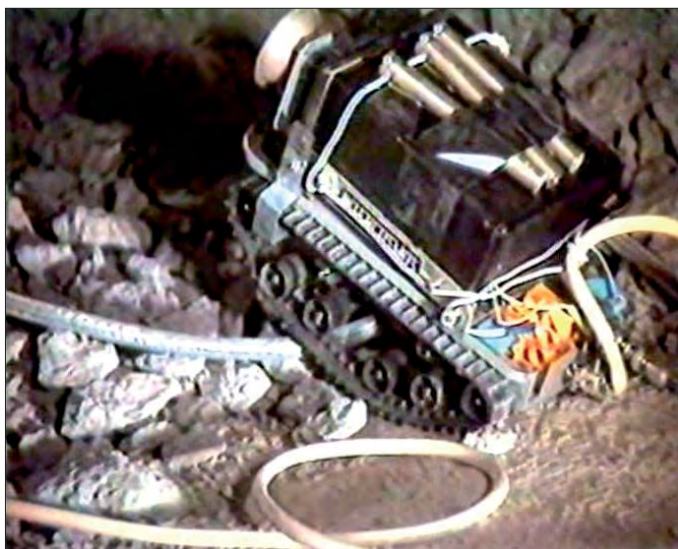


Рис. 3. Детский танк, переоборудованный под «робот-разведчик» на 4-м блоке ЧАЭС. Танк оснащен источником освещения, ТВ-камерой, дозиметрами, термометром

И, наконец, одно из последних сообщений по этой теме (почти через 2 года после аварии).

21.12.2011. *«ТОКИО. Демонтажем реакторов на аварийной АЭС «Фукусима-1» займутся роботы, для разработки которых будет создано специальное конструкторское бюро. Об этом говорится в докладе по среднесрочным и долгосрочным мерам ликвидации последствий аварии, обнародованном правительством страны».*

Итак, японские специалисты вынуждены вновь проделать часть пути, который был уже пройден в Чернобыле.

А путь этот начался практически с первых дней работы на разрушенном блоке. Там постоянно ощущалась острая необходимость в дистанционных средствах разведки и диагностики. Исследователи, работающие на «Укрытии», пытались создать такие средства из подручных механизмов и материалов. Одним из самых известных примеров самодельных «роботов» стало использование детской игрушки — самоходного танка (см. рис. 3).

Вот как это описывает один из участников работы:

«Танк был пластмассовый, величиной с небольшой телефонный аппарат, имел гусеницы и длинный кабель, идущий к пульту управления. По этому кабелю шло питание от батарейки на пульте к электромоторчику на танке и сигналы управления.

Танк мог ехать вперед и назад, разворачиваться и тарыхтеть, имитируя стрельбу. Последнее свойство на блоке не пригодилось, а остальные были использованы в полной мере. Его переоборудовали: заменили кабель на более длинный (около ~15 м) и многожильный, поставили на верх дозиметр, измеритель температуры и закрепили сильный фонарь.

Теперь танк не только двигался, но и проводил примитивную дозиметрическую и тепловую разведку и вообще представлял собой своеобразную «охотничью собаку», которая могла бежать на поводке перед разведчиками при обследовании блока и предупреждать об опасности.

Несмотря на свои весьма ограниченные возможности, он с честью выполнял работу и относительно легко отмывался от радиоактивности. Танк «дожил» до весны 1987 г., после чего уже не подлежал дезактивации и был захоронен на блоке» [6].

Использование самодельных устройств, а не специальных промышленных механизмов происходило потому, что все испытанные российские и зарубежные образцы (около 10) оказались неработоспособными в условиях объекта «Укрытие».

Основных причин, по которым это происходило, было три, и, к сожалению, все из них в той или иной мере стали источниками неудовлетворительной работы роботов на Фукусиме.

- Во-первых, роботы не могли преодолеть разрушенные конструкции, застревали среди них, в результате чего операторы иногда были вынуждены вытаскивать их на руках.

- Во-вторых, при попадании в большие радиационные поля в электронных схемах роботов возникали помехи, которые делали механизмы неуправляемыми — они «сходили с ума».

- В-третьих, в условиях, когда перемещение робота и проведение работ практически всегда сопровождалось подъемом радиоактивной пыли, дезактивация большинства механизмов представляла значительные трудности и приводила к недопустимому облучению персонала.

Как подробно рассказывалось в Части 1, Глава 3, начиная с 1988 г. разведка помещений «Укрытия», в которые не могли проникнуть люди, стала вестись с помощью бурения скважин и использования специальных приборов визуальной, тепловой и радиационной разведки, которые через скважины вводились в эти помещения.

Работы со скважинами потребовали от специалистов Комплексной экспедиции КИ значительных усилий и в то же время продвигались очень успешно. Поэтому вопросы использования робототехники временно отошли на второй план.

Только к концу 1989 г., когда основная часть информации о состоянии конструкций внутри «Укрытия», местоположении и физико-химических свойствах ТСМ была получена, для исследования оставшихся недоступными помещений было решено приступить к разработке специальных робототехнических устройств.

Для этого была привлечена Лаборатория физико-химических проблем ядерной энергетики КИ (руководитель С.С. Абалин), а в составе КЭ в 1990 г. создана специальная лаборатория. Их сотрудники приступили к конструированию дистанционно управляемых самоходных агрегатов для проведения разведки и дезактивации помещений «Укрытия». Испытания механизмов и обучение операторов проводились на специально оборудованном полигоне около лабораторного корпуса в г. Чернобыле (рис. 4).

После создания в 1992 г. в г. Чернобыле Межотраслевого научно-технического центра «Укрытие», продолжившего многие работы КЭ, лаборатория была преобразована в Отдел дистанционных комплексов и технологий (ОДКТ) Отделения ядерной и радиационной безопасности (ОЯРБ) МНТЦ «Укрытие» (рис. 5, 6).

Были изготовлены дистанционно-управляемые самоходные агрегаты, оснащенные системой пылеподавления (они проникали в помещения блока и осаждали радиоактивную пыль с помощью специальных составов), разведы-



Рис. 4. Испытание робота на полигоне (г. Чернобыль)

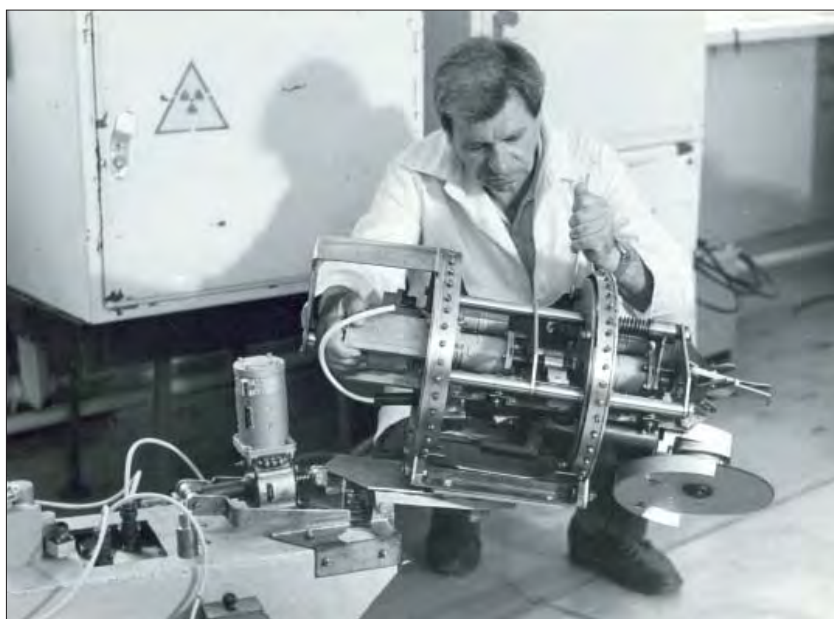


Рис. 5. Наладка одного из роботов в лаборатории (г. Чернобыль)



Рис. 6. Одно из помещений отдела дистанционных комплексов и технологий ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» (г. Чернобыль)

вательные (для ведения фото- и видеосъемки, отбора проб ТСМ и аэрозолей) и семейство роботов различного функционального назначения для подготовительных и монтажных работ.

В 1989–94 гг. ДУСА помогали в проведении исследований на объекте «Укрытие» и позволили значительно уменьшить коллективную дозу, полученную специалистами КЭ, а затем МНТЦ и ЧАЭС (см. [7–14]).

Позднее основная часть ДУСА была передана для эксплуатации персоналу ЧАЭС.

17.2. Требования к ДУСА, сконструированных для работ на объекте «Укрытие»

Опыт, полученный при работе на объекте «Укрытие», в том числе и результаты неудачных попыток использования различных дистанционно управляемых устройств, позволил специалистам КИ сформулировать основные требования к создаваемым ДУСА.

- В исполнительном механизме, находящемся при работе в области больших радиационных полей, необходимо использовать электромоторы, реле и другие элементы, практически не чувствительные к радиации.

- Энергопитание и сигналы управления должны поступать к ДУСА по кабелю, соединяющему его с пультом управления. По кабелю на пульт должна поступать и вся полученная информация. Здесь она может обрабатываться и храниться. Для того чтобы оператор не подвергался опасности, пульт должен располагаться в обслуживаемом помещении².

²Попытки передачи информации и управляющих сигналов по радиоканалу во внутренних помещениях «Укрытия» окончились неудачей из-за экранирующего действия металлических конструкций.

- ДУСА должен обладать высокой проходимостью и быть небольших размеров для проникновения в проломы и работы в разрушенных помещениях.

- Из-за большого количества радиоактивной пыли в помещениях объекта (а иногда и присутствия ЖРО) в конструкции исполнительного механизма необходимо предусмотреть возможность его высокоэффективной и многократной дезактивации. Для этого большинство ДУСА перед работой «закуты-вались» в специальную ткань (см. рис. 7).

- В помещениях «Укрытия» наблюдается высокая влажность. Поэтому должна быть выполнена герметизация (и водоотталкивающая смазка) блоков и частей роботов, для которых нежелательно попадание воды.

- Желательно, чтобы большинство исполнительных механизмов имело унифицированную тележку (платформу).

- Для выполнения сложных заданий надо предусмотреть возможность использования группы роботов, состоящей как из «исполнителей», непосредственно выполняющих работу, так и специальных «наблюдателей», с помощью которых оператор наблюдает и корректирует действия «исполнителей», ведет фото- и телесъемку.

