

В конце сентября прошлого года в нашей лаборатории в Чернобыле раздался телефонный звонок, звонили из американского посольства в Киеве.

“Все газеты на Украине и за рубежом пишут о том, — говорил переводчик, — что в “Саркофаге” вырос поток нейтронов и развивается неуправляемая цепная реакция. Насколько это опасно? Следует ли готовить к эвакуации американских граждан из Киева?”

Все утро телефон не умолкал, работать было практически невозможно, и чаша нашего терпения переполнилась.

— А эвакуация это дорогое удовольствие? — спросил я.

— Очень дорогое!

— Тогда заплатите мне 1 % ее стоимости и продолжайте жить и работать в Киеве без всякого страха.

В трубке раздался смех.



“Укрытие” в момент завершения строительства (ноябрь 1986 г.)

САРКОФАГ

Чернобыльский

А.А. Боровой

РНЦ “Курчатовский институт” (Российский научный центр)

Когда редакция журнала обратилась ко мне с предложением написать статью о реальной опасности “Саркофага” (правильнее называть его “Укрытие 4-го блока ЧАЭС” или кратко “Укрытие”), я с удовольствием согласился.

Сначала немного истории.

Необходимость создания “Укрытия” стала ясна уже в первые дни после аварии. Оно должно было предотвратить разнос радиоактивности из развали реактора и защитить окружающую территорию от проникающего излучения. Было рассмотрено 18 предложений: в одних считалось необходимым соорудить вокруг блока независимое огромное здание, полностью герметичное (как бы предвосхищая проекты, предложенные через 7 лет на Международном конкурсе в г. Киеве), в других предлагалось максимально использовать для возведения защитной оболочки сохранившиеся стены и другие конструкции разрушенного блока.

Был выбран второй подход. Это позволило в десятки раз выиграть в стоимости и скорости строительства (проектирование и строительство было закончено за шесть месяцев, случай беспрецедентный в мировой практике), но имело и свои негативные стороны. Во-первых, отсутствие необходимой информации о прочности старых конструкций, на которые опирались новые. Во-вторых, необходимость применять дистанционные методы бетонирования, невозможность в ряде случаев использовать сварку и т.д. привели к негерметичности созданного объекта (общая площадь щелей в кровле и стенах объекта при окончании строительства составила около 1000 м²). Все эти недостатки были обусловлены одной причиной — огромными радиационными полями вблизи разрушенного блока.

При строительстве значительные массы бетона (его назвали “свежим”) протекли в разрушенное здание, затруднили или сделали вообще невозможным проход во многие помещения и их разведку.

Некоторые результаты исследований 1986 — 1996 гг.

В момент завершения строительства объекта “Укрытие” информация о местоположении и состоянии ядерного топлива ограничивалась данными, которые удалось получить в основном при обследованиях периферийных помещений 4-го блока. Прониканию в помещения, близкие к разрушенному реактору, препятствовала радиация, поврежденные конструкции и “свежий” бетон.

Для продолжения исследований и получения информации о ядерной, радиационной и тепловой опасности топлива, сосредоточенного в “Укрытии”, Курчатовским институтом была разработана специальная программа. Следуя этой программе, были очищены и дезактивированы помещения с западной и южной сторон блока, в

них установлены буровые станки, через бетон и металлические конструкции пробурены скважины к местам предполагаемого скопления ядерного топлива. С помощью скважин, используя приборы для визуальных наблюдений (перископы, ТВ-камеры), а также установленные на штангах специальные тепловые, гамма- и нейтронные детекторы, удалось провести большой объем исследований. Одновременно в лабораториях городов Чернобыля, Москвы, Киева, Ленинграда анализировались отобранные образцы материалов. Продолжалась и работа разведовательных групп. Теперь она во многом опиралась на полученные дистанционными методами данные о характере разрушений внутри 4-го блока и загрязненности помещений.

Важнейшие результаты были получены уже весной 1988 г. Удалось установить, что шахта реактора практически пуста. Сколько-нибудь значительных целых фрагментов реакторной кладки не обнаружилось.

Дальнейшие исследования показали, что облученное топливо внутри “Укрытия” находится в виде следующих модификаций.

