

АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ - МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ ДВЗЯИ ВО ВРЕМЯ ИНСПЕКЦИЙ НА МЕСТЕ

Ли Бин

Если на период действия ДВЗЯИ можно будет точно определить место подозрительного события, окажется возможным взять образцы различных продуктов деления при инспекции на месте. Такая процедура, при которой основное внимание уделяется анализу относительного содержания некоторых решающих для дела изотопов, может быть использована для определения момента ядерного взрыва с точностью до нескольких часов или менее, даже если измерения проводятся спустя несколько недель после события. Взятие образцов сможет также надежно отличить ядерный взрыв от выброса ядерных отходов.

Автор работает в Институте прикладной физики и вычислительной математики (Пекин). Работа была выполнена во время стажировки в Принстонском университете в качестве стипендиата фонда МакАртуров.

ВВЕДЕНИЕ

Верификация Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) будет осуществляться в двух направлениях: дистанционный международный мониторинг (ДММ) и инспекция на местах (ИНМ). ДММ будет основан на сети сейсмических станций, гидроакустической сети, сети слежения за радионуклидами и сети инфразвуковых детекторов. Было предложено также дополнить ДММ спутниковой наблюдательной сетью и сетью датчиков ЭМИ (электромагнитного импульса)¹. ДММ предназначен для обнаружения сигналов, вызываемых ядерными взрывами, которые проходят большие расстояния. Такая система может оказаться неспособной определить некоторые события, если полученные сигналы окажутся слишком слабыми. Поэтому может оказаться необходимым проводить добавочные инспекции поближе к местам событий, чтобы разрешить возникающие неопределенности.

Потенциальные нарушители ДВЗЯИ предпочли бы подземные ядерные испытания, поскольку их труднее обнаружить, чем взрывы в атмосфере или под водой. Если удастся определить точное положение подозрительного подземного события, можно взять образцы продуктов возможного взрыва путем бурения скважин на месте события. Существование продуктов деления может обеспечить решающее свидетельство ядерного взрыва. Но согласованные четыре сети ДММ могут определить место подозрительного события только с точностью в сотни кв. км². Эту площадь следует уменьшить некоторыми методами ИНМ.

В данной статье мы предполагаем, что положения подозрительных событий можно аккуратно измерить и поэтому возможно взятие образцов продуктов деления. Затем мы сосредоточим внимание на анализе продуктов деления, которые могли бы присутствовать в образцах, взятых при бурении скважин в подозрительном месте. В данной статье представлен метод определения момента исходного ядерного взрыва путем измерения относительного содержания изотопов из образцов. Основываясь на общей оценке момента взрыва, предлагаемая организация ДВЗЯИ могла бы судить, произошло ли (или не произошло) нарушение ДВЗЯИ. Этот метод мог бы также помочь отличить ядерный взрыв от свалки отходов ядерных реакторов.

ФИЗИКА ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

Делящаяся сердцевина ядерного устройства обычно содержит высокообогащенный уран U-235 или плутоний Pu-239. Иногда добавляются дейтерий и тритий для того, чтобы увеличить мощность взрыва. Генерируемые при дейтериево-тритиевом синтезе нейтроны имеют более высокую энергию (14 МэВ), чем большинство нейтронов, испускаемых при делении. Нейтроны синтеза могут даже вызвать деления в U-238, который также используется в ядерных устройствах. При ядерном взрыве примерно 80 поколений делений происходит за одну мкс,

так что можно считать, что все деления прошли в одно и то же время, если продукты деления измеряются неделями позже. С другой стороны, деление в ядерном реакторе происходит обычно в течение месяцев или годов работы реактора. Продукты деления поначалу состоят из свыше трехста изотопов сорока элементов, начиная от никеля и кончая эрбием. Почти все они радиоактивны и распадаются разными путями.

После того, как ядерное устройство взрывается под землей, огромное количество выделившейся энергии сжигает все оборудование и окружающий грунт, образуя сферическую полость. Ударная волна сминает и разбивает на части окружающие породы на расстояниях, в несколько раз превышающих радиус полости. По мере остывания полости на ее дне затвердевает смесь расплавленного грунта и материала остатков оружия. Температура кристаллизации большинства типов пород лежит в диапазоне 1000-1200 С³. Некоторые летучие элементы, например, благородные газы (криптон и ксенон) и элементы с низкой температурой плавления (йод, стронций и цезий) остаются вне расплавленных пород. По мере уменьшения температуры и давления в полости ее потолок начинает обваливаться. Обрушение лежащего сверху грунта образует засыпанную камнями трубу. При скрытном испытании следовало бы избежать образования воронки и выхода газов на поверхность почвы⁴.

