

МЕРЫ ПРОЗРАЧНОСТИ ДЛЯ ПОДКРИТИЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В РАМКАХ ДОГОВОРА О ВСЕОБЩЕМ ЗАПРЕЩЕНИИ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Сьюзен Л. Джоунс и Фрэнк Н. фон Хиппель

В статье намечены меры прозрачности, которые можно было бы предпринять для формирования международного доверия к тому, что подземные "подкритические эксперименты" в США или в любой другой стране не нарушают Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний. Как следует из наших расчетов, проведенные в непосредственной близости от места испытания измерения выхода всего излучения от этих экспериментов должны быть достаточны для проверки отсутствия ядерного взрыва с мощностью, эквивалентной нескольким граммам тротила, даже при значительном экранировании. Но наши расчеты указывают также, что эксперименты с делением, которые все время остаются сильно подкритичными, должны иметь мощность не выше 0.1 мкг тротилового эквивалента, если даже допустить облучение от внешнего (d,t)-источника. Эксперименты с (d,t)-синтезом под действием имплозии от химической взрывчатки могли бы обладать мощностью выше этого порога; могут потребоваться измерения продуктов деления в дополнение к измерениям мгновенного излучения, чтобы отвергнуть предположение о сверхкритичном испытании.

С.Джоунс - младший исследователь Центра по изучению энергетики и окружающей среды Принстонского университета. Ф.фон Хиппель - профессор внутренней и международной политики Принстонского университета.

ВВЕДЕНИЕ

В октябре 1995 г. министерство энергетики (МЭ) США объявило о серии экспериментов, которые, по его словам, помогут определить, как повлияют устаревший плутоний и новые методы производства заменяемых плутониевых компонентов для боеголовок на надежность американского арсенала ядерного оружия. Эта серия "подкритичных экспериментов" должна быть проведена под землей на невадском полигоне. В 1996 г. мы опубликовали статью в "Бюллетене ученых-атомщиков", где предложили, чтобы необходимость каждого предложенного подкритичного эксперимента была рассмотрена группой независимых экспертов, чтобы было проведено исследование альтернативных наземных экспериментов и чтобы, на случай, если будет проводиться любой из экспериментов, была достигнута договоренность о мерах прозрачности, достаточных для формирования международного доверия к тому факту, что эксперименты подкритичны¹. Затем МЭ решило, что необходимость в экспериментах была уже компетентно рассмотрена Джейсоновской группой консультантов², но оно поддержит изучение этой группой наземных вариантов³. Когда готовилась эта статья, еще не было согласовано ознакомление международной общественности с какими-нибудь физическими данными, имеющими отношение к подкритичности экспериментов.

НЕОБХОДИМОСТЬ В ПРОЗРАЧНОСТИ

Договор о всеобщем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) запрещает как полномасштабные испытания, так и испытания с малой мощностью, включая т.н. "гидроядерные" испытания, которые во время переговоров по ДВЗЯИ были определены американской стороной как испытания с ядерной мощностью, не превышающей 1.8 кг тротилового эквивалента. Впрочем в соответствии с американской интерпретацией, ДВЗЯИ разрешает предлагаемые подкритичные эксперименты, где не создаются условия для экспоненциально растущей ядерной реакции. Полемика вокруг предложенных испытаний возникла в связи с тем, что во-первых, в них будут использованы как химическая взрывчатка, так и делящиеся вещества, а во-вторых, они будут проводиться на невадском полигоне на подземной установке LYNER (созданной для экспериментальных ядерных исследований с малой мощностью). Хотя официальное название установки сейчас изменено на U1a, она с самого начала проектировалась для гидроядерных испытаний.

Одной из причин помещения установки LYNER под землю была трудность предсказания мощности гидроядерного испытания, и поэтому есть возможность того, что она окажется существенно выше проектной величи-

ны. Эта возможность возникает по той причине, что мощность гидроядерного испытания очень чувствительна к отдельным конструктивным параметрам. Хотя опасения в переборе вряд ли применимы к экспериментам, которые запроецированы оставаться в безопасном подкритичном состоянии, МЭ хотело бы использовать установку LYNER для подкритичных экспериментов теперь, когда гидроядерные испытания запрещены.

Если следить из космоса, то связанная с подземным подкритичным испытанием деятельность фактически неотличима от деятельности в связи с любым другим подземным испытанием, в том числе и с гидроядерным. Сейсмические измерения могут установить верхний предел полной мощности взрыва при испытании, чего достаточно для отбрасывания возможности проведения полномасштабного ядерного испытания. Но сейсмические данные нельзя использовать для определения того, какая часть энергии взрыва была ядерной. Если другие страны захотят узнать, какой эксперимент (подкритичный или гидроядерный) имел место, как смогут они определить разницу?

Доказательство того, что это не чисто академический вопрос, дается утверждениями о деятельности на российском ядерном полигоне Новая Земля вблизи Полярного круга в январе 1996 г. В соответствии с просочившейся в "Вашингтон Таймс" информацией, разведывательные данные об этой деятельности заставили ряд американских должностных лиц подозревать проведение ядерного испытания. Приводится высказывание одного правительственного лица: "У многих сотрудников Пентагона мало сомнений, и они уверены, что Москва взорвала небольшое ядерное оружие". Впрочем в той же статье приводится высказывание пресс-атташе Государственного департамента Дэвида Ливи: "Соединенные Штаты полагают, что российский мораторий на проведения ядерных испытаний продолжается"⁴.

Недоразумение отчасти могло возникнуть из-за того, что сейсмическая сеть в Норвегии зарегистрировала событие с магнитудой 2.5 в районе Новой Земли 13 января 1996 г. Сейсмический сигнал такой величины мог бы соответствовать подземному взрыву нескольких тонн тротила (без декаплинга)⁵ или тысячетонному взрыву в режиме декаплинга⁶. Однако последующий анализ данных в независимом Исследовательском институте сейсмологии показал, что событие было землетрясением - не на полигоне, а под морем⁷.

ВЫХОД ИЗЛУЧЕНИЯ

Если подкритичный эксперимент проводится под землей, то единственным способом убедить международную общественность в том, что это действительно подкритичный эксперимент, был бы контроль на месте.

Это можно осуществить, если позволить международной организации измерить интенсивность нейтронного и гамма-излучения от эксперимента. Использование наземного детектора для слежения за излучением от подземного эксперимента было бы неэффективным по той причине, например, что туннели, в которых проводятся американские испытания, проложены на глубине 300 м, в то время как характерная длина ослабления интенсивности нейтронов с энергией 1 МэВ и гамма-квантов составляет порядка 10 см в скальных породах. Поэтому любой радиационный контроль должен проводиться под землей в помещении для эксперимента.