- Кроме этих требований, должны были выполняться и обычные — максимальная простота, надежность, простота ремонта, доступная стоимость и т.п.

Пока шло обдумывание видов и конструкций исполнительных механизмов в экспериментальных мастерских «КИ», начали изготавливаться самоходные платформы для размещения оборудования, изображенные на фотографиях [10–14] (рис. 7–11).

Тележки имели колеса специального профиля.

Ходовая часть состояла из четырех независимых колесных пар, которые могли качаться на собственной оси и имели индивидуальный силовой привод. Такая схема обеспечивает способность ДУСА преодолевать препятствия высотой до 150 мм, выдерживать углы подъема $\leq 30\%$ и двигаться по сыпучим и вязким покрытиям.



Рис. 7. Робот, сконструированный в КИ. Специальное покрытие предохраняет его внутренние детали от запыления

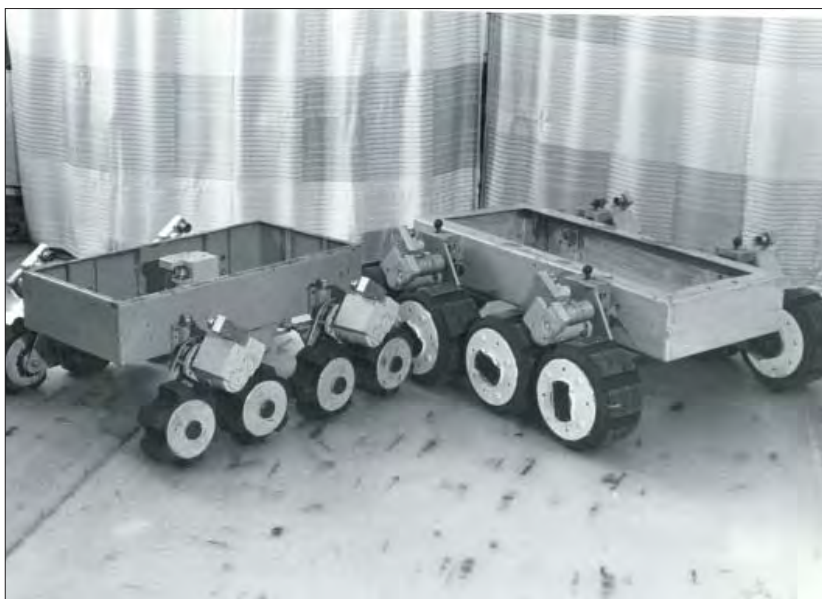


Рис. 8. Различные виды самоходных платформ («тележек»), на которых устанавливались исполнительные механизмы



Рис. 9. Робот преодолевает препятствие

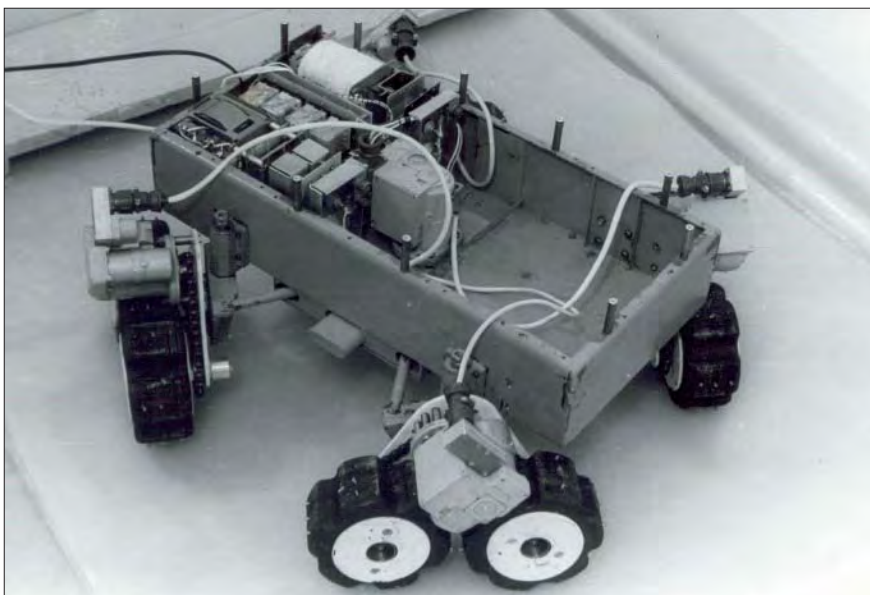


Рис. 10. «Тележка» разворачивается на месте

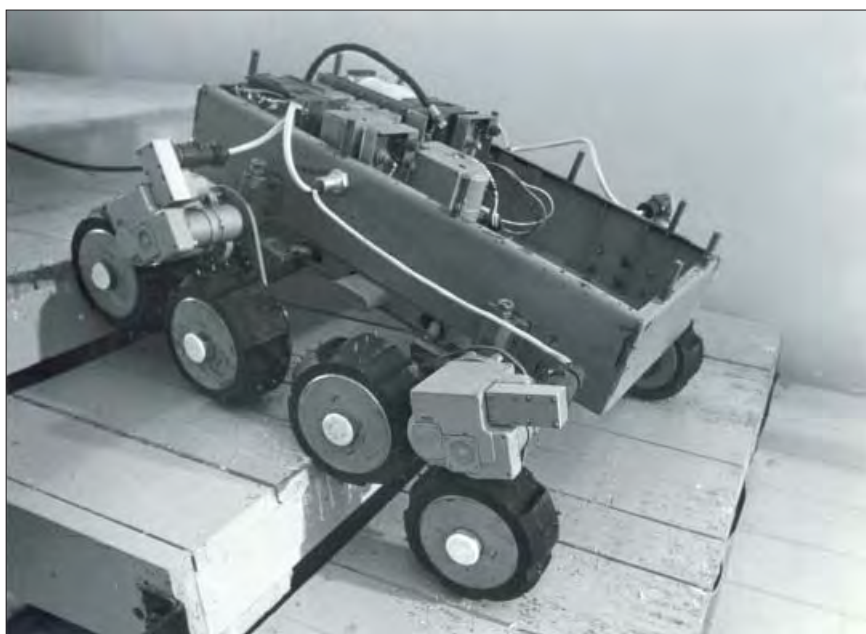


Рис. 11. «Тележка» поднимается по ступеням лестницы

Роботы могли преодолевать различные препятствия в виде громоздких предметов или завалов (рис. 9), разворачиваться на месте (рис.10) и передвигаться по лестничным маршам (рис.11).

Вот некоторые параметры этих платформ:

- вес от 30 до 50 кг;
- грузоподъемность от 50 до 100 кг;
- скорость от 0,6 до 2,5 м/мин;
- длина кабеля управления — 50 м.

Была разработана единая для серии ДУСА система передачи кодированных команд на борт установки, что позволило добиться унификации узлов пультов управления и бортовой автоматики.

Последовательность подготовительных работ, которые обычно выполнялись при использовании ДУСА в помещениях «Укрытия», приведена на диаграмме рис. 12.

17.3. Роботы, созданные для борьбы с радиоактивной пылью [10–14]

ТР-1

Первыми в «Укрытии» начали использоваться роботы, которые проникали в сильно загрязненные помещения, осаждали в них радиоактивные аэрозоли с помощью специальных растворов и наносили пылеподавляющие покрытия на стены, потолок, оборудование.

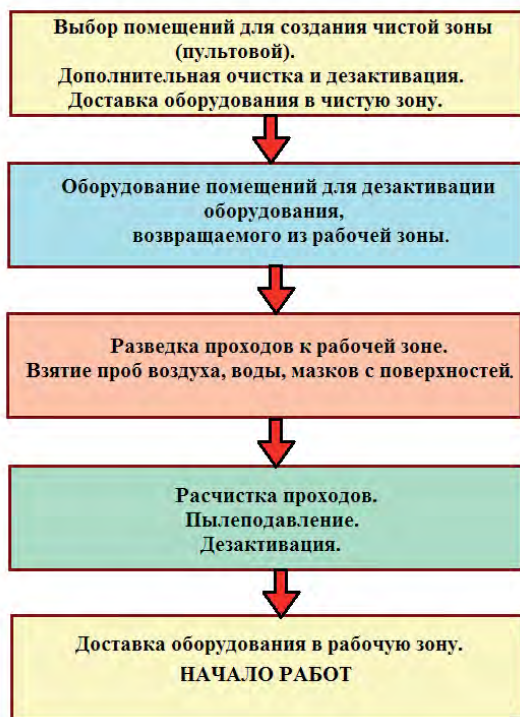


Рис. 12. Последовательность подготовительных работ, которые выполнялись при использовании ДУСА в помещениях «Укрытия»

Для этого на дистанционно управляющем шасси была установлена распыляющая установка. Пылеподавляющий раствор (см. Часть 2, Глава 11) с помощью насоса подавался по шлангу из бака в форсунку с дистанционным управлением. Форсунка распыляла раствор, который осаждал аэрозоли и связывал пыль на поверхностях.

Дистанционное управление осуществлялось по кабелю длиной 25 м. ДУСА могли преодолевать препятствия высотой до 150 мм, передвигаться по лестницам, разворачиваться на месте.

Они использовались в 1989–1992 гг. на объекте «Укрытие» (см. рис. 13 и 14) и, несмотря на относительную простоту, позволили, по оценкам специалистов, уменьшить коллективную дозу персонала на $\sim 10\,000$ мЗв.

ДУСА для взятия проб аэрозолей и очистки воздуха в помещении

Как уже неоднократно говорилось, выполнение в помещениях «Укрытия» различных работ и даже простое перемещение в них персонала во многих случаях приводило к подъему пыли и значительному возрастанию аэрозольной активности. Для взятия проб аэрозолей и очистки воздуха от пыли были изготовлены специальные ДУСА (рис. 15).



Рис. 13. Подготовка к работе ДУСА ТР-1 для проведения пылеподавления



Рис. 14. ТР-1 во время работы на объекте «Укрытие»



Рис. 15. ДУСА для очистки воздуха в помещениях «Укрытия» от пыли

Большой интерес вызвало предложение использовать в этих агрегатах регенерируемые металлокерамические фильтры.

Многослойные металлокерамические фильтры (МКФ) применяются для высокой и сверхвысокой очистки газов от дисперсных микрозагрязнений.