Изотопы продуктов деления после подземного взрыва перемешаны неоднородно. Почти все продукты деления, относящиеся к элементам с высокой температурой плавления, заключены в остеклованную породу. Изотопы летучих элементов и те, у которых летучие родители, могут оказаться распределенными по всей трубе и поэтому их относительное содержание в остеклованной породе достаточно мало. Благородные газы и их дочерние элементы могут даже выходить из трубы по трещинам и разломам в окружающем грунте.

СОДЕРЖАНИЕ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ

Большинство изотопов среди продуктов деления обладают лишними нейтронами и это приводит к переходу к более стабильным изотопам посредством бета-излучения, сопровождаемого гамма-излучением. Некоторые изотопы, находящиеся в метастабильном состоянии, могут либо претерпевать переход к другим изотопам через бета-излучение, либо сбрасывать избыточную энергию путем внутренних переходов. Ни один из этих видов распада не изменяет распределение продуктов деления по массам. В типичном случае кривая распределения продуктов деления по массам имеет двугорбую (как у верблюда) форму: два пика и провал между ними при массовом числе около 115. В Табл.1 приведены некоторые изотопы из числа продуктов деления U-235, которые находятся вблизи пиков. Начальные выходы изотопов, расположенных вблизи двух пиков, мало зависят от делящегося вещества (U-235, Pu-239 или U-238) или от энергии нейтронов, вызывающих деление (см. Табл.2). Но

выходы изотопов в провале сильно зависят от этих переменных. Схемы распада некоторых изотопов приведены на Рис. 1.

Таблица 1: Начальное содержание некоторых изотопов в продуктах деления урана-235 под действием нейтронов деления.

Нелетучие изотопы							
Изотоп	Zr-95	Mo-99	Ru-103	Ce-141	Ce-144	Nd-147	
Выход(а)	6.299	6.015	3.650	5.718	4.872	2.168	
Ошибка	.3236	.3377	.5500	.2537	.2350	.1037	
Период(б)	64.0д	66.02ч	39.4д	32.5д	284д	11.0д	
Точка кипения, С	4377	4612	3900	3426	3426	3068	
Летучие изотопы							
Изотоп	Kr-89	Sr-89	Xe-133m	Xe-133	Xe-135	Xe-137	Cs-137
Выход	4.330	4.507	.1840	6.630	6.300	5.650	6.360
Ошибка	.2400	.3203	.0280	.9900	.9500	.3200	.6400
Период	3.18м	50.5д	2.19д	5.25д	9.01ч	3.82м	30.17л

а) Данные о содержании и ошибках (в процентах) взяты из сборника "Выходы продуктов деления" под редакцией Ванг Дао и др., Центр второго китайского министерства машиностроения, Пекин, февраль 1981 г.
б) Данные о периодах полураспада взяты из сборника "Справочник ядерных данных" под редакцией Ли Ксинтинг и др., Издательство по атомной энергии, Пекин, 1981 г. (л-лет, д-дней, ч-часов и м-минут).

Таблица 2: Начальное процентное содержание некоторых изотопов среди продуктов деления U-235, Pu-239 и U-238 нейтронами деления и нейтронами с энергией 14 МэВ. Данные взяты из сборника Ванг Дао "Выходы продуктов деления". Если в книге нет данных по конкретному изотопу, в таблице поставлен прочерк.

	Нейтроны деления			Нейтроны 14 МэВ		
	U-235	Pu-239	U-238	U-235	Pu-239	U-238
Zr-95	6.299	4.669	5.124	5.164	-	4.994
Mo-99	6.015	5.912	6.780	5.067	-	5.601
Ru-103	3.650	6.434	4.995	3.641	-	4.565
Ag-111	.03098	.4191	.07853	1.207	2.073	1.130
Cd-115	.02371	.08216	.03955	.8854	-	.6594
Ce-141	5.718	4.570	5.850	4.660	-	4.172
Ce-144	4.872	3.482	4.593	3.676	2.870	3.997
Nd-147	2.168	2.023	2.604	1.751	1.890	1.998