Мы оценили верхнюю границу ядерной мощности, которую можно достичь в образце ядерного вещества, сжимаемого химической взрывчаткой до состояния, близкого к критичности, и сравнили возникающее излучение с тем, что возникает в типичном гидроядерном эксперименте. Как будет видно позднее, эти полные радиационные флюенсы различаются, как представляется, на много порядков величины. Мы использовали программу MCNP для наших оценок, хотя почти все может быть проверено простыми расчетами на клочке бумаги⁸.

ГИДРОЯДЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С МОЩНОСТЬЮ 1.8 КГ ТРОТИЛОВОГО ЭКВИВАЛЕНТА

В эксперименте на верхней части гидроядерного диапазона, когда ядерная мощность эквивалентна взрыву 1.8 кг химической взрывчатки, выделится 5.2×10^{16} МэВ (8.4 МДж) энергии⁹. Когда ядро Pu-239 делится быстрым нейтроном, выделяются 3 нейтрона со средней энергией около 2 МэВ у каждого, 7 мгновенных гамма-квантов со средней энергией около 2 МэВ у каждого и осколки деления, несущие энергию около 165 МэВ, при полном мгновенном энерговыделении, примерно, 185 МэВ. Поэтому для выделения 8.4 МДж энергии при 1.8-килограммовом взрыве требуется около 3×10^{17} делений.

Часть нейтронов и гамма-квантов будет захвачена в плутонии или в химической взрывчатке, а остальные выйдут наружу. Вычисления по программе MCNP показали, что около одного нейтрона и одного гамма-кванта со средней энергией около 1 МэВ у каждого (в расчете на одно деление) выйдут за пределы шара из оружейного плутония весом 5 кг¹⁰, окруженного сферическим слоем химической взрывчатки толщиной 10 см¹¹. Таким образом, при гидродинамическом испытании с мощностью 1.8 кг наружу выйдут, примерно, 3×10^{17} нейтронов и 3×10^{17} гамма-квантов. Находящийся на расстоянии 2 м от места проведения эксперимента детектор будет регистрировать флюенсы нейтронов или гамма-квантов порядка 6×10^{11} см⁻².

ПОДКРИТИЧНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Мы оценили верхние пределы выхода излучения от подкритичных экспериментов с внешним нейтронным источником или без него на основе следующей простой модели: сплошной шар плутония оружейного качества весом 7.5 кг и радиусом 4.81 см, окруженный слоем химической взрывчатки весом 25 кг и толщиной 10 см. В соответствии с программой MCNP, для такой системы $K_{eff} = 1$ с точностью до 0.1%¹². Представим, что такая система после детонации взрывчатки доводится до состояния с $K_{eff} = 1$ и остается в этом состоянии в течение одной мкс, то-есть эта длительность¹³ соответствует, примерно, сотне нейтронных поколений¹³.

Следует подчеркнуть, что в реальном эксперименте значение K_{eff} не останется постоянным - оно поднимется до максимальной величины и затем станет падать. В результате подкритичный эксперимент не может зависеть точно в подкритичном состоянии на все это время. Предположение, что $K_{eff} = 1$ в течение 100 поколений, было сделано в интересах получения верхнего предела с большим запасом прочности.

В отсутствие внешнего источника нейтронов имеется некоторое количество нейтронов и гамма-квантов от спонтанного деления Pu-240 и Pu-242. Один кг плутония оружейного качества, содержащего 6% Pu-240, испускает

около 5.5×10^4 нейтронов (возникающих при 2.8×10^4 спонтанных делениях) в секунду¹⁴. Поэтому те 7.5 кг плутония, которые мы рассматриваем, дадут 2.1×10^6 спонтанных делений в секунду, или 0.2 деления на мкс. Если для получения верхнего предела предположить, что спонтанное деление происходит в течение 10 нс (одно поколение нейтронов) в достигнутой критичности сфере (хотя вероятность такого события всего 0.2%), то при $K_{eff} = 1$ в течение 100 поколений произойдет 100 делений (меньше одного пикограмма тротилового эквивалента) с выделением около 100 нейтронов и 100 квантов со средней энергией 1 МэВ. Помещенный на расстоянии 2 м от места проведения эксперимента детектор "увидит" от этих делений флюенсы 2×10^4 гамма/см² и 2×10^4 нейтронов/см². Скорее всего, любая попытка обнаружить такие слабые потоки за интересующее нас время в одну мкс даст нулевой результат.

Кроме этих нейтронов и гамма-квантов от деления имеется гамма-фон от альфа- и бета-распадов в Pu-240 и Am-241. На расстоянии в 2 м флюенс от этих источников составит около 10^4 гамма/см² со средней энергией квантов в несколько сот кэВ за интервал времени в 1 мкс¹⁵. Фон от гамма-лучей из почвы добавит, грубо говоря, еще 10^6 гамма/см² со средней энергией в несколько сот кэВ за 1 мкс¹⁶.

Внешний источник нейтронов увеличит число делений и по этой причине вырастет количество испускаемых нейтронов и гамма-квантов. В типичном промышленном импульсном источнике нейтроны образуются при столкновении дейтронов (d) с энергией 50 кэВ и/или ядер трития (t) с мишенью, насыщенной дейтерием и/или тритием, согласно реакции синтеза: $d + t = He^4 + n + 18 \text{ МэВ}$ ¹⁷. Нейтрон забирает около 14 МэВ кинетической энергии и излучается практически изотропно. Имеющиеся в продаже нейтронные источники могут дать 10^9 нейтронов в импульсе длительностью 3.5 мкс¹⁸. В наших оценках предполагается источник с интенсивностью 10^8 нейтронов, испускаемых в бесконечно узком импульсе, - опять с целью получить верхний предел.

Мы допускаем, что такой нейтронный источник помещается на расстоянии 0.5 м от центра подкритичного экспериментального устройства. Затем с помощью MCNP-моделирования находим число делений - 1.5×10 (0.09 мкг тротила). Подсчитанные радиационные флюенсы на расстоянии 2 м составляют 38 нейтронов/см² и 35 гамма/см². Спектры нейтронов и гамма-лучей приведены на рис.1 и 2. Средняя энергия нейтронов и гамма-квантов составляет 1.0 МэВ. Если расстояние между источником нейтронов с энергией 14 МэВ и детектором составит 2 м и источник будет находиться в поле зрения детектора, то прямой флюенс от источника вычисляется просто: $10^8 / 4\pi(200) = 200$ нейтронов/см², см.²⁰

Хотя сами по себе эти верхние пределы на мощность и выход излучения от подкритичного эксперимента совсем невелики, они сильно завышены. Более реалистичная оценка может быть сделана при сокращении размеров подкритичного устройства до такой степени, чтобы $K_{eff} = 0.8$ ²¹. Меньшая критичность и меньший объем, облучаемый нейтронным источником, уменьшают мощность до 3.7×10^6 делений (2.3 нг тротила) и флюенсы на расстоянии 2 м до 1.2 нейтронов/см² и 0.8 гамма/см², см.²². Все полученные выше результаты сведены в табл.1.