Фильтрующие элементы имеют многослойную структуру, состоящую из тонкопористых металлических или металлокерамических слоев, армированных грубопористой основой.

Особым преимуществом МКФ для работы в «Укрытии» являлась возможность его автоматической регенерации с помощью обратного импульса сжатого воздуха, без нарушения процесса фильтрации (см. схему фильтра на рис. 16).

Это позволяло очищать фильтр, не выводя установку из рабочей зоны.

Характеристики собранной в специальный контейнер пыли могли быть изучены в лаборатории. Кроме того, МКФ выдерживал длительный период эксплуатации, обладал высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью и высокой устойчивостью при работе в радиационных полях.

Созданная в КИ установка для очистки воздуха («Фора-1») успешно прошла лабораторные испытания. В 1990 году она была испытана и в рабочих помещениях объекта «Укрытие». Технические характеристики установки приведены в таблице 1.

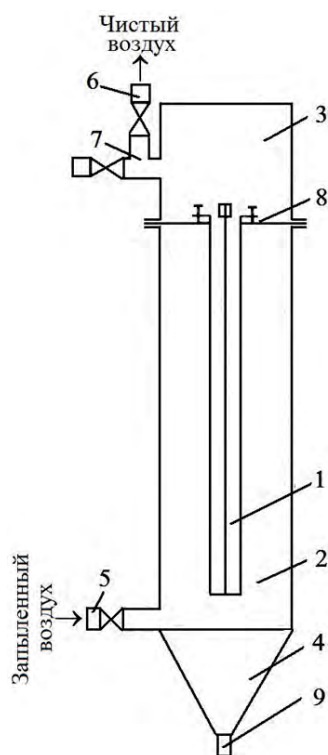


Рис. 16. Схема металлокерамического фильтра, использовавшегося на ДУСА [15]: 1 — фильтр; 2 — камера, наполненная запыленным воздухом; 3 — камера очищенного воздуха; 4 — бункер для сдуваемой с фильтра пыли; 5 — штуцер входа; 6 — штуцер выхода чистого газа; 7 — штуцер для продувки сжатым воздухом; 8 — трубная решетка; 9 — сброс пыли

Таблица 1. Некоторые технические характеристики установки «Фора-1»

Устройство подачи воздуха	Размеры	800×800×2000 мм
	Вес	120 кг
Устройство управления	Размеры	700×600×1600 мм
	Вес	80 кг
Максимальная производительность по воздушному потоку		36 м ³ ч ⁻¹
Средний размер пор фильтрационного слоя		5 мкм
Минимальный размер задерживаемых частиц пыли		0.1 мкм
Расчетная эффективность очистки воздуха от аэрозолей		99,99%
Материал металлокерамических фильтров		никель

Испытания проводились в помещениях 564/2 (объем 140 м³) и 205/4 (объем 210 м³). В первом из них после 18-ти часов работы установки произошло снижение концентрации радиоактивных аэрозолей с $3,0 \times 10^{-15}$ до $3,0 \times 10^{-16}$ Ки л⁻¹. В помещении 205/4 концентрация снизилась с 7×10^{-14} до $5,2 \times 10^{-16}$ Ки л⁻¹ после 32 часов работы.

К сожалению, недостаток финансирования в 90-е годы не позволил развивать дальше это направление работ.

17.4. ДУСА для отбора проб ТСМ и бетона (ТР-2 [10–14])

К 1990 г. стало очевидным, что объект «Укрытие» в будущем необходимо преобразовать в экологически безопасную систему [16]. Началась предварительная проработка эскизного проекта такой системы³.

Среди многих вопросов, возникших при проектировании, одним из важнейших был вопрос о количестве и классификации РАО, находящихся в «Укрытии». Предварительные оценки носили полукачественный характер и требовали уточнения.

В частности, было не ясно, на какую глубину при взрыве проникла в бетонные конструкции 4-го блока топливная пыль. Например, в стены комнат и коридоров, которые при взрыве оказались соединенными с шахтой реактора или подаппаратным пом. 305/2. Речь могла идти о сотнях тонн сильно загрязненного бетона.

Специалисты КЭ приступили к исследованию характеристик радиоактивного слоя, образовавшегося на поверхности бетона. Планировалось, в первую очередь, отобрать пробы из стен пом. 308/2, непосредственно примыкающего к подаппаратному помещению 305/2 (см. рис. 17).

Для этого был использован ДУСА ТР-2.

Он представлял собой смонтированную на шасси специальную буровую установку.

С ее помощью можно было отбирать с поверхности произвольного наклона — от горизонтальной до вертикальной (в том числе из стен) пробы в виде кернов диаметром от 8 до 60 мм с глубины до 200 мм (рис. 18).

³В течение 1989–1990 гг. специалистами ВНИПИЭТ совместно с рядом научно-исследовательских институтов было выполнено технико-экономическое обоснование вариантов преобразования «Укрытия».

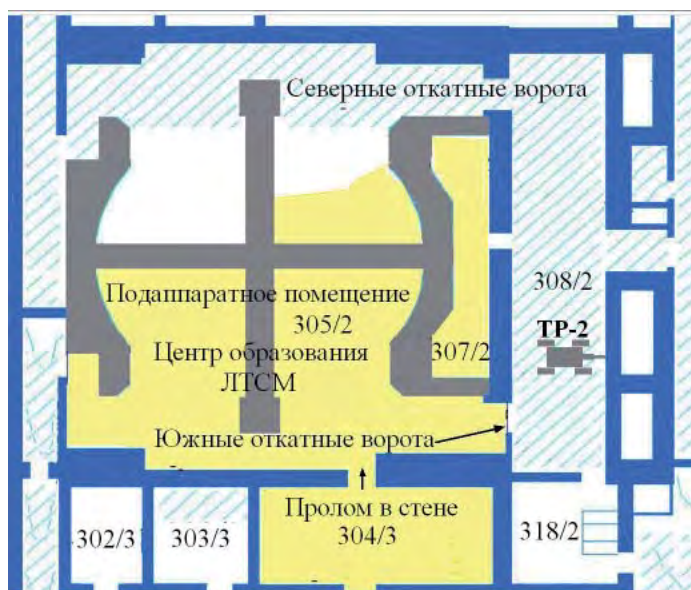


Рис. 17. Схема помещений на отм. 9,000, прилегающих к пом. 305/2, где происходило образование топливной лавы (отмечена желтым цветом). Северные и южные откатные ворота пом. 305/2 выбиты взрывом. При строительстве «Укрытия» пом. 308/2, в котором работал ТР-2, было частично залито бетоном (штриховка). В пом. 318/2 располагался пульт управления ДУСА ТР-2



Рис. 18. ДУСА для отбора проб ТСМ и бетона — ТР-2 во время работы в пом. 308/2

Параметры ТР-2:

- длина — 700 мм,
- ширина — 600 мм,
- высота в сложенном состоянии — 470 мм,
- высота в рабочем состоянии — 900 мм,
- вес — 80 кг.

Установленная на шасси черно-белая телекамера позволяла контролировать как движение установки по маршруту, так и процесс бурения.

Кроме того, для облегчения управления через дверь в пом. 308/2 из пом. 318/2 на штанге вводилась дополнительная телевизионная камера.

В ТР-2 преобразователь питания устройства и ходовые механизмы были размещены на «тележке». Для повышения радиационной стойкости системы на шасси в качестве элементной базы были максимально использованы электромагнитные реле.

Команды управления передавались от пульта по кабелю. Длина кабеля — 50 м.

Первые испытания ТР-2 были проведены в мае 1990 г. Были отобраны и исследованы керны из южной стены помещения, позволившие выяснить степень и структуру загрязнения бетона (см. рис. 18).

Проникновение радиоактивности в бетон в этом помещении, непосредственно связанным с подаппаратным, оказалось достаточно глубоким. Так, на глубине 3–6 см он все еще представлял собой (по классификации) среднеактивные РАО.

17.5. ДУСА для отбора проб ТСМ и бетона (ТР-4 [10–14])

В конце 1990 года в КЭ была создана еще одна дистанционно-управляемая буровая установка с глубиной отбора проб до 600 мм — ТР-4 (см. рис. 19 и 20).

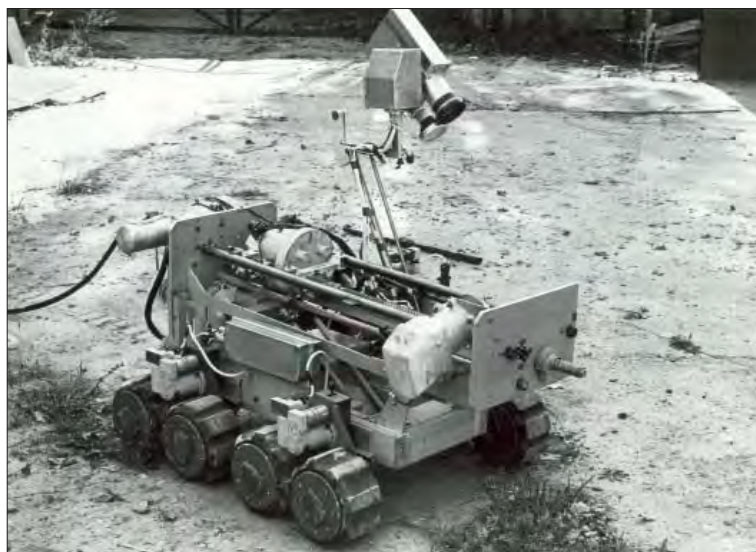


Рис. 19. ТР-4 передвигается в транспортном положении, поднята только телекамера (она также может быть сложена)