Фрагменты активной зоны (АЗФ). Большая часть АЗФ, как предполагают, выброшена при взрыве на верхние этажи блока, в частности в Центральный зал, и находится там под завалом из материалов, сброшенных в 1986 г. с вертолетов. Высокие радиационные поля

до сих пор препятствуют проведению исследований в Центральном зале и прилегающих помещениях. О топливе, находящемся на поверхности, информация ограничена, а о топливе, лежащем под материалами, ее практически нет.

Мелкодиспергированное топливо (пыль) — горячие топливные частицы. Размеры этих частиц — от долей микрона до сотен микрон. Они наблюдаются практически во всех помещениях объекта и в образцах почвы ближней и дальней зон. Общее количество топливной пыли в объекте оценивается в 10 т, а количество пыли, лежащее под кровлями "Укрытия", — в 1 т (и то, и другое известно не лучше, чем по порядку величины).

Застывшие лавообразные топливосодержащие массы. Они образовались во время активной стадии аварии при высокотемпературном взаимодействии топлива с конструкционными материалами блока и распространились по подреакторным помещениям. О лаве, находящейся в нижних этажах блока, информации собрано относительно много. Изучены ее расположение и физико-химические свойства. Точному определению интегрального количества топлива на этих этажах опять-таки мешают высокие поля и "свежий" бетон. Существует осторожная оценка — 70 — 150 т по урану.

Под действием внешних факторов, особенно воды, лава быстро разрушается. Если в 1987 г. для взятия пробы из так называемой "слоновьей ноги" — огромного наплыва лавы — потребовалось применить стрелковое оружие, то в последние годы это образование подверглось сильнейшему разрушению.

Растворимые формы урана, плутония, америция, находящиеся в скоплениях воды (правда, в следовых количествах), — последняя модификация.

В ходе работы были определены места нахождения многих скоплений топливосодержащих масс (ТСМ). Исследованы физико-химическое состояние ТСМ и динамика идущих в них процессов. Взяты под контроль обнаруженные скопления активных материалов — создана контрольно-диагностическая система "Финиш", в состав которой входят около 70 измерительных каналов, регистрирующих плотность потока нейтронов, мощность гамма-дозы, тепловые параметры. Организовано постоянное наблюдение за радиоактивными аэрозолями и водой, скапливающейся внутри объекта, измерялось количество радиоактивной пыли, выходящей наружу, проведен большой объем исследований на площадке, окружающей объект и т.д.

В табл. 1 приводятся данные о местонахождении ТСМ в помещениях "Укрытия".

О трудностях проведения анализа безопасности "Укрытия"

Итак, все эти 10 лет продолжались исследования, которые должны были установить степень опасности "Укрытия" и помочь разработать меры по ее уменьшению. Итог этой активной деятельности был недавно подведен в отчетах Российского научного центра "Курчатовский институт", Украинского межотраслевого научно-технического центра "Укрытие" и ЧАЭС. Цель документов — анализ достигнутого уровня безопасности, определение наиболее опасных участков и приоритетов будущих работ.

Трудность определения степени опасности "Укрытия" заключается, прежде всего, в специфических особенностях самого объекта. Перечислим некоторые из них.

1. Несмотря на все выполненные работы по ликвидации последствий аварии "Укрытие", было и продолжает оставаться потенциально опасным объектом.

Три года
специалисты и ученые
пробирались в центр
этого зала, набирая
по пути и опыт, и
облучение, для того,
чтобы понять истинную
причину происшедшего
и исключить
возможность
повторения беды.
В нашем журнале
впервые в России
публикуется такой
снимок Центрального
зала.

Центральный зал под кровлей объекта "Умныши"




Таблица 1. Данные о ТСМ в помещениях "Укрытия"

Название помещения (отметка, м)	Вид ТСМ, их состояние	Количество топлива в ТСМ, т (по урану)
Центральный зал (35.50), Другие верхние помещения блока	АЗФ, большая часть которых засыпана материалами, сброшенными в период активной стадии аварии, под материалами могут находиться лавообразные ТСМ В области схемы "Е" Тепловыделяющие сборки с отработанным топливом Горячие топливные частицы Лавообразные ТСМ, АЗФ	Не известно 10 — 36 — 20 — 10
Южный бассейн выдержки (18.00 — 35.50) Большая часть помещений	Лавообразные ТСМ	75^{+25}_{-35}
Подаппаратное помещение 305/2 (9.00), помещение 307/2, схема "ОР", шахта реактора Парораспределительный коридор (ПРК) (6.00) с учетом ТСМ в клапанах Бассейн-барботер, 2-й этаж (ББ-2)	25 ± 11	
Бассейн-барботер, 1-й этаж (ББ-1)	To же	8 ± 3
Помещения 304/3, 303/3, 301/5, 301/6, "слоновья нога" и др.	"	$1,5 \pm 0,7$
Помещения реакторного блока, ВСРО, машинного зала	Вода с растворенными солями урана	11 ± 5
Под каскадной стеной	АЗФ	В ~ 3000 м ³ воды < 3 кг урана
На площадке под слоем бетона и щебня	АЗФ, топливная пыль	Не известно $0,6^{+0,3}_{-0,2}$