В принципе, предполагаемый нейтронный источник можно заменить быстрой критической сборкой, способной испустить в миллион раз больше нейтронов за одну мкс²³. Хотя кажется маловероятным, чтобы реактор такого типа получил в США лицензию на применение, он может быть использован в других странах. Для оценок такого случая придется пропорционально изменить полученные здесь результаты.

(DT)-ИМПЛОЗИЯ

В 1992 г. в Челябинске-70 (Россия) проходила международная конференция - честь российского конструктора имплозивных систем Е.И. Забабахина. Среди обсуждавшихся вопросов были эксперименты с обжатием

газовой dt-смеси при помощи химической взрывчатки. Известно, что такие эксперименты проводились также в американских военных лабораториях. Как кое-кто утверждает, они составляют определенный класс "подкритичных экспериментов", разрешаемых в рамках ДВЗЯИ.

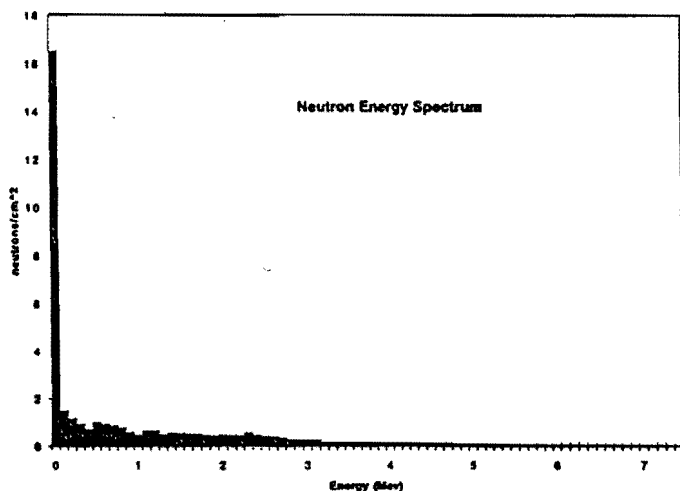


Рис.1: Результаты MCNP-расчета энергетического спектра нейтронного флюенса на расстоянии 2 м от места проведения подкритичного эксперимента ($K_{eff} = 1$ для 100 поколений нейтронов) с внешним источником. Замедление в химической взрывчатке вокруг плутония значительно изменило начальный спектр нейтронов деления. Около 40% всех данных, попавших в первый элемент дискретизации (15% всего спектра), соответствуют нейтронам с энергией ниже 1 эВ.

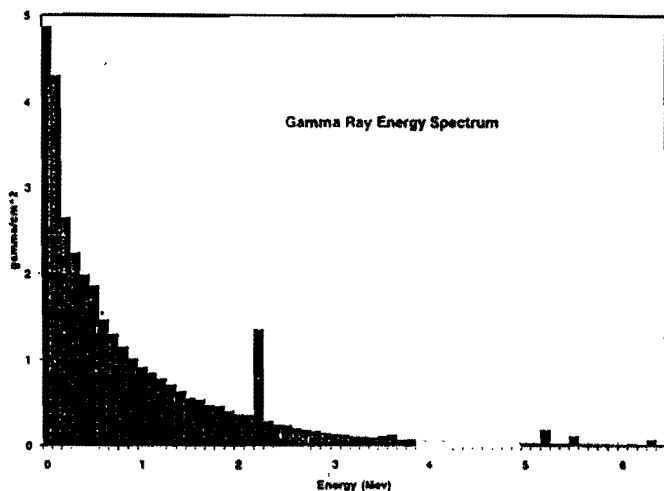


Рис.2: Результаты MCNP-расчета энергетического спектра гамма-флюенса на расстоянии 2 м от места проведения подкритичного эксперимента ($K_{eff} = 1$ для 100 поколений нейтронов) с внешним источником. Пик при энергии 2.3 МэВ соответствует захвату нейтронов водородом, входящим в состав химической взрывчатки.

Как следует из резюме докладов, представленных на Забабахинскую конференцию, максимальное число реакций синтеза, достигнутое в российских экспериментах по имплозии dt-газа химической взрывчаткой, было порядка 10^{13} , см.²⁴ Похоже, что такой выход был получен на основе достаточно тщательно разработанной методики (в том числе, нескольких концентрических слоев материалов разной плотности). При энерговыделении 18 МэВ 10^{13} реакций синтеза соответствуют мощности 6 мг тротилового эквивалента (один грамм тротила дает энергию, равную 3×10^{16} МэВ). Для расчета выхода излучения от такого эксперимента мы использовали программу MCNP, чтобы промоделировать точечный источник ней-

тронов с энергией 14 МэВ, находящийся в центре сферы из химической взрывчатки общим весом 100 кг. Обратите внимание, что мы пренебрегли всеми остальными веществами, например, слоями тяжелого металла. Когда нейтроны проходят через химическую взрывчатку, они образуют гамма-лучи в результате неупругого рассеяния и нейтронного захвата. Из MCNP-расчета следует, что на расстоянии 2 м флюенсы составляют 9.2×10^6 нейтронов/см² и 8.7×10^6 гамма/см² (см. табл.1). Средняя энергия нейтронов и гамма-лучей составляет 6.8 МэВ и 2.3 МэВ, соответственно. Энергетические спектры приведены на рис.3 и 4.

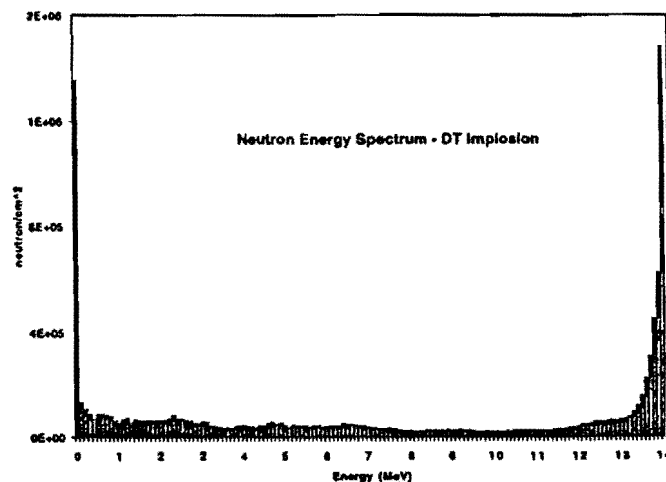


Рис.3: Результаты MCNP-расчета энергетического спектра нейтронного флюенса на расстоянии 2 м от места проведения описанного в тексте эксперимента по чистому обжатию dt-газа.