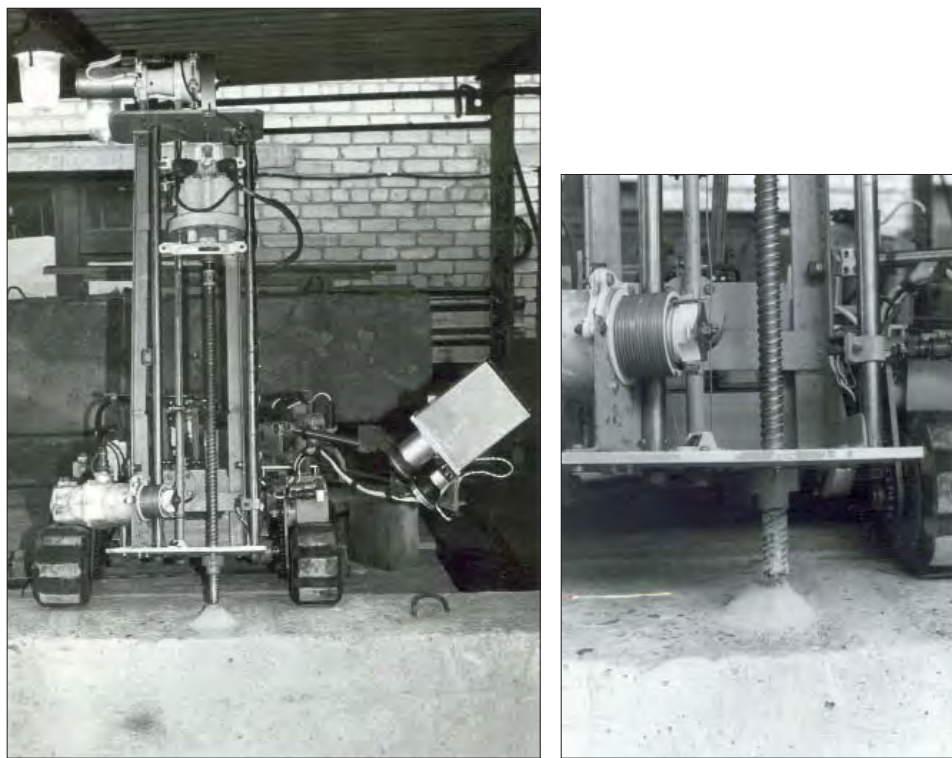


Рис. 20. Отбор проб на испытательном полигоне. Буровая установка работает в вертикальном положении. Наблюдение за бурением ведется с помощью телекамеры

Установка обеспечивала процесс бурения без использования промывочных жидкостей, чтобы не допустить вымывания фрагментов из образцов.

Буровая головка установки могла придавать буровому инструменту как вращательное, так и ударное перемещение.

Специальный механизм поддерживал постоянство давления на забой в процессе бурения.

Буровым инструментом являлся полый шнек (винтовая трубка) длиной 750 мм, на конце которого находилась буровая коронка. Полость шнека использовалась как грунтозаборное устройство, которое заполнялось фрагментами породы по мере внедрения его в материал. Отбираемый керн автоматически помещался в специальный чехол из армированной ткани. При включении механизма выгрузки этот чулок с керном вытягивался из шнека, перевязывался через нужное количество сантиметров капроновой ниткой и наматывался на приемный барабан (рис. 21).

Технические характеристики буровой установки:

- глубина бурения по бетону — 400 мм
- для более рыхлых пород — 600 мм
- диаметр керна — 8 мм
- коэффициент забора керна — 0,5–0,6
- частота вращения бурового инструмента — 200 об/мин.

В автоматике работа были максимально использованы электромагнитные реле, а системы пульта управления построены на микросхемах.

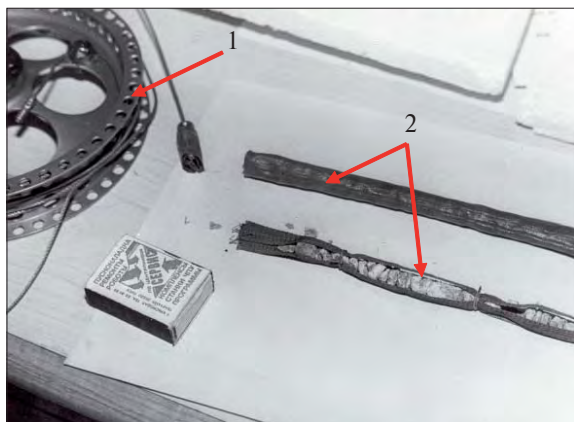


Рис. 21. Чехол из армированной ткани с пробой внутри (2) и приемный барабан (1)

На пульте управления помимо видеоизображения с робота поступали сигналы о срабатывании устройства подачи буровой головки и ее температуре.

Специальный управляющий кабель длиной до 50 м содержал несколько жил для энергообеспечения, командные жилы, два коаксиальных кабеля для передачи видеосигналов и сигналов от детекторов излучения. Для возможности извлечения ТР-4 в случае отказа аппаратуры внутри управляющего кабеля был заложен кевларовый трос.

Для обеспечения возможности проезда установки в разрушенные помещения буровое и телеоборудование в транспортном положении находились в сложенном, компактном виде (рис. 19), а при подходе к рабочей зоне оно разворачивалось в штатное положение (рис. 20).

Летом 1991 года в пом. 318/2 было закончено оборудование пультовой операторов (рис. 22), и началась эксплуатация ТР-4 на блоке.



Рис. 22. Операторская в пом. 318/2



Рис. 23. Коридор 301/5. В нем за потоком «свежего» бетона, натекившим с востока (отмечен на рис.), за открытыми ЛТСМ, снова наблюдается поток «свежего» бетона, поступавшего с запада

После нескольких пробных бурений в пом. 308/2 установка переместилась в коридор 301/5, находящийся с юга от реактора, куда после аварии вытек один из основных потоков лавы — горизонтальный поток. Значительная часть ЛТСМ была залита сверху «свежим»⁴ бетоном. Мощность дозы в этом помещении составляла несколько десятков рентген в час.

Пробы отбирались в координатах — (45_{+2000} , $Ж_{-3000}$). Недалеко от этого места в помещении 301/5 не смогли соединиться 2 потока «свежего» бетона, поступавшего с востока и с запада. В месте «нестыковки» находился слой черной керамики, который уходил под «свежий» бетон (см. рис. 23 и рис. 17, Часть 1, Глава 7).

Контролируя движение и работу ТР-4 как с помощью собственной телекамеры, так и телекамерой, установленной на другом роботе (ТР-2), было проведено бурение и отбор проб в различных местах этого помещения. При этом бур проходил «свежий» бетон, весь пласт лавы и углублялся в доаварийный бетон (пол) помещения (рис. 24).

В результате впервые за время исследований на объекте «Укрытие» удалось провести отбор «горячих» кернов из вертикальных скважин.

Анализ процесса бурения и полученных кернов показал, что доаварийный бетон пола помещения значительно деструктирован (прожжен) и представляет собой частично спекшуюся сыпучую массу, содержащую ЛТСМ. Было отобрано 11 проб — через каждые 4 см. Затем каждый отрезок чулка-пробоотборника был отделен, развернут и из каждого выбран наиболее типичный образец, представляющий собой деструктированный бетон и ТСМ (рис. 25).

⁴«Свежий» бетон — бетон, попавший в помещение при строительстве «Укрытия».

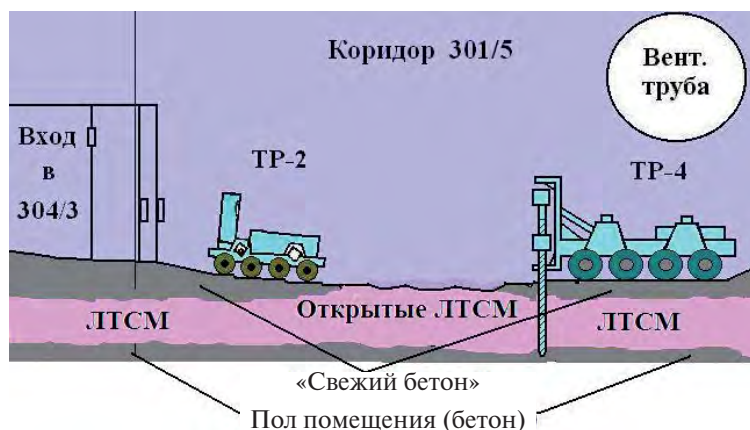


Рис. 24. Схема работ по исследованию ЛТСМ и бетона в коридоре 301/5 с помощью ТР-4 и ТР-2

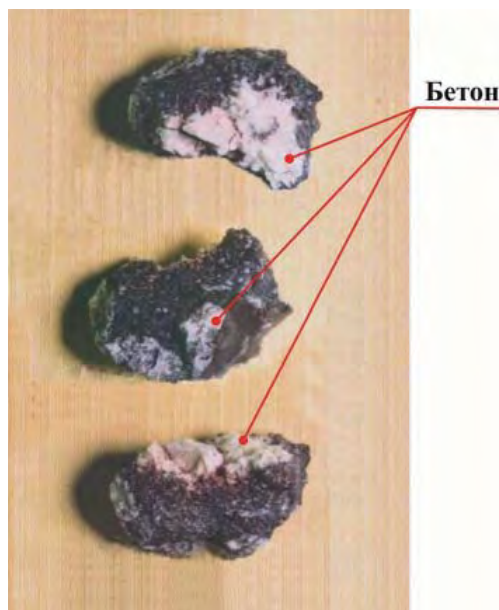


Рис. 25. Деструктурированный бетон и ТСМ из керна, отобранного в пом. 301/5

Результаты подробного исследования полученных образцов представлены в [17, 18].

Из них следует, что тепло от ЛТСМ привело к разрушению пола помещения⁵ и проникновению фрагментов лавы на глубину десятка см в бетонную плиту.

⁵На отметке +9,700 перекрытие толщиной 1700 мм выполнено в сборно-монолитном варианте: из сборных железобетонных плит с укладкой на них слоя монолитного армированного бетона. Сборные плиты толщиной 300 мм выполнены из тяжелого бетона М 400 (класса В35) и армированы стержневой арматурой Ø32 из стали. Согласно литературным данным [19], такой бетон рассыпается на отдельные компоненты при температуре 1320–1380 °С.

17.6. ДУСА с универсальной платформой для крепления сменных рабочих органов – ТР-7 [10–14]

В конце 1992 г. началась разработка многофункционального устройства с универсальной рабочей платформой и сменными навесными приспособлениями:

- клещевым захватом,
- абразивным кругом,
- грузоподъемными вилами,
- ковшом для сбора материалов

и рядом других инструментов.

Изготовление системы управления ТР-7 было завершено в мае 1994 г.