2. Проектирование "Укрытия" осуществлялось при отсутствии полной информации о состоянии конструкций блока. Поэтому не приходится говорить о наличии полной документации по объекту, в том числе *не разрабатывался и практически не мог быть разработан том технического обоснования безопасности*.

3. Несмотря на большой объем исследований, выполненных на "Укрытии", по-прежнему с достаточной достоверностью не удается установить количество, местоположение и подкритичность всех ядерных материалов. Существующие системы мониторинга не обеспечивают полный контроль физико-химических процессов, происходящих в ТСМ и т.д.

Важнейшей для безопасности особенностью объекта является его неполная исследованность и неполная контролируемость.

4. Оценка безопасности какого-либо объекта атомной энергетики или промышленности, как правило, опирается на практический опыт эксплуатации этого и аналогичных объектов. Например, совокупный опыт работы на водо-водяных реакторах для некоторых типов аппаратов составляет многие сотни лет.

"Укрытие" и здесь имеет свои особенности. Этот уникальный объект не имеет даже близких аналогов, а опыт его технического обслуживания составляет всего около 10 лет. Такая особенность объекта, как отсутствие необходимого опыта технического обслуживания, серьезно затрудняет работы по повышению его безопасности.

5. Наконец, особенностью объекта, важной для проведения анализа безопасности "Укрытия" и оценки его влияния на окружающую среду как в режиме нормальной эксплуатации, так и при авариях, является то, что объект находится *внутри сильно загрязнен-*

ной радиоактивностью зоны и рядом с работающими блоками ЧАЭС. При выработке пределов и условий поддержания объекта "Укрытие" в безопасном состоянии необходим постоянный учет этого фактора.

Таковы особенности объекта "Укрытие", которые отличают его от обычных объектов ядерной энергетики и промышленности.

Например, для оценки безопасности "Укрытия" чаще всего невозможно применение вероятностного анализа безопасности, развитого для объектов атомной энергетики. Напомним, что этот подход опирается на проектную документацию, данные обследований и долговременный опыт работы различных систем и конструкций ("наработка на отказ").

В случае "Укрытия" ничего этого нет, поэтому следует считать приемлемым сочетание экспертных и расчетных оценок безопасности, достигнутых на уровне существующих знаний.

Пересмотр этих оценок должен осуществляться по возможности чаще и продвигать анализ в область более долговременных прогнозов.

В качестве примера сочетания экспертных и расчетных оценок можно привести определение последствий разрушения конструкций "Укрытия". При этом "время жизни" той или иной конструкции — типичная экспертная оценка, условия образования и свойства пылевого облака. Характеристики распространения и осаждения облака радиоактивной пыли, вызванного разрушением, — типичный пример применения общепринятых расчетных программ.