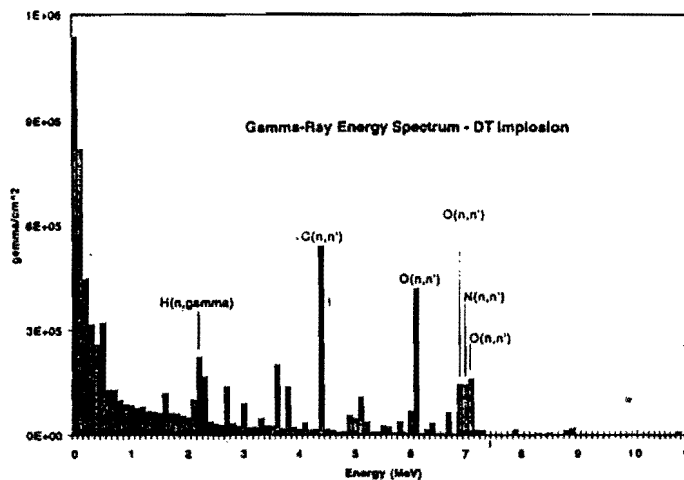


Рис.4: Результаты MCNP-расчета энергетического спектра гамма-флюенса на расстоянии 2 м от места проведения описанного в тексте эксперимента по чистому обжатию dt-газа. Характеристические пики связаны с неупругим рассеянием и радиационным захватом нейтронов высокой энергии в веществе химической взрывчатки.

(DT)-ИМПЛОЗИЯ ВНУТРИ ПЛУТОНИЯ

Другим возможным подкритичным экспериментом может стать сжатие dt-смеси внутри плутониевой оболочки. Произойдет несколько реакций синтеза, которые можно рассматривать в качестве внутреннего источника нейтронов, или они могли бы, возможно, иметь отношение к изучению перемешивания плутония с газом в процессе имплозии.²⁵ Неясно число реакций синтеза, которые могли бы произойти в простой системе обжатия при помощи химической взрывчатки, но оно, вероятно, окажется значительно меньше, чем в сложных конструк-

циях, упомянутых в материалах Забабахинских чтений. Предположим, что число реакций составляет 10^{13} (6 мг тротила), но результаты можно пропорционально изменить для меньших значений мощности синтеза. Используя MCNP-моделирование с начальными условиями: точечный источник 14 Мэв-ных нейтронов (с полным выходом 10^{13} частиц) в центре подкритичной модели при $k_{eff} = 0,8$, получим $2,5 \times 10^{13}$ делений в плутонии (156 мг тротила). На расстоянии 2 м флюенсы от реакций синтеза составляют около $1,1 \times 10^7$ нейтронов/см² и $8,6 \times 10^6$ гамма/см² при средних энергиях 9,0 МэВ и 1,7 МэВ на частицу, соответственно. К этому следует добавить флюенсы порядка $8,5 \times 10^7$ нейтронов/см² и $5,8 \times 10^7$ гамма/см² при средней энергии 1 Мэв на частицу для каждого компонента. Полные флюенсы и средние энергии частиц приведены в табл.1.

Табл.1: Мощности (в тротиловом эквиваленте), флюенсы частиц (п/см² или γ/см²) и средние энергии частиц (E_n или E_γ), которые можно наблюдать на расстоянии 2 м от подкритичных экспериментов (ПКЭ), гидроядерных экспериментов (ГЯЭ) и dt-имплозии, описанных в тексте. Энергетический флюенс (МэВ/см²) на детекторе можно получить, перемножив флюенс частиц и среднюю их энергию. Сценарии: 1 - ПКЭ (только спонтанное деление); 2 - ПКЭ (внешний источник нейтронов, $k_{eff} = 0,8^*$); 3 - ПКЭ (внешний источник нейтронов, $k_{eff} = 1,0^*$); 4 - DT-имплозия; 5 - DT-имплозия внутри Pu; 6 - ГЯЭ с тротиловым эквивалентом 1,8 кг.

Сценарий	Выход	п/см ² (E _n МэВ)	γ/см ² (E _γ МэВ)
1	< 1 нг	<.0002(1)	<.0002(1)
2	2,3 нг	1,2(1,0)	0,8(1,0)
3	0,09 мкг	38(1,0)	35(1,0)
4	6 мг	9,2 10 ⁶ (6,8)	8,7 10 ⁶ (2,3)
5	162 мг	9,6 10 ⁷ (1,9)	6,7 10 ⁷ (1,1)
6	1,8 кг	6 10 ¹¹ (1)	6 10 ¹¹ (1)

Значок * указывает, что результаты приведены по MCNP-расчету.

ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения мгновенного излучения от рассмотренных выше экспериментов можно провести пластиковым сцинтиллятором, соединенным с фотоумножителем или с фотодиодом (см. Приложение А). Такой детектор обеспечит данные по энергетическому флюенсу в районе детектора, что в сочетании с оценками средней энергии на частицу и потерь при пролете от экспериментальной зоны до детектора можно использовать для получения мощности микровзрыва. Мгновенное излучение можно измерить другим методом с помощью индикаторов, например, дозиметрической пленки или активационной фольги, которые можно взять на исследование после эксперимента.

Полезным может оказаться измерение излучения от любого присутствующего продукта деления. Например, можно измерять энергетический гамма-спектр в области гамма-линии, ожидаемой от продукта деления, скажем, I-131. Период полураспада этого изотопа составляет 8 дней и он излучает гамма-лучи с энергией 364 кэВ в 79% распадах. Наши оценки предполагают, что эту линию можно легко обнаружить при мощностях порядка одного мг (см. Приложение Б). Такое измерение можно использовать для оценки мощности или, если сочетать его с измерением мгновенного излучения, чтобы отличить эксперимент с делением от эксперимента с чистой DT-имплозией, где не образуются продукты деления.

ЗАЩИТА ОТ ОБМАНА

Возможный обман вызывает тревогу, в частности, когда в экспериментальном зале могут находиться люди после установки детектора и до момента проведения эксперимента. Среди попыток избежать обнаружения испытания, нарушающего ДВЗЯИ, можно указать на следующие: (1) отключение питания от детекторов или прерывание (либо подмена) сигнала во время измере-

ния; (2) передвижение детектора или экспериментальной зоны; (3) разрушение контрольного оборудования взрывом непосредственно перед проведением эксперимента (если предусмотрено разрушение оборудования во время эксперимента); (4) помещение экранов вокруг экспериментальной зоны для уменьшения потока излучения на детектор.

Первый класс возможного обмана - это те же стандартные тревоги, которые типичны для мер предосторожности при работе с делящимися веществами. Детектор можно оборудовать устройством, работающим от батарей, как во многих электрических часах, что ослабит опасность отключения питания. В целостности соединительного кабеля между детектором и блоком считывающей электроники можно убедиться путем периодической посылки опорного сигнала с частотой около 0,1 с, который включит сигнал тревоги в случае прерывания.

Проверка того, что место проведения эксперимента осталось фиксированным, более затруднительно. Может быть, сейсмические детекторы, помещенные в коридоре вне испытательной камеры смогут методом триангуляции подтвердить положение взрыва.