На шасси была установлена подвижная стальная рама, которая в транспортном положении располагалась горизонтально, а в рабочее вертикальное положение поднималась электроприводом через редуктор. Вдоль продольной оси симметрии рамы был расположен ходовой винт, приводимый в движение электромеханизмом. Ходовой винт через маточную гайку приводил в движение подвижную платформу, своими концами скользящую по образующим рамы. Таким образом, в рабочем (вертикальном) положении рамы платформа перемещалась вверх и вниз при вращении ходового винта (см. рис. 26). Платформа была снабжена несколькими рядами технологических резьбовых отверстий, к которым оперативно мог быть прикреплен сменный рабочий инструмент. Для ТР-7 был сконструирован и изготовлен набор такого инструмента. Как говорилось выше, это, во-первых, клещевой захват, который позволяет поднимать и удерживать груз весом до 50 кг и диаметром до 150 мм (рис. 27). Внутренняя поверхность захвата снабжена стальными шипами, способствующими удержанию предметов с неоднородной поверхностью.

Во-вторых, это – резак с абразивным кругом, который мог быть использован для отделения фрагментов металлоконструкций (см. рис. 28).

Третий сменный инструмент – уголкового погрузочные лапы (см. рис. 29).

Наконец, один из сменных инструментов представлял собой ковш для сбора сыпучих материалов (см. рис. 30).



Рис. 26. Конструкция тележки и подвижной платформы ТР-7

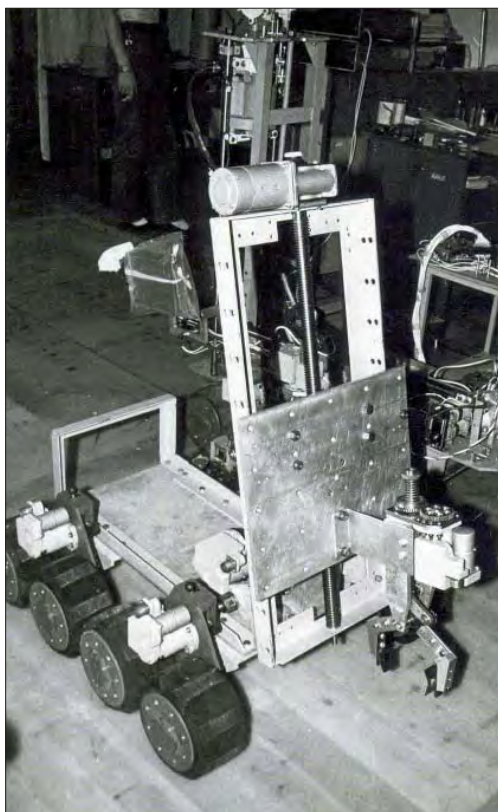


Рис. 27. TP-7 с клещевым захватом на подвижной платформе

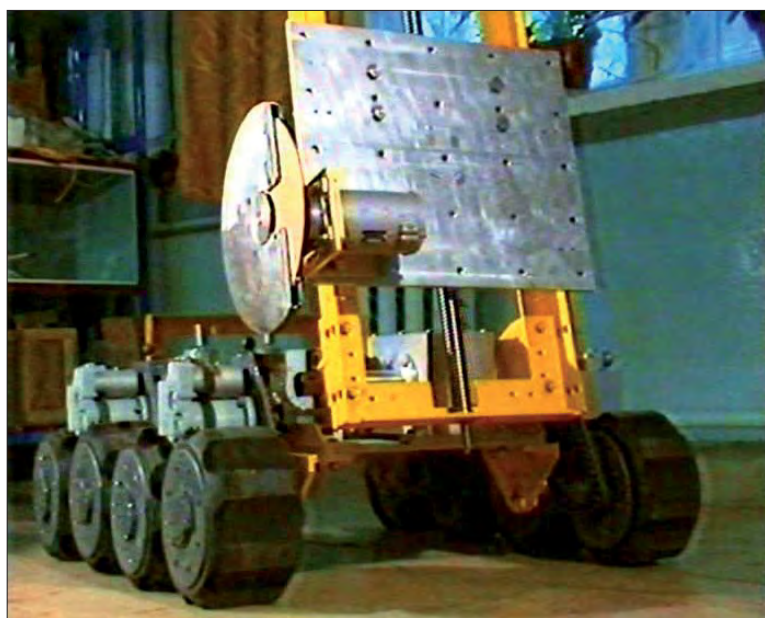


Рис. 28. TP-7 с резакром на подвижной платформе

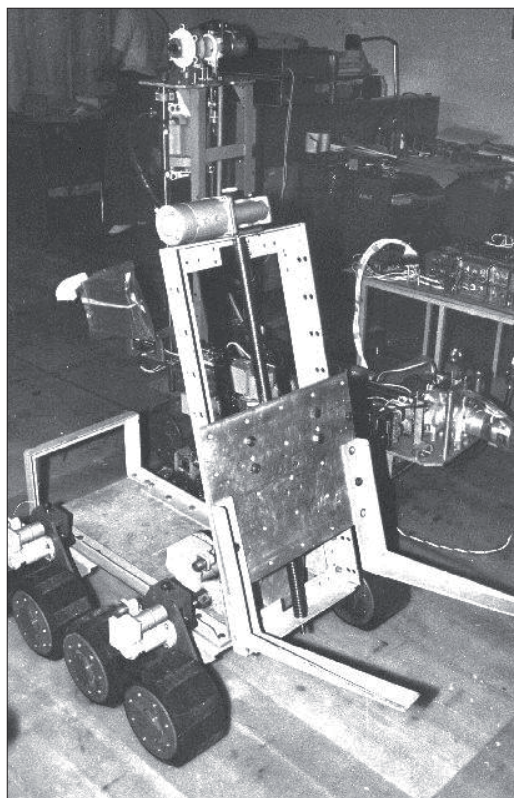


Рис. 29. ТР-7 с грузоподъемными лапами на подвижной платформе



Рис. 30. ТР-7 с ковшом на подвижной платформе

В ходе работы проводилось усовершенствование ДУСА. Так, устройство с абразивным резакom было дополнено клещевым зажимом, позволявшим удерживать разрезаемые детали (трубы, стержни арматуры и т.п.).

17.7. ДУСА для дозиметрической и телевизионной разведки – ТР-10 [10–14]

Главное назначение ТР-10 – проведение телевизионной разведки по заданному маршруту с одновременным измерением МЭД. На ТР-10 смонтированы две телекамеры, цветная и черно-белая и мощный прожектор, позволяющий получать четкое изображение при отсутствии освещения в исследуемых помещениях объекта «Укрытие» (см. рис. 31).

Телевизионный блок мог поворачиваться в горизонтальной плоскости на угол $\pm 90^\circ$, а в вертикальной плоскости на угол $\pm 30^\circ$. Жесткая фиксация телекамер относительно продольной оси позволяла оценивать линейные размеры предметов по их изображению на экране с точностью $\pm 15\%$.

ТР-10 был снабжен дозиметром, направленным в нижнюю полусферу, что позволяло контролировать МЭД на поверхности пола обследуемого помещения прямо с пульта управления в режиме реального времени.

17.8. Роботы, использующие специальные транспортные пути ([10–14])

ДУСА, передвигающиеся на «тележке», смогли проникнуть во многие помещения объекта «Укрытие», но все же далеко не во все.

Часть из помещений после аварии превратилась в труднопроходимые развалины.

К ним, прежде всего, относился центральный зал и подаппаратное помещение (305/2), в которых нагромождение разрушенных строительных кон-



Рис. 31. ТР-10 в лаборатории. Сзади ДУСА – пульт управления



Рис. 32. Центральный зал. Под кровлей «Укрытия»

струкций, разорванных трубопроводов, застывшие потоки бетона препятствовали передвижению ДУСА [рис. 32].

В то же время именно эти помещения представляли наибольший интерес с точки зрения обнаружения ядерного топлива, оставшегося в «Укрытии».

Используя опыт, полученный при работе с «тросоходом» (см. Часть 2, Глава 10), сотрудники КЭ предложили создать роботы, движущиеся по специально проложенным транспортным путям — рельсам. В 1990 г. были спроектированы и изготовлены такие устройства, которые состояли из разборного транспортного пути и подвижной тележки, оснащенной цветной телевизионной камерой и мощным источником света⁶. Одно устройство предназначалась для съемок в ЦЗ, второе — в пом. 305/2.

Монтаж первого из них показан на рис. 33 (А и Б), а транспортные пути, проложенные в ЦЗ (рис. 34).

К сожалению, целый ряд причин не позволил эффективно использовать это устройство, главной из них была та, что операторы находились в зоне значительных радиационных полей.

Второй ДУСА должен был по специальным рельсам, проложенным через проем южных откатных ворот, проникнуть в подаппаратное помещение 305/2 и провести там телесъемку. На схеме, представленной на рис. 35 и на фотографиях (рис. 36, 37), показан предполагаемый маршрут ДУСА и внешний вид устройства.

Несмотря на значительные трудности выполнения этой работы, связанные с большими радиационными полями в пом. 308/2 и особенно на входе в пом. 305/2, проведенная видеосъемка позволила получить важную информацию о состоянии конструкций и скоплениях ТСМ в подаппаратном помещении.

⁶Работы проводились под руководством Г.Д. Ибраимова.



А



Б

Рис. 33(А и Б). Установка ДУСА на рельсы, ведущие в северо-восточную часть ЦЗ через выбитое окно в пультовой



Рис. 34. Транспортные пути, рельсы (1), проложенные для передвижения ДУСА в центральном зале и выходящие из выбитого окна пультовой (2)

В дальнейшем проведение разведки этого помещения как техническими средствами, так и разведывательными группами (в более поздние годы), всегда опиралось на данные, полученные с помощью описываемого ДУСА.

Рис. 38 (А, Б, В) представляет собой образцы кадров снятых с его помощью.

Эти снимки оказались необходимыми при создании модели пом. 305/2 (см. рис. 39) и оценки количества топлива в этом помещении.