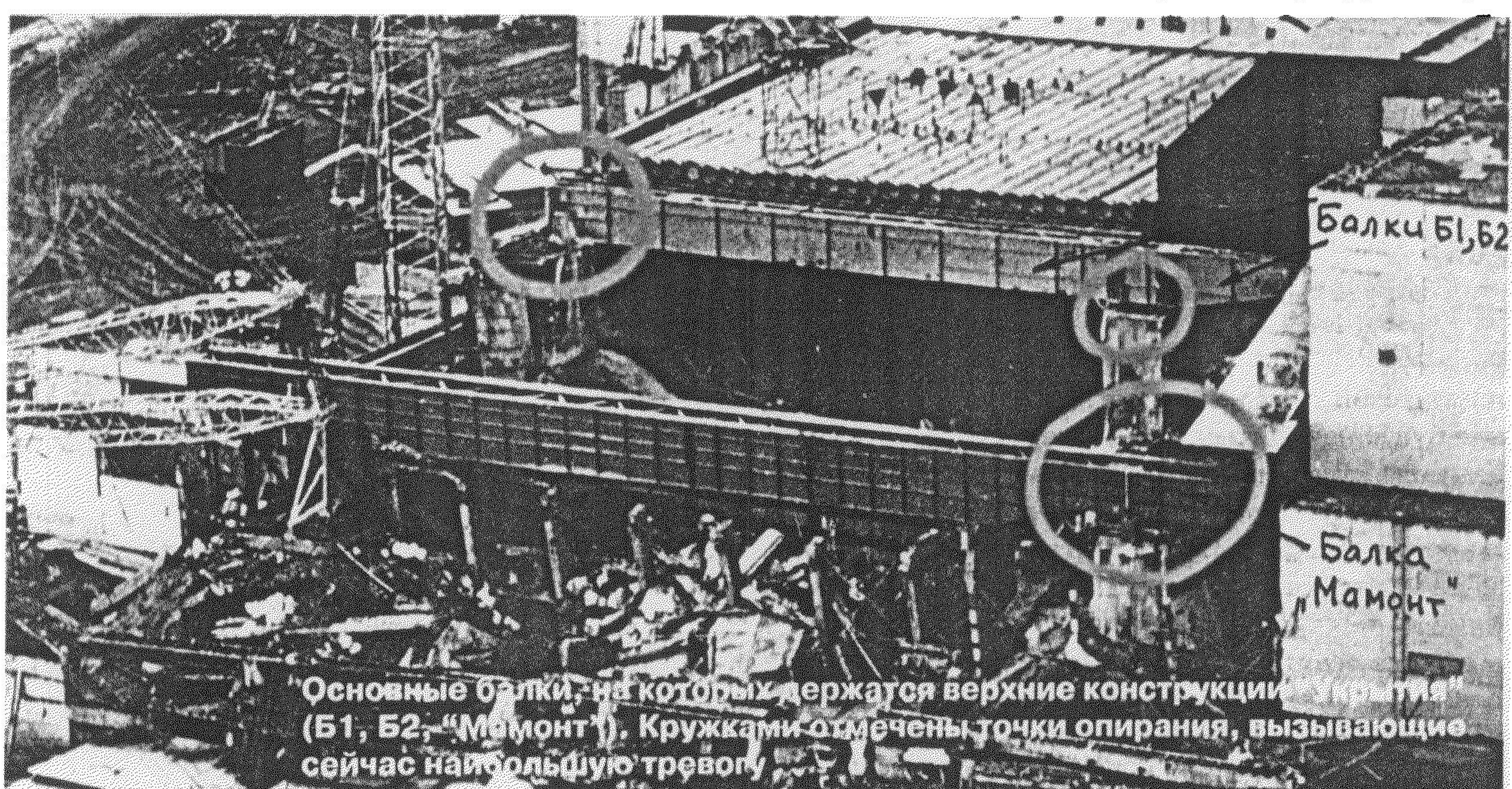
Исходные события, протекание радиационных аварий и оценка их последствий

Среди множества исходных событий рассмотрим те, которые приводят к наиболее радиологически значимым авариям. В табл. 2 эти события приводятся в порядке убывания их вероятности.

Пожар

Количество горючих материалов в "Укрытии" достаточно велико и оценивается приблизительно в 2000 т. За время после аварии на объекте произошли четыре пожара различной интенсивности, поэтому чисто формальная вероятность возникновения пожара на "Укрытии" составляет $0,4 \text{ год}^{-1}$. Результаты изучения влияния пожаров говорят о том, что пожар может вызвать значимые радиологические последствия в помещениях "Укрытия" и на площадке объекта. Оценки показывают, что при большом пожаре в сильно загрязненном помещении "Укрытия" человек, находящийся на площадке объекта, за $\sim 0,5 \text{ ч}$ может получить дозу 1 — 5 бэр за счет ингаляции трансурановых элементов.

Следует отметить, что наиболее загрязненные помещения объекта, содержащие ТСМ, не обслуживаются и не содержат вновь принесенных горючих материалов. Горючие же материалы, находившиеся там до аварии, уже испытали воздействие высоких температур, и можно ожидать, что их способность к воспламенению значительно понизилась, поэтому оценку надо воспринимать как сугубо консервативную.



даленные последствия радиационных аварий, были сделаны во многих работах.