С возможными нарушениями третьего типа можно справиться, если использовать возвращаемые индикаторы, как было обсуждено ранее. Кроме того, сцинтилляционный детектор может быть укреплен против взрыва, если поместить его, например, внутри стальной трубы.

Мы изучили четвертый тип опасений путем рассмотрения экранирующей возможности ряда материалов. Чем ближе располагать детектор к месту проведения эксперимента, тем выше уверенность в том, что эксперимент не был сильно экранирован. Поскольку мы предположили, что детектор находится в двух метрах от экспериментальной зоны, мы рассматривали экраны с максимальной толщиной 50 см.

В хорошем нейтронном экране сочетаются легкий химический элемент для замедления и элемент, сильно поглощающий тепловые нейтроны. Подходящим примером служит гидрид лития LiH. Изотоп Li-6 составляет 7,5% от естественного лития и обладает сечением поглощения тепловых нейтронов 940 барн (940×10^{-24} см²). Изотоп Li-7 с сечением захвата тепловых нейтронов около 0,04 барна составляет оставшиеся 92,5%. Высокое значение сечения захвата медленных нейтронов в Li-6 означает, что как только нейтрон деления замедлится при столкновении с ядром водорода, он с большой вероятностью захватится даже при сравнительно небольшой концентрации ядер Li-6²⁶. Степени нейтронного экранирования гидридом лития и рядом других веществ приведены в табл.2. Там же указаны нейтронные флюенсы от экранированного гидроядерного эксперимента с тротиловым эквивалентом 1,8 кг.

Хороший экран от гамма-излучения содержит элементы с большим атомным номером (Z) из-за их высокой плотности, большого сечения фотопоглощения при низкой энергии гамма-лучей и большого сечения образования пар при высокой энергии гамма-лучей. Впрочем порог неупругого нейтронного рассеяния падает с ростом Z, так что экраны с высоким значением Z приведут к образованию дополнительных гамма-лучей. Это эффект можно заметить из данных в табл.2. Хотя свинец является отличным экраном для гамма-лучей, его эффективность в данном случае смазывается образованием гамма-лучей от нейтронов. Несмотря на меньший коэффициент ослабления гамма-лучей, железо в смеси сталь-вода-бор имеет лучшие свойства по экранированию гамма-лучей, чем свинец, в том случае, когда на экран падают одинаковые количества нейтронов и гамма-квантов. Ни один из экранов, представленных в табл.2, не обеспечивает ослабление на десять порядков величины, которое необходимо, чтобы флюенсы от гидроядерного эксперимента с тротиловым эквивалентом 1,8 кг оказались сравнимыми с значениями, ожидаемыми от подкритичного эксперимента. Однако оптимизированный экран, состоящий из слоя нейтронного замедлителя с поглотителем и слоя материала, поглощающего гамма-лучи, мог бы обеспечить ослабление, примерно, на

шесть порядков величины, при котором радиационные флюенсы от испытания мощностью в один грамм попадают в область, характерную для подкритических испытаний. Такой экран мог бы также снизить флюенсы от гидроядерного эксперимента (с тротиловым эквивалентом 1.8 кг) на четыре или пять порядков величины до значений, сравнимых с расчетными величинами для экспериментов с DT-имплозией. Поэтому, если бы планировались подземные DT-эксперименты, надо выбрать такие меры прозрачности, чтобы можно было отличить эти эксперименты от гидроядерных испытаний, например, путем сочетания измерений мгновенного излучения с обнаружением продуктов деления.

Табл.2: Степень экранирования флюенсов частиц, их средней энергии и энергетического флюенса разными материалами (по MCNP-расчетам). Степень поглощения определяется оценкой уменьшения энергетического флюенса при окружении экспериментальной установки с чистым делением под действием химической взрывчатки слоем экранирующего материала. Программа MCNP использовалась для расчета эффекта от сферического экрана из материала толщиной 20 см или 50 см при моделировании подкритического эксперимента с $k_{\text{эф}} = 1$. Флюенсы частиц затем пропорционально увеличивались до значений, соответствующих гидродинамическому эксперименту (с эквивалентной мощностью 1.8 кг). Флюенсы соответствуют расстоянию 2 м от места проведения эксперимента. В качестве опорных точек в нижней части таблицы приведены значения для неэкранированных экспериментов с мощностью 1 г и 0.1 мкг. Статистические ошибки составляют несколько процентов.

	$n/\text{см}^2$ (E_n МэВ)	Ослабл. (n)	$\gamma/\text{см}^2$ (E_γ МэВ)	Ослабл. (γ)
ГЯЭ (1.8 кг)	$6 \cdot 10^{11}$ (1)	1	$6 \cdot 10^{11}$ (1)	1
LiH				
20 см	$8.4 \cdot 10^9$ (1.7)	42	$5.3 \cdot 10^{11}$ (0.7)	1.6
50 см	$2.8 \cdot 10^7$ (2.6)	8240	$3.2 \cdot 10^{11}$ (0.6)	3.1
TiH₂				
20 см	$3.5 \cdot 10^9$ (1.6)	107	$2.2 \cdot 10^{11}$ (2.1)	1.3
50 см	$4.6 \cdot 10^8$ (3.0)	43500	$8.3 \cdot 10^9$ (2.3)	31
Сталь/вода/бор¹				
20 см	$6.3 \cdot 10^{10}$ (0.8)	12	$2.0 \cdot 10^{10}$ (1.2)	25
50 см	$1.5 \cdot 10^9$ (0.5)	800	$3.5 \cdot 10^8$ (1.0)	1714
Pb				
20 см	$4 \cdot 10^{11}$ (0.6)	2.5	$3.6 \cdot 10^9$ (2.0)	83
50 см	$3 \cdot 10^{11}$ (0.3)	6.7	$9.0 \cdot 10^8$ (2.6)	266
Опорные точки				
ПКЭ - (100нг)	38 (1.0)	1	35 (1.0)	1
ГЯЭ (1г)	$3 \cdot 10^8$ (1)	1	$3 \cdot 10^8$ (1)	1

¹ весовые отношения 96:3:1

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Лонг-по Ку из Принстонской лаборатории физики плазмы за помощь при использовании программы MCNP, а также Ли Бину из Института прикладной физики и вычислительной математики (Пекин) за стимулирование нашего интереса к данному вопросу и за многие полезные комментарии.

ПРИЛОЖЕНИЕ А АППАРАТУРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МГНОВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Как мы видели, мощность безопасного подкритического эксперимента ожидается меньшей, чем от одной десятой микрограмма тротилового эквивалента, даже в случае облучения нейтронной вспышкой. В идеальном случае, любой метод контроля на месте смог бы произвести с разумной точностью измерение мощности вплоть до этого верхнего уровня. Хотелось бы также иметь возможность измерять более высокие мощности для событий, нарушающих Договор. Желателен диапазон регистрации от 0.1 мкг до 10 г тротилового эквивалента. Впрочем маловероятно, чтобы столь широкий динамический диапазон мог быть перекрыт всего одним детектором. Потребуется набор детекторов с разными уровнями чувствительности. В данном приложении приводятся основные данные об аппаратуре, которая нужна для регистрации мгновенного излучения от эксперимента и определения мощности.