Содержание изотопа в момент времени t может быть описано дифференциальным уравнением (1):

$$\frac{dC_n}{dt} = -\lambda_n C_n + \lambda_{n-1} C_{n-1}$$

где n представляет n -ый изотоп в цепочке распада, $(n-1)$ представляет его предшественника; C_n и C_{n-1} - их содержание в момент времени t ; λ_n и λ_{n-1} - постоянные распада, которые равны $\ln 2$, деленному на их периоды полураспада. Уравнение описывает ситуацию, когда у нуклида имеется только одна ветвь распада. У некоторых метастабильных изотопов две ветви распада: бета-распад и внутренний переход. В этом случае в правую часть уравнения (1) надо добавить еще два члена.

Если решить дифференциальные уравнения типа (1) для изотопов в цепочке распада, получаем содержание любого изотопа в любое время (2):

$$C_n(t) = A_{n1} \exp(-\lambda_1 t) + A_{n2} \exp(-\lambda_2 t) + \dots + A_{nn} \exp(-\lambda_n t)$$

где коэффициенты $A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{nn}$ определяются начальными содержаниями изотопов в цепочке распада $C_1(0), C_2(0), \dots, C_n(0)$ и их постоянными распада $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$.

Содержания первых двух изотопов в цепочке распада даются выражениями (3):

$$C_1(t) = C_1(0) \exp(-\lambda_1 t)$$

$$C_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} C_1(0) \exp(-\lambda_1 t) + \frac{C_2(0)\lambda_2 - C_1(0)\lambda_1 - C_1(0)\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \exp(-\lambda_2 t)$$

Если мы знаем начальные содержания изотопов и их постоянные распада в данной цепочке, можно вычислить их содержания в любой момент времени. Этот факт

используется позднее в данной статье для проведения оценок момента деления по более поздним измерениям относительного содержания тех или иных изотопов.

Рисунок 1: Некоторые цепочки распада продуктов деления. Здесь приводятся типы распада, названия изотопов и периоды полураспада.

Kr-89	Бета	Rb-89	Бета	Sr-89	Бета	Y-89
3.18м	→	15.2м	→	50.5д	→	Стаб.
Zr-95	Бета	Nb-95	Бета	Mo-95		
64.0д	→	35.0д	→	Стаб.		
Mo-99	Бета	Tc-99	Бета	Ru-99		
66.02ч	→	2.1x10 ⁵ л	→	Стаб.		
Xe-133m	ВП	Xe-133	Бета	Cs-133		
2.19д	→	5.25д	→	Стаб.		
Xe-135m	ВП→	Xe-135	Бета	Cs-135	Бета	Ba-135
15.6м	(99%+)	9.01ч	→	3x10 ⁶ л	→	Стаб.
Xe-137	Бета	Cs-137	Бета	Ba-137		
3.82м	→	30.17л	→	Стаб.		
Ce-144	Бета	Pr-144	Бета	Nd-144		
284д	→	17.3м	→	Почти Стаб.		
Nd-147	Бета	Pm-147	Бета	Sm-147		
11.0д	→	2.623л	→	Почти Стаб.		

Радионуклид обычно имеет один или более пиков в энергетическом спектре своего гамма-излучения с характерной энергией и интенсивностью. Комбинированный гамма-спектр смеси продуктов деления может иметь много пиков, положения которых указывают на существование тех или иных изотопов, а интенсивности - на их относительные количества.

Каждая ветвь бета-распада имеет непрерывное распределение по энергии электронов с отсечкой при максимальной энергии. Бета-спектры большинства изотопов среди продуктов деления хорошо известны. Поэтому можно также оценить относительные количества изотопов продуктов деления путем измерения комбинированного бета-спектра. Параметры характеристических гамма- и бета-распадов некоторых изотопов приведены в Табл.3.

После того, как мы получим относительные количества двух радионуклидов из взятого образца путем измерения интенсивностей их характеристических излучений, можно будет при помощи уравнений (2) или (3) определить начальное время деления.

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ СОБЫТИЯ И МОМЕНТА ЕГО ПЯВЛЕНИЯ

Взятые с подозрительного места образцы можно анализировать разными способами. Первым делом следует изучить физические особенности образцов. Высокая температура при подземном ядерном взрыве приведет к образованию остеклованной породы на дне полости. Если произошел ядерный взрыв, мы смогли бы найти остеклованную породу при бурении. Хранилище для отходов от ядерных реакторов не обладает такой особенностью, которую можно использовать в качестве критерия для отождествления ядерного взрыва.