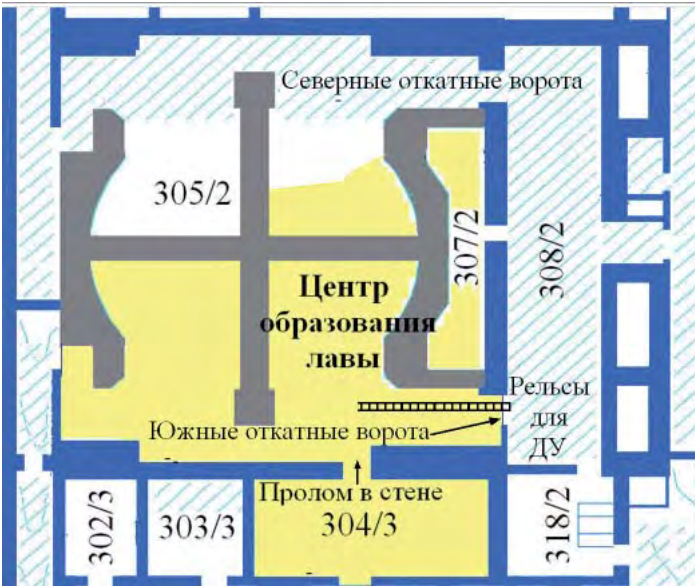


Рис. 35. Схема подаппаратного(305/2) и окружающих его помещений. Через южные откатные ворота, выбитые при аварии, проложены рельсы из пом. 308/2 в пом. 305/2, по которым передвигалось ДУ

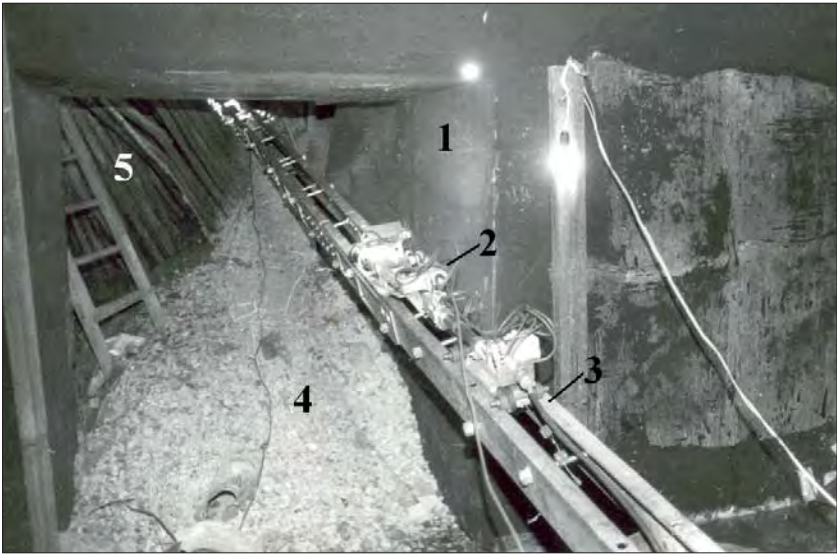


Рис. 36. На фотографии показаны: 1 — южные откатные ворота (вход в пом. 305/2); 2 — ДУСА, источник света в горизонтальном положении; 3 — рельсы; 4 — наплыв бетона; 5 — трубы нижних водяных коммуникаций, согнутые при аварии



Рис. 37. Фотография дистанционного устройства, установленного на рельсы. Источник света в рабочем положении



Рис. 38 (А, Б, В). Кадры телесъемки пом. 305/2 (южной части), полученные с помощью ДУСА, передвигающегося по рельсам

- 1 – проем северных откатных ворот
- 2 – поверхность «свежего бетона»
- 3 – засыпка из межкомпенсаторного зазора
- 4 – «сталагмит»
- 5 – область, заполненная фрагментами активной зоны
- 6 – каналы охлаждения
- 7 – наклонно стоящая железобетонная плита
- 8 – деформированный лист металла
- 9 – фрагмент завала (железобетонная конструкция?), (отметка +17,00)
- 10 – «траншея»
- 11 – схема «ОР»
- 12 – провал (отметка +13,00)
- 13 – каналы охлаждения отражателя
- 14 – железобетонная конструкция
- 15 – фрагмент элемента завала (железобетонная конструкция?)
- 16 – сборки с сохранившимися ТВЭЛами
- 17 – край схемы «ОР»
- 18 – южная дополнительная опора
- 19 – фрагменты ТВС
- 20 – западная стена помещения 305/2
- 21 – массив ТСМ
- 22 – графитовые блоки и обломки труб (ТК?)
- 23 – гравийная куча
- 24, 25, 27 – бреши в стене из переплавленного вещества
- 26 – прожег (пролом в стене)
- 28 – колонна
- 29 – стена из рыхлого переплавленного вещества
- 30 – проекция бака «Л» на отметку +15,95

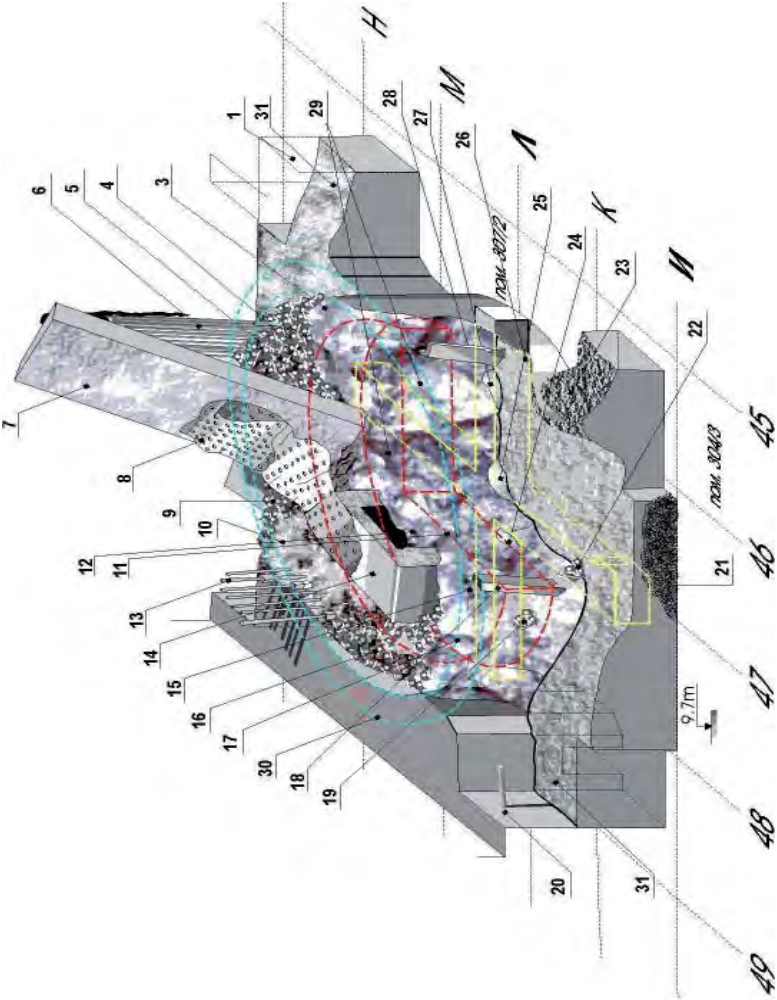


Рис. 39. Модель расположения скоплений ТСМ в пом. 305/2 [18]

17.9. Магнитоход [10–14, 20]

Магнитоход (рис. 40 А и Б) был создан для проведения работ на стенах и потолках помещений, имеющих плакировку⁷, способную намагнититься.

Ходовые узлы робота содержали мощные самарий-кобальтовые магниты, позволявшие роботу,двигающемуся по этому покрытию, нести значительный вес. Сдвоенные колесные блоки увеличивали надежность зацепления при преодолении сварных швов и фрагментов немагнитных покрытий.

Была предусмотрена возможность буксировки за роботом прицепа с детекторами и отцепления его в заданном месте. Телекамера и яркие источники света позволяли проводить работы в темных помещениях и вне пределов прямой видимости оператора.

В 1990–91 гг. магнитоход был испытан в лаборатории и применялся на «Укрытии» для установки тепловых датчиков в помещениях парораспределительного коридора.

При подготовке к проведению работ по стабилизации конструкций «Укрытия» возникла необходимость измерить дозовые поля (МЭД) на север-

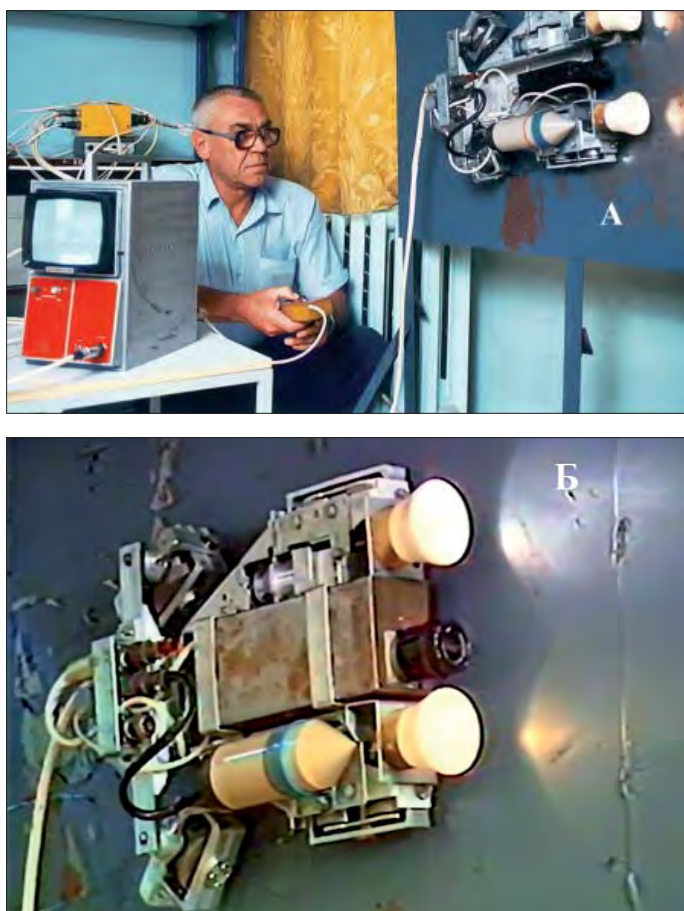


Рис. 40 (А и Б). Магнитоход в лаборатории

⁷Плакировка — нанесение на поверхность тонкого слоя металла или сплава.



Рис. 41. Вид на объект «Укрытие» с северо-западной стороны (2008 г.)

ной контрфорсной стене. Она находится на верхнем из 4 уступов каскадной стены (см. рис. 41) и состоит из металлических конструкций.

Решено было воспользоваться магнитоходом (см. рис. 42, 43).

На нем установили 8 электронных дозиметров типа PD-3i (рис. 43), которые измеряли величину МЭД⁸ и передавали данные на пульт управления.

Измерения были успешно выполнены.