Для этих целей подходят пластиковые сцинтилляторы. У них очень малые времена высвечивания (около нс) и они чувствительны как к нейтронам, так и к гамма-лучам. Если поток гамма-лучей составит 35 см^{-2} за мкс, а площадь сцинтиллятора равна 100 см^2 , то средний промежуток между приходами квантов равен около 0.3 нс. При таких условиях нельзя считать отдельные импульсы и детектор должен работать в "токовом" режиме. Работа в токовом режиме подразумевает, что нельзя использовать традиционные методы, например, дискриминацию по форме импульса, для разделения нейтронного и гамма-сигналов.

Чувствительность сцинтилляционного детектора к частицам данного типа может быть определена как величина заряда на выходе прибора, приходящаяся на единицу падающей на детектор энергии. В число параметров, определяющих эту чувствительность, входят эффективность энергосбора, сцинтилляционная эффективность, эффективность сбора света фотокатодом, квантовая эффективность материала фотокатода и коэффициент усиления фотоумножителя (ФЭУ).

Эффективность энергосбора ϵ рассчитывается по сечению взаимодействия падающего излучения с веществом сцинтиллятора с учетом его размера и геометрии. Сцинтилляционная эффективность S определяется как доля энергосбора частицы, преобразованная в свечение. Сцинтилляционная эффективность для гамма-лучей в таких обычных пластиковых детекторах, как Viscon BC-400 и BC-404²⁷, составляет около 3%²⁸ и имеет линейный характер (то-есть, не зависит от энергии падающей частицы) для энергий выше, примерно, 125 кэВ²⁹.

Эффективность светосбора C определяется тем, какая часть свечения попадет на фотокатод, соединенный с ФЭУ. Она зависит от следующих параметров: площадь фотокатода; вероятность поглощения свечения сцинтиллятора и его переизлучения в спектральном диапазоне, где фотокатод относительно малоэффективен; эффективность работы светотражателей на боковых поверхностях сцинтиллятора, жидкого оптического контакта между сцинтиллятором и окошком ФЭУ и световодов, которые применяются для сведения к минимуму потерь.

Квантовая эффективность фотокатода q определяется как отношение числа фотоэлектронов, образованных на фотокатоде, к числу падающих фотонов. Квантовая эффективность меняется с длиной волны свечения сцинтиллятора и ее значение приводится для той длины волны, когда чувствительность фотокатода достигает максимума - обычно это диапазон 200-500 нм. Квантовые эффективности фотокатодов лежат в пределах 20-30% для щелочно-щелочных фотокатодов, спектральные эффективности которых хорошо совмещены со спектрами свечения пластиковых сцинтилляторов³⁰. Усреднив поправки на нелинейности характеристик материала сцинтиллятора³¹ или свойств ФЭУ³², можно следующим образом оценить общую чувствительность детектора

(заряд на выходе, приходящийся на единицу энергии падающих гамма-лучей):

$$\text{Чувствительность (Кл/МэВ)} = \varepsilon \cdot S \cdot C \cdot G \cdot q \cdot e / E \quad (1)$$

где G - коэффициент усиления ФЭУ, E - средняя энергия фотонов сцинтилляционного свечения, q - квантовая эффективность на длине волны, соответствующей энергии E , e - заряд электрона (в кулонах). Положив, например, $\varepsilon = 0.1$, $S = 0.03$, $C = 0.1$, $G = 10$, $q = 0.2$ и $E = 3.2$ эВ, найдем значение чувствительности, равное 3×10^{-12} Кл/МэВ. При площади детектора 100 см^2 средний ток на выходе от гамма-лучей со средней энергией 1 МэВ, возникших в нашем подкритичном эксперименте с тротиловым эквивалентом мощности 0.1 мкг, будет равен:

$$I = (3 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/МэВ}) (1.0 \text{ МэВ}) (35 \gamma / \text{см}^2) (100 \text{ см}^2) / (1 \text{ мкс}) = 0.01 \text{ А}$$

Вклад в ток, вызванный нейтронами, можно оценить таким же образом, но при расчете чувствительности надо использовать значения ε и S , характерные для нейтронов. На практике эта чувствительность будет определяться путем калибровки детектора по известным источникам.

Поскольку измеряемый ток пропорционален флюенсу энергии, попадающей на детектор, он будет меняться со временем в соответствии со скоростью прихода излучения. Если детектор находится на расстоянии 2 м от места проведения эксперимента, то гамма-лучи появятся через 7 нс. Итак, в течение микросекундного интервала, представляющего для нас интерес, они будут поступать практически мгновенно. Нейтроны, наоборот, будут обладать разными скоростями. Нейтроны с энергией 14 МэВ затратят 40 нс на путь 2 м между источником и детектором. Нейтроны с энергией 1 МэВ дойдут до детектора примерно через 150 нс. Нейтронам с энергией ниже 5 кэВ (это примерно 30% всех нейтронов, выходящих из зоны эксперимента) потребуется 2 мкс, чтобы дойти до детектора. Если активное временное окно детектора не превышает нескольких мкс, то потеряются эти медленные нейтроны, дающие малый вклад в полный нейтронный энергетический флюенс.

Можно использовать цифровой преобразователь формы сигнала или цифровой осциллоскоп для измерения и запоминания напряжения с резистора, по которому течет ток от ФЭУ или от фотодиода. Например, фирма "Лекрой" производит цифровой осциллоскоп (серия 9384) с максимальной скоростью дискретизации 4 гигабайт/с, с 8-битовым вертикальным разрешением и с памятью, достаточной для запоминания 8 миллионов записей (или измерения данных в течение 2000 мкс с интервалами 0.25 нс).

Потребуется детекторы, перекрывающие несколько интервалов чувствительности, чтобы получить измеряемый ток при широком многообразии возможных флюенсов нейтронов. Одним из способов достижения этого могло бы стать подсоединение к сцинтиллятору нескольких ФЭУ с разными коэффициентами усиления. Можно также соединить со сцинтиллятором кремниевый фотодиод для перекрытия верхней части динамического диапазона, поскольку у фотодиодов маленькие площади и нет усиления.