В результате падения кровли возникнет движение вверх больших масс воздуха, которые будут увлекать с собой смесь пыли и топливных частиц.

Расчеты показали, что при таких условиях протекания аварии в турбулентный след могут быть вовлечены около 5 т пыли, содержащей 50 кг мелкодиспергированного топлива. Высота облака над уровнем земли составит 100 м (при эффективной высоте здания 60 м), начальный диаметр 20 м. По оценкам, около 20 % выброса выпадет в области аэродинамической тени за зданием. Протяженность этой тени ~ 200 м.

При малой скорости ветра и небольших расстояниях до "Укрытия" (область аэродинамической тени) ожидаемые концентрации в воздухе на площадке ЧАЭС наиболее радиологически значимых трансуранных элементов во время прохождения облака очень высоки. Характерное время существования облака в области аэродинамической тени за зданием.

Таблица 2. Перечень исходных событий для аварий на объекте "Укрытие" в порядке убывания их вероятности

Номер события ¹⁾	Исходное событие	Оцениваемая вероятность год ⁻¹
1	Пожар	0,4
2	Обрушение кровли объекта по деградационным причинам	0,1
3,4	Землетрясение 7 баллов.	0,0001
5	Ураганный ветер	3×10^{-6}
6	Смерч	2×10^{-7}
7	Падение летательного аппарата	?
	Исходное событие, связанное с повышением критичности	

намической тени "Укрытия" составит десятки минут. Если персонал будет находиться в нем в течение 0,1 — 0,5 ч, то доза, полученная вследствие ингаляции, составит несколько сотен годовых норм.

При этом нельзя исключить летальные исходы, поскольку число работающих на ЧАЭС достигает нескольких тысяч человек. По мере удаления от "Укрытия" дозы быстро снижаются и на расстоянии 10 км становятся меньше предельно допустимых.

После осаждения облака выпавшие на землю радионуклиды (в основном ^{137}Cs) способны создать в центре участка аэродинамической тени мощность дозы ~ 200 мбэр/ч.

В конце 1995 г. доктор Г. Претч с соавторами опубликовал независимые расчеты доз, которые могут получить люди, работающие на площадке ЧАЭС, в случае коллапса "Укрытия" (при спокойной погоде). Результаты этих расчетов соответствуют предыдущим.

Приведенные оценки вызывают законную тревогу. Однако следует помнить, что данных о функции источника все еще крайне мало, чтобы сделать точные количественные предсказания. И в опубликованных работах "белые" пятна заполняются максимально консервативными предположениями.

Ураган

До сих пор наши рассуждения основывались на предположении об отсутствии сильного ветра. Но на площадке "Укрытия" с вероятностью 10^{-4} год⁻¹ можно ожидать урагана — ветра со скоростью 47,3 м/с (при среднегодовой скорости ветра 4 м/с). Расчеты показывают, что в том случае, когда ураган серьезно не повреждает объект, дополнительный выброс из существующих щелей за счет подсоса мал. При разрушении последствия могут быть очень серьезными, но количественной оценки вероятности такого сценария пока нет.

Землетрясение

Была сделана оценка прочности конструкций "Укрытия" при землетрясении силой 7 баллов — максимальном расчетном землетрясении. Согласно полученным результатам опоры балок такого землетрясения не выдергивают, и "Укрытие" разрушится. Радиационные последствия аналогичны последствиям при обрушении кровли объекта по деградационным причинам. Аварийное состояние ряда конструкций заставляет предположить возможность их падения и при землетрясениях меньшей балльности. Однако соответствующих расчетов в настоящее время нет.

Смерч

В настоящее время отсутствуют расчеты прочности "Укрытия" при подобном внешнем воздействии. Однако, учитывая, что время прохождения смерча над "Укрытием" составит несколько секунд, можно ожидать, что особо крупные конструкции останутся на месте. Тогда выброс радиоактивности будет определяться разрежением, существующим в "воронке" смерча, которое может быть весьма значительным (достаточным, например, для подъема и переноса на значительные расстояния автомашин, железнодорожных вагонов, судов и т.п.). Оценок того, какая часть радиоактивной пыли может быть вовлечена в "воронку" смерча за это время, пока не сделано.

Падение летательного аппарата

Принятие организационных мер — запрещение полетов в воздушном пространстве близи объекта — может значительно уменьшить вероятность такого события, и оно не будет иметь практического значения.

Продолжение следует.