Рис. 42. Установка магнитохода на поверхность северной контрфорсной стены

⁸Этот тип дозиметров имеет ряд преимуществ – малые габариты (48×72×17 мм), точность измерения $\pm 15\%$ вплоть до значений МЭД 500 Р/час, водостойкость, продолжительный срок работы от аккумуляторов и т.п.



Рис. 43. Магнитоход на северной каскадной стене

17.10. «Пионер» («Pioneer») [21–24]

Многофункциональный дистанционно управляемый робот «Пионер» (рис. 44–46) был создан в США специально для проведения работ на объекте «Укрытие». Финансирование его изготовления взяли на себя Департамент Энергетики США и Национальное Аэрокосмическое Агентство США (НАСА).

«Пионер» представляет собой достаточно сложную систему, состоящую из самоходной тележки, системы управления и распределения энергии, системы дистанционного наблюдения с трехмерной системой картографирования, системы контроля состояния окружающей среды, манипулятора, бурового устройства для отбора образцов бетона (рис. 44).

Переносная консоль управления обеспечивает возможность управлять роботом из безопасных мест и соединена 400-метровым кабелем с пятью герметически закрытыми блоками, которые содержат источники электропитания, управляющую электронику и выходной разъем для кабеля на самоходную тележку (рис. 45–47).

Приведем некоторые параметры отдельных систем «Пионера».

Самоходное устройство.

- Максимальная скорость – 11 см/сек.
- Ширина 0,75–0,85 м.
- Длина 1,19–1,32 м.
- Высота – 1,36 м.
- Преодоление препятствий: траншея – 15 см, брус – 19 см.
- Сила тяги – 290 кг.
- Вилочный нож – захват, грузоподъемность – 159 кг.
- Объем ковша – 0,21 куб.м; грузоподъемность рычажного механизма ковша до 91 кг.

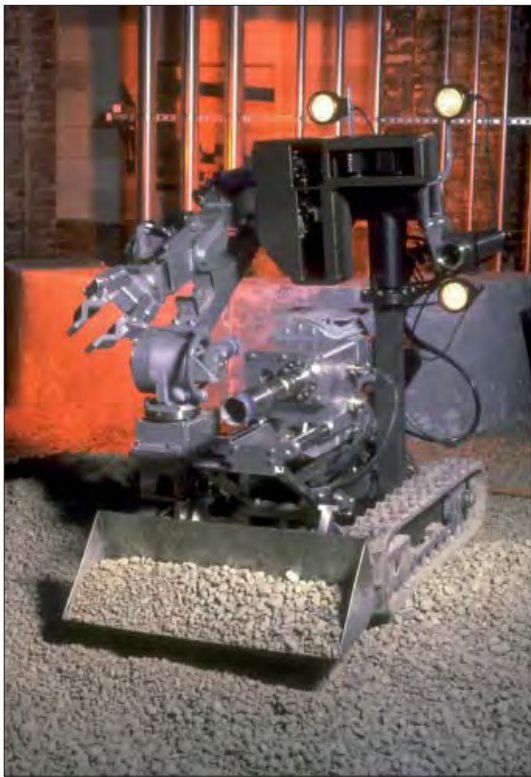


Рис. 44. Робот «Пионер» (США)



Рис. 45. Полный комплект аппаратуры робота «Пионер»



Рис. 46. Оператор за пультом робота «Пионер»



Рис. 47. Пульт управления роботом «Пионер»

Система управления и распределения энергии.

Состоит из шести герметичных отсеков:

- отсек блока питания;
- отсек управления роботом;
- отсек управления манипулятором;
- отсек управления телекамерой;
- отсек управления отбором керна и 3М-картографом;
- отсек управления освещением.

Система дистанционного наблюдения.

• Цветная телевизионная камера. Работоспособна в радиационных полях с МЭД до 104 Р/час при аккумулярованной дозе до 1 МГрей;

- система картографирования;
- микрофон;
- осветительные приборы — 4 галогенные лампы (мощностью 150 Вт каждая).

Система контроля над состоянием окружающей среды.

Состоит из базисного блока сенсоров окружающей среды, измеряющих:

- температуру от минус 10 до плюс 35 °С;
- относительную влажность от 0 до 100%;
- радиационные поля с МЭД от 1 до 1000 Р/час;
- поток нейтронов.

Манипулятор (6 степеней свободы).

максимальная грузоподъемность захвата:

- при длине стрелы 1680 мм до 15,9 кг;
- при длине стрелы 410 мм до 45,5 кг.

Вес самого манипулятора 56,8 кг.

Конструкция «Пионера» базируется на роботе-предшественнике «Гудини», разработанном Департаментом Энергетики для очистки подземных хранилищ с отходами в Национальной Лаборатории в Оук Ридж.

Система картографирования

Система картографирования «Пионера» построена на базе системы стереозрения и трехмерного изображения, созданной НАСА для космического аппарата, работавшего на Марсе. Моделирующее программное обеспечение разработано Департаментом Энергетики для вывода из эксплуатации ядерных объектов.

Благодаря этой системе «Пионер» может создавать трехмерные цифровые реконструкции, которые могут точно передавать внешний вид и геометрию окружающего интерьера. Специально разработанный радиационно-устойчивый формирователь изображения, состоящий из трех черно-белых камер, установлен на мачте датчиков «Пионера» и позиционируется блоком наклона и панорамирования под компьютерным контролем. Полученные изображения обрабатываются для создания сетей поверхности, которые текстурно картографированы с кадром цветного видео.

Пробоотборник бетона

Одной из возможностей робота «Пионер» является оценка целостности конструкций объекта «Укрытие». Дистанционно управляемая система отбора бетона бурением предназначена для резки и доставки образцов из пола и стен, которые впоследствии могут быть проанализированы на прочность и хрупкость. Блок управления буровым устройством основан на технологии НАСА, разработанной для отбора образцов с астероидов и комет.

Основным и существенным недостатком всего комплекса является его очень высокая стоимость. По различным оценкам, до 3 млн долларов.

Комплекс «Пионер» был передан Украине в 1998 году. До настоящего времени по различным организационным причинам «Пионер» работы в объекте «Укрытие» не проводит, а находится в Учебном центре г. Славутича.

ЛИТЕРАТУРА

1. Франция посылает на АЭС «Фукусима» роботов — ликвидировать последствия аварии. <http://newsru.com/world/18mar2011/frarobjap.html>.
2. Япония обратилась в компанию iRobot за помощью в ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима 1». <http://www.irobot-ufa.ru/categoryblog/107-q-1q.html>.
3. Японские эксперты, ликвидирующие последствия аварии на АЭС «Фукусима», используют роботы для замера уровня радиации на станции. http://www.bbc.co.uk/russian/international/2011/04/110418_japan_robots_radiation.shtml.
4. На АЭС «Фукусима-1» запустили робота <http://www.kp.ru/online/news/909229>.
5. В ликвидации последствий аварии на атомной станции Фукусима, роботы терпят неудачу. <http://technosci.net/news/2011-06-28-2951>.
6. Боровой А.А. Мой Чернобыль. — Новый мир, 1996, № 3, с. 132—180.
7. Абалин С.С., Беляев С.Т., Боровой А.А. и др. Диагностические исследования аварийного реактора ЧАЭС. — Атомная энергия, 1990, т. 68, вып. 5, с. 355—359.
8. Абалин С.С., Барьяхтар В.Г., Беляев С.Т. и др. Обеспечение экологической безопасности объекта «Укрытие» (исследования 1990—1991 гг.). Доклады Академии Наук Украины, Сер. Математика, Естествознание, Технические науки, 1992, № 1, с. 120—125.
9. Borovoi A., Ivanov A., Sich A. Use of robotic technologies and remote systems for diagnostic and research within the Chernobyl Sarcophagus, Proceedings of ANS Fifth Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Knoxville, Tennessee, April 25—30, 1993, p. 211—216.
10. Боровой А.А., Иванов А.И. Диагностические роботы на 4 блоке Чернобыльской АЭС. Препринт АН Украины, Ин-т кибернетики им. В.Н.Глушкова, Киев, 1993, 13 с.
11. Боровой А.А., Иванов А.И., Мищенко Ю.А. Диагностические роботы на 4-ом блоке Чернобыльской АЭС. Препринт МНТЦ «Укрытие» НАНУ № 94-5, Киев, 1994, 34 с.
12. Боровой А.А., Иванов А.И. Диагностические дистанционно управляемые агрегаты на 4-м блоке ЧАЭС. В сборнике «Объект «Укрытие» — 10 лет», основные результаты научных исследований, Национальная Академия Наук Украины, Чернобыль 1996 г., с. 155—167.
13. Боровой А.А., Краснов В.А., Иванов А.И. и др. Разработка безлюдных технологий с использованием дистанционно управляемых агрегатов для выполнения радиационно-опасных работ на объект «Укрытие». Сборник «Проблемы Чернобыля», выпуск 12, Чернобыль, 2003, с. 175—184.
14. Абалин С.С., Боровой А.А., Перфилов. Роботы на объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. Препринт ИАЭ-6684/3. М., 2011. — 44 с.
15. Гордон Г.М., Пейсахов И.Л. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1977. — 456 с.
16. Беляев С.Т., Боровой А.А. О преобразовании объекта «Укрытие». Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова. Инв. № 57-05/110 от 29.09.89 г. — 5 с.
17. Изучение физико-химических свойств ядерно-опасных делящихся материалов объекта «Укрытие», влияющих на степень его ядерной, радиационной и радиоэкологической безопасности. Отчет ИПБ АЭС НАН Украины № 3970, Чернобыль, 2007. — 248 с.

18. 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.
19. Дегальцев Ю.Г., Тогобицкая Д.Н., Ханхотько А.Ф. и др. Прогнозирование плавкости бетонов. Неорганические материалы, 1994, т. 30, № 2. — 269 с.
20. Робот-Магнитоход на стене Саркофага. <http://www.youtube.com/watch?v=s8SLGQvINjc>
21. Maimone M., Matthies L., Osborn A.J., Teza J., Thayer S. Photo-Realistic 3-D Mapping Extreme Nuclear Environments: System for Chernobyl. Submitted to IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotic Systems (IROS'98) http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=724814.
22. Stephen Shankland. Intrepid robot set for Chernobyl mission. http://news.cnet.com/Intrepid-robot-set-for-Chernobyl-mission/2100-1001_3-226504.html.
23. RedZone Robotics, Inc. Functions and Requirements for the Pioneer System. Document number 96055-REPT-O04.2, December 8, 1997.
24. Телефильм о роботе «Пионера». You-tube <http://www.youtube.com/watch?v=LvNMAEg-MAc&list=QL&playnext=1>.