Если есть полное представление об эксперименте, а фон оказывается незначительным, то измеримый сигнал можно получить при мощности с тротиловым эквивалентом вплоть до 0.1 мкг. Однако, как кажется, появятся неопределенности в результате недостатка сведений об эксперименте, который может оказаться замаскированным. Например, расстояние между детектором и экспериментальной зоной может быть плохо оценено, или же предполагаемая средняя энергия выделяющегося излучения может оказаться неточной из-за неполного знания толщины, геометрии и типа материалов, через которые проходит излучение прежде, чем попасть в детектор. Фон от внешнего нейтронного или гамма-источника будет сравним с сигналом от эксперимента с эквивалентной мощностью 0.1 мкг тротила, что почти обязательно потребует экранировки детектора. При детонации взрыв-

чатки возникнут электромагнитные импульсы, к которым очень чувствительны ФЭУ и кабели (но не фотодиоды), что делает необходимым электромагнитное экранирование³³. Хотя мы полагаем, что серьезно нарушающий подкритичный порог (грамм тротилового эквивалента или больше) эксперимент трудно будет скрыть, эксперименты с очень низкой мощностью (но все же, возможно, запрещенные) могут оказаться не измеряемыми с высокой степенью достоверности.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б РЕГИСТРАЦИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

Оценка числа делений в эксперименте может быть проведена по поиску гамма-лучей от продуктов деления. Гамма-лучи можно регистрировать при помощи детектора с высоким разрешением, например, германия высокой чистоты (ГВЧ)³⁴. Один из подходов заключается в измерении скорости распада данного продукта деления относительно скорости распада плутония. Это отношение называют "эффективностью деления". Будучи умноженным на расчетное полное количество плутония, использованного в эксперименте, оно даст мощность. В другом случае можно использовать измеренную скорость распада данного продукта деления для оценки наличного числа ядер этого изотопа; результат будет пропорционален числу произошедших в эксперименте делений. В последующем простом примере мы используем второй подход.

Для регистрации есть много кандидатов из числа продуктов деления, но мы используем йод-131 с периодом полураспада 8 дней, который в 79% распадов испускает гамма-лучи с энергией 364 кэВ. Изотоп I-131 составляет 3.9% всех продуктов в результате деления ядер Pu-239 нейтронами делительного спектра³⁵. Число образовавшихся атомов I-131 N_0 (в расчете на энерговыделение, эквивалентное одному грамму тротила) равно:

$$N_0 = (0.039)(3 \times 10^{16}) / (185) = 6.3 \times 10^{12} \text{ г} \quad (1)$$

где 0.039 - доля атомов I-131 среди продуктов деления; 3×10^{16} МэВ/г - энергоэквивалент одного грамма тротила; 185 МэВ - энерговыделение при делении одного ядра Pu-239. При среднем времени жизни 10^5 с число распадов в единицу времени составит

$$dN/dt = 6.3 \times 10^6 \exp\{-10^{-6}t\} (\text{г с})^{-1} \quad (2)$$

Представим себе для простоты, что испытание с ядерной мощностью 1 мг произошло в комнате с общей площадью потолка и пола 100 м^2 , а продукты деления равномерно покрыли потолок и пол, в которые попадает половина излучения. Поток гамма-лучей с энергией 364 кэВ (линия I-131) составит в этом случае примерно

$$0.79 \cdot 0.5 \cdot 6.3 \times 10^6 \exp\{-10^{-6}t\} 10^3 / 50 \text{ м}^2 = 50 \exp\{-10^{-6}t\} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

ГВЧ-детекторы обладают энергетическим разрешением порядка 1 кэВ при энергии гамма-лучей около 300 МэВ³⁶. Земной гамма-фон в районе 364 кэВ составляет около $40 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, см.³⁷. Если потребовать, чтобы сигнал от I-131 выделялся над уровнем фона на 5σ , то надо иметь число "истинных" отсчетов в детекторе, превышающее пять статистических флуктуаций фоновых отсчетов (или равно ему):

$$A_S \varepsilon_S S t \geq 5(A_B \varepsilon_B B t)^{1/2} \quad (3)$$

где A_S и A_B - эффективные площади детектора при измерении сигнала и фона, соответственно, ε_S и ε_B - эффективности регистрации истинных и фоновых событий, S - истинный поток, B - фоновый поток, t - время измерений. Положив $A_S = A_B$ и $\varepsilon_S = \varepsilon_B$, найдем выражение для t :

$$t > 25B / (A_S \varepsilon_S S^2) \quad (4)$$

Если измерение проводится через день после эксперимента с ядерной мощностью 1 мг, то $S = 46 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При-

няв ширину сигнала равной 2 кэВ, получим $B = 80 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. При $A_S = 0.003 \text{ м}^2$ и $\epsilon_S = 0.2$ получим, что пятикратное превышение сигнала над флуктуациями фона будет достигнуто через 1000 секунд счета⁵⁸.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. von Hippel, F. and S. Jones, "Take a Hard Look at Subcritical Tests", The Bulletin of the Atomic Scientists, November/December 1996, p.44.
2. Nuclear Testing, JASON report #JSR-95-320, McLean, VA:Mitre Corp., (August 3, 1995).
3. Subcritical Experiments, JASON report #JSR-97-300, McLean, VA:Mitre Corp., January 21, 1997.
4. Gertz, B., "U.S. Officials Suspect Russia Staged Nuclear Test This Year", The Washington Times, March 7, 1996, p.A3.
5. Термин "декаплинг" означает уменьшение сейсмического сигнала, когда взрыв происходит в большой подземной полости.
6. van der Vink, G. and T. Wallace, "The Political Sensitivity of Earthquake Locations", IRIS Newsletter, Vol. XV, No.3. (Fall 1996), pp.20-23.
7. Там же.
8. MCNP, "A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport", Version 4A, Los Alamos National Laboratory (1994).
9. Сделано стандартное предположение, что при подрыве одной "короткой" тонны (2000 фунтов) химической взрывчатки выделяется 10^9 калорий (4.2×10^9 Дж) энергии. Поэтому при взрыве одного грамма тритила высвобождается около 3×10^{18} МэВ.
10. В статье считается, что плутоний оружейного качества находится в δ -фазе с плотностью 16 г/см^3 , хотя в действительности имплозия приводит к увеличению плотности. По поводу изотопного состава смотрите Reversing the Arms Race: How to Achieve and Verify Deep Reductions in the Nuclear Arsenals, F.von Hippel and R. Sagdeev, eds., Gordon & Breach Science Publishers, New York, (1990), p.266.
11. В статье считается, что взрывчатка имеет химическую формулу $C_4H_8N_8O_8$, а ее плотность составляет 1.9 г/см^3 . Впрочем, в действительности взрывчатка в какой-то степени расширится после взрыва. См. Reversing the Arms Race, p.299.
12. Величина k_{eff} представляет из себя коэффициент размножения нейтронов, то-есть отношение числа нейтронов в последовательных поколениях. См. S. Glasstone and A.Sesonske, Nuclear Reactor Engineering, 4th Ed., Chapman & Hall, New York, (1944), p.151.
13. Эта величина приблизительно соответствует числу поколений в ядерном взрыве, где $k_{\text{eff}} = 2$, и ее можно рассматривать следующим образом: если нейтрон начинает цепную реакцию в системе, в которой везде $k_{\text{eff}} = 2$, то n -ое поколение будет содержать 2^{n-1} нейтронов. В этом случае потребуется примерно 81 поколение для того, чтобы разделить все 2.5×10^{24} ядер в одном кг плутония ($2^{81} = 2.4 \times 10^{24}$). В сверхкритичной сборке, начальная гидродинамика которой моделируется в подкритичных экспериментах, скорость нейтронов с энергией 2 МэВ составляет, примерно, $2 \times 10^9 \text{ см/с}$, а длина свободного пробега между делениями в плутонии оружейного качества равна около 10 см, так что время между последовательными делениями будет порядка 10^{-8} с. При 10 нс на поколение цепная реакция со ста поколениями займет менее одной мкс. Дальнейшие обсуждения можно найти в работе Robert Serber, The Los Alamos Primer, University of California Press, Berkeley, (1992), pp.9-10, и в статье C.Mark, "Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium", Science and Global Security, Vol.4, (1993), p.118.
14. Около двух нейтронов вылетают при спонтанном делении (Reversing the Arms Race, p.315). Мы пренебрегли дополнительными нейтронами от (α, n) -реакции в плутонии - это поправка примерно в 2% (там же).
15. Плутоний оружейного качества десятилетней давности испускает около $130\,000 \text{ } \mu\text{(г.с)}$ со средней энергией примерно 400 кэВ (Reversing the Arms Race, p.384). Если предположить, что половина квантов, образовавшихся на длине свободного пробега (примерно 0.2 см для гамма-лучей с энергией 400 кэВ в плутонии) под поверхностью плутониевой сферы радиусом 4.81 см, выйдет наружу, то полная интенсивность составит $6 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$, а флюенс на расстоянии 2 м будет равен 10^{-4} см^{-2} за мкс.
16. Земной гамма-фон на уровне моря равен примерно $10 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и слегка вырастет глубоко под землей. Он может также отклоняться от этой величины из-за локальных изменений концентрации урана. Поток гамма-лучей космического происхождения на уровне моря составляет около одного процента от земного фона и в любом случае им можно пренебречь на глубине 300 м под землей. Точно так же заряженные космические лучи не окажут заметного влияния в течение представляющего интерес временного интервала в 1 мкс, поскольку их поток на уровне моря составляет примерно $200 \text{ частиц/(м}^2 \text{ с)}$.
17. При 50 кэВ сечение (d,t)-реакции близко к своему максимальному значению. См. A Physicist's Desk Reference, American Institute of Physics, (1989), p.118.
18. Reversing the Arms Race, p.367, note 3.
19. В случае, когда в импульсе длительностью 3.5 мкс испускаются 10^9 нейтронов, это допущение переоценивает верхний предел примерно в 7 раз. Это можно увидеть, если рассмотреть импульс квадратной формы: в 1/3.5 раз меньше делений, вызванных источником, произойдет фактически за микросекундное окно критичности; кроме того, при $k_{\text{eff}} = 1$ за время эксперимента пройдет не 100, а только 50 поколений ($2 \times 3.5 = 7$).
20. Эти нейтроны от внешнего источника усложняют попытки измерения флюенсов от эксперимента со столь малой мощностью, если только не использовать экранирование или другие меры для уменьшения флюенса источника на детекторе.
21. В этом случае эксперимент принимает следующий вид: сплошной шар плутония оружейного качества радиусом 3.75 см и весом 3.5 кг, окруженный слоем взрывчатки толщиной 10 см и весом 20 кг.
22. Тот факт, что $k_{\text{eff}} = 0.8$, означает образование каждым нейтроном только $(1 - k_{\text{eff}})^{-1} = 5$ дополнительных поколений вместо 100, а это уменьшает мощность в 20 раз. Дополнительное уменьшение в 1.6 раз можно связать с уменьшением эффективной площади поверхности сферы (при переходе от радиуса 4.81 см к 3.75 см). Наконец, более значительная часть быстрых нейтронов пройдет через меньшую массу плутония, не вызвав деления. Все это дает уменьшение примерно в 35 раз.
23. Импульсный реактор Sandia II дает вспышку нейтронов деления с полным числом около 10^{18} за импульс с эффективной длительностью (ширина на полумаксимуме) 40 мкс. См. "Radiation Facilities", Sandia National Laboratory, (brochure). (December 1989), p.11.
24. Третьи Забабахинские научные чтения (резюме), (14-17 января 1992 г.), Челябинск-70.
25. Считается, что мощность большинства или всех современных запальных взрывных устройств, использующих деление, увеличивается за счет внутренних источников (d,t)-синтеза. См., например, T.Cochran, W.Arkin, and M.Hoenig, U.S. Nuclear Forces and Capabilities, Cambridge, Ballinger, (1984).
26. Если естественный LiH на 100% обогащен литием-6, эффект экранировки от нейтронов не изменится. Это означает, что эффект экранировки уже ограничен сечением упругого рассеяния в водороде.
27. Раньше их называли NE-102 и PILOT-B, соответственно.
28. Clark, D., "The Intrinsic Scintillation Efficiency of Plastic Scintillators for Co-60 Gamma Excitation", Nuclear Instruments and Methods, Vol.117, (1974), p.295.
29. Knoll, G., Radiation Detection and Measurement, Wiley, New York, (1989), p.248.
30. У пластиковых сцинтилляторов (например, у BC-400

- и BC-404) максимум излучательного спектра находится между 400 нм и 440 нм. Спектральная восприимчивость типичных щелочно-щелочных фотокатодов (например, Sb-K-Cs) также имеет максимум в диапазоне 400-450 нм.
31. Leo, W., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, Berlin, (1987), pp.160-163.
 32. Knoll, pp.290-291.
 33. ФЭУ обычно защищают от магнитных полей, окружая их мю-металлом. Темновые токи ФЭУ составляют несколько нА и они не оказываются существенными по сравнению с величинами токов, которые ожидаются при испытании с мощностью 0.1 мкВт.
 34. Эти детекторы обсуждаются в гл.13 книги G.Knoll, *Radiation Detection and Measurement*.
 35. Rider, B.F., "Compilation of Fission Product Yields", NEDO-12154-3C, ENDF 322, 1981.
 36. Knoll, p.500.
 37. Основано на данных из статьи R.R.Finck, K.Liden, and R.B.R.Persson, "In Situ Measurements of Environmental Gamma Radiation by the Use of Ge(Li)-Spectrometer", *Nuclear Instruments and Methods*, Vol.135, (1976), p.559. Фоновую скорость счета на месте проведения эксперимента следовало бы проводить заранее, чтобы получить адекватное представление о радиоактивности местных пород. Рассеянный в комнате плутоний также приведет к появлению набора характеристических гамма-линий; гамма-линии продукта деления должны быть выбраны так, чтобы они оказались достаточно хорошо отделенными от плутониевых линий для разрешения в детекторе.
 38. Значения A_S и ϵ_S взяты, соответственно, из книги *Reversing the Arms Race* и статьи R.R.Finck, et al.