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ (ко всей книге)

АБК-1 (2)	Административно-бытовой корпус 1 (2)
АД	Аэродинамический диаметр аэрозоля
АМАД	Аэродинамический медианный по активности диаметр аэрозоля, мкм
АЗ	Активная зона реакторной установки
АЗФ	Фрагменты активной зоны
«Анализ...»	«Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации»
АЭС	Атомная электростанция
ББ-1	Бассейн-барботер, первый этаж
ББ-2	Бассейн-барботер, второй этаж
БВ	Бассейн выдержки отработавших тепловыделяющих сборок
Институт Биофизики	Государственный научный центр – Институт биофизики Федерального медико-биологического агентства
Блок Б	Реакторный блок, в котором размещался реактор № 4 ЧАЭС
Блок В	Блок, в котором расположено оборудование спецводоочист- ки, газового контура и др.
Блок Г	Машинный зал, в котором размещены турбоустановки №№ 1—8 со всем вспомогательным оборудованием
ВНИИАЭС	Всероссийский научно-исследовательский институт АЭС
ВНИИНМ	Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара
ВНИПИЭТ	Всероссийский научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий
ВНИИТФА	Всероссийский научно-исследовательский институт техни- ческой физики и автоматизации
ВСПО	Вспомогательные системы реакторного отделения
ВТ-2	Вентиляционная труба 2 очереди ЧАЭС
Госкомгидромет	Государственный комитет СССР по гидрометеорологии
ГТ	Горячая частица
ГТЧ	Горячая топливная частица
ГЦН	Главный циркуляционный насос
ДК _А	Допустимая объемная активность (концентрация) радиону- клида в воздухе рабочей зоны
ДУСА	Дистанционно-управляемый самоходный агрегат
ДЭ	Деаэраторная этажерка

ЖРО	Жидкие радиоактивные отходы
ИБРАЭ	Институт проблем безопасного развития атомной энергии Российской Академии Наук
ИБВ	Имитатор блочной воды
ИДК	Информационно-диагностический комплекс
ИЛЖ	Имитатор легочной жидкости
ИПБ АЭС, ИПБ АЭС НАНУ	Институт проблем безопасности атомных электростанций Национальной Академии Наук Украины (ранее – МНТЦ «Укрытие»)
ИФТТМТ ННЦ	Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий Национального научного центра Харьковский физико-технический институт
ИЯИ АН УССР	Институт ядерных исследований АН УССР
КД	Коэффициент дезактивации
КИ, «Курчатовский институт»	Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
КИЭП	Киевский институт «Энергопроект»
КПП	Контрольно-пропускной пункт
КЭ	Комплексная экспедиция при институте атомной энергии им. И.В. Курчатова
K_{∞}	Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде
$K_{\text{эфф.}}$	Эффективный коэффициент размножения нейтронов
ЛЗ, Локальная зона	Локальная зона – территория вокруг объекта, находящаяся внутри периметра охранной зоны. Она ограничена бетонным забором, примыкающим к объекту с севера (в районе оси 44) и юга (в районе оси 35)
ЛПА	Ликвидация последствий аварии
ЛТСМ	Лавообразные топливосодержащие материалы
МЗ	Машинный зал
$M_{\text{л.з.}}$	Масса топлива (по урану), выброшенная на территорию локальной зоны
Минсредмаш	Министерство среднего машиностроения СССР
МНТЦ, МНТЦ «Укрытие»	Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие» при Национальной академии наук Украины (в настоящее время ИПБ АЭС НАНУ)
МСПП	Модернизированная система пылеподавления
МЭД	Мощность экспозиционной дозы γ -излучения
НАНУ	Национальная Академия Наук Украины
НБК	Новый безопасный конфайнмент
НВК	Нижние водяные коммуникации
НИКИМТ	Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажных технологий
НИИРЗ АТН Украины	Научно-исследовательский институт радиационной защиты Академии технологических наук Украины

НИИСК	Научно-исследовательский институт строительных конструкций
НИО КЭ	Научно-исследовательский отдел КЭ
НИФХИ	Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова
НЦ МО СССР	Научный центр Министерства обороны СССР
о.п.	Точка отбора проб воды в помещениях «Укрытии»
ОГ	Оперативная группа КИ
ОГ УНХВ МО	Оперативная группа военного университета радиационной, химической и биологической защиты химических войск Министерства обороны СССР
ПАВ	Поверхностно активное вещество
ПДД	Предельно допустимая доза
ПК	Правительственная Комиссия
ПРК	Парораспределительный коридор
ПуСО	Пункт специальной обработки
РИ, «Радиевый институт»	Научно-производственное объединение «Радиевый институт» им. В.Г. Хлопина
РАО	Радиоактивные отходы
РАУ	Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»
РБМК-1000	Реактор большой мощности канальный, электрической мощностью 1000 МВт
СБВ	Северный бассейн выдержки
СГО	Стандартное геометрическое отклонение
$C_{\text{лз}}$	Концентрация радиоактивных аэрозолей в локальной зоне объекта «Укрытие»
C_y	Концентрация радиоактивных аэрозолей в помещениях объекта «Укрытие»
СПП	Стационарная система пылеподавления
СЦР	Самоподдерживающаяся цепная реакция
ТВС	Тепловыделяющие сборки
ТВЭЛ	Тепловыделяющий элемент
ТРО	Твердые радиоактивные отходы
ТСМ	Топливосодержащие материалы
УГВ	Уровень грунтовых вод
УкрНИИСХР	Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии
ЦЗ	Центральный зал
ЦРБ ЧАЭС	Цех радиационной безопасности ЧАЭС
ЧАЭС	Чернобыльская атомная электростанция
ЮБВ	Южный бассейн выдержки
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Общество Технической и Ядерной Безопасности (Германия)

IPSN	Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire Институт Защиты и Ядерной Безопасности (Франция)
Q	Величина энтальпии, кал/г
RIA	Авария, связанная с вводом положительной реактивности
SIP	Shelter Implementation Plan (План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие» – ПОМ)
$V_{\text{исп.}}$	Объем воды, выходящий из внутренних помещений «Укрытия» (Блок Б и ВСРО) в результате процесса испарения, м ³ /год
$V_{\text{конд.}}$	Объем воды, поступающий ежегодно во внутренние помещения «Укрытия» (Блок Б и ВСРО) в результате процесса конденсации, м ³ /год
$V_{\text{осад.}}$	Объем воды, поступающий ежегодно во внутренние помещения «Укрытия» (Блок Б и ВСРО) от осадков, м ³ /год
$V_{\text{ф}}$	Линейная скорость фильтрации воздуха
β	Доля запаздывающих нейтронов относительно мгновенных нейтронов, образующихся при делении ядра

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
14. СКОПЛЕНИЯ ВОДЫ В «УКРЫТИИ».....	10
14.1. Источники, пути поступления и места скопления воды	10
14.1.1. Влияние воды на безопасность объекта.....	10
14.1.2. Источники поступления воды.....	12
14.1.3. Пути распространения, места скопления воды и ее выхода из «Укрытия»	17
14.2. Радиационная и ядерная безопасность скоплений воды в «Укрытии».....	24
14.2.1. Химический и радионуклидный состав скоплений воды	24
14.2.2. Скопление воды в пом. 001/3	30
14.2.3. Радиационная безопасность воды в «Укрытии»	36
14.2.4. Ядерная безопасность скоплений воды в «Укрытии» [22]	37
14.3. Разрушение ТСМ, находящихся в объекте «Укрытие», под действием воды (см. [2]).....	38
14.3.1. «Пемза».....	39
14.3.2. «Шлак», или шлакообразные гранулированные ЛТСМ	39
14.3.3. Черная керамика	40
14.3.4. Коричневая керамика	42
14.3.5. Возможность разрушения ЛТСМ при замерзании воды в порах.....	42
14.4. Вода в машинном зале	44
14.5. Проблема очистки ЖРО, поступающих из объекта «Укрытие» [31, 32].....	46
15. ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛОКАЛЬНОЙ ЗОНЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»	50
15.1. Первые оценки количества топлива, выброшенного в локальную зону. Радиационные поля.....	50
15.1.1. Оценки количества топлива, выброшенного при аварии в локальную зону	50
15.1.2. Радиационные поля в локальной зоне	55
15.1.3. Программа «Сияние»	57
15.2. Загрязнения почвы в локальной зоне «Укрытия»	62
15.3. Загрязнения грунтовых вод в локальной зоне «Укрытия»	71
15.3.1. Стена в грунте	71
15.3.2. Гидрогеологическое строение промплощадки объекта «Укрытие».....	73
15.3.2. Отбор и анализ проб грунтовой воды.....	75

16. НЕКОТОРЫЕ РАБОТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ НА ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ.....	88
16.1. Создание карт территорий, загрязненных плутонием	88
16.2. Город Славутич	92
16.3. Лесные пожары и распространение радиоактивных загрязнений [8, 9]	95
16.4. Обследование населенных пунктов. «Корад»	103
17. РОБОТЫ В ОБЪЕКТЕ «УКРЫТИЕ».....	112
17. 1. Почему был написан настоящий раздел	112
17.2. Требования к ДУСА, сконструированных для работ на объекте «Укрытие»	118
17.3. Роботы, созданные для борьбы с радиоактивной пылью [10–14]	122
17.4. ДУСА для отбора проб ТСМ и бетона (ТР-2 [10–14])	126
17.5. ДУСА для отбора проб ТСМ и бетона (ТР-4 [10–14])	128
17.6. ДУСА с универсальной платформой для крепления сменных рабочих органов – ТР-7 [10–14]	133
17.7. ДУСА для дозиметрической и телевизионной разведки – ТР-10 [10–14]	136
17.8. Роботы, использующие специальные транспортные пути ([10–14])	136
17.9. Магнитоход [10–14, 20]	142
17.10. «Пионер» («Pioneer») [21–24]	144
СОКРАЩЕНИЯ и ОБОЗНАЧЕНИЯ	150

Подписано в печать 4.12.2013

Печать цифровая

Тираж 170 экз. Заказ 93

Отпечатано в НИЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1