Второй шаг - измерение гамма- и бета излучения от образцов. Высокий уровень радиоактивности был бы сильной поддержкой допущения о наличии источника деления ядер.

Третьим шагом стала бы оценка наличия в образце тех или иных изотопов путем измерения интенсивностей характеристических линий. На основе описанных ранее принципов мы сможем определить также момент времени, когда произошло деление, если анализируемые изотопы распределены равномерно. Как уже упоминалось, содержание отдельных благородных газов, летучих элементов и их дочерних продуктов в остеклованной породе будет уменьшено. Следует избегать использования таких элементов для оценок момента времени, когда произошло деление.

Поэтому мы используем несколько критериев для

выбора изотопов, при помощи которых оценивается момент, когда произошло деление. Во-первых, отбираются изотопы с высокой температурой кипения для гарантирования их внедрения в остеклованную породу. Во-вторых, выбранные изотопы должны обладать высоким выходом среди продуктов деления. В-третьих, они не должны быть изотопами, которые уже присутствуют в природе и содержание доли которых от взрыва нельзя выяснить. В-четвертых, надо выбирать изотопы с подходящими периодами полураспада. Группы для инспекции на месте могут прибыть в подозреваемый район, обнаруженный средствами ДММ, в течение дней или недель. Поэтому надо иметь несколько изотопов с периодами полураспада порядка дней или недель для определения искомого момента времени. Нужны также некоторые изотопы с периодами полураспада порядка лет или более. Их содержание не изменяется значительно в течение дней или недель, и поэтому их можно использовать для калибровки измерений. Этим стандартам удовлетворяют изотопы из первой группы в Табл.1 (Zr-95, Mo-99, Ru-103, Ce-141, Ce-144 и Nd-147), а также часть их дочерних продуктов (Nb-95, Tc-99, Pm-147). Поэтому такие изотопы должны быть основными для проведения измерений⁵.

Таблица 3: Радиоактивное излучение некоторых продуктов деления^а.

Изотоп	Энергия γ -лучей, МэВ ^б (вероятность, %) ^в	Энергия β -частиц, МэВ ^б (вероятность, %)
Zr-95	0.724 (45%)	0.396 (55%)
	0.757 (100%)	0.360 (43%)
Nb-95	0.766 (100%)	0.160 (100%)
Mo-99	0.739 (12.6%)	1.21 (84%)
	0.140 (88.7%)	0.450 (14%)
Tc-99	0.0987	0.292
Ru-103	0.497 (6.29%)	0.225 (91%)
		0.117 (5.3%)
Ce-141	0.145	0.582 (91%)
		0.444 (70%)
Ce-144	2.186 (7%)	0.316 (76.7%)
	1.489 (3%)	0.160 (20%)
	0.696 (1.3%)	
	0.134 (11.1%)	
Nd-147	0.531 (12%)	0.810 (83%)
	0.319 (2%)	0.369 (15%)
	0.0911 (27.2%)	
Pm-147	0.1218	0.2245
Sr-89	0.908	1.448
Cs-137	Излучение слишком слабо для обнаружения	0.21
Cs-137	0.0322	0.5116 (94%) 1.176 (6%)

а) Данные взяты из "Справочника ядерных данных" Лю Ксинтинга и документа Управления технологических оценок Конгресса США "Мониторинг окружающей среды для ядерного контроля", ОТА-ВР-ISS-168, сентябрь 1995 г., стр.16.

б) Энергия гамма-квантов выражена в МэВ. Приведенные в таблице данные относятся к положению центра пика в энергетическом спектре. В скобках приведены относительные вероятности излучения данного типа при распаде. При этом некоторые ядра могут излучать два или более квантов. В этом случае сумма вероятностей не может превышать единицу.

в) Указана максимальная энергия данного типа бета-распада в МэВ. В скобках даны относительные вероятности разных типов, если их несколько.

Если точность измерения окажется недостаточной, образцы можно переправить в лабораторию для измерений на масс-спектрометрах, дающих значительно лучшую точность. Некоторые изотопы (например, Cs-135) обладают очень малым уровнем излучения для того, чтобы их можно было обнаружить. Поэтому для определения их содержания хорошую возможность обеспечивают спектрометры.

Определение момента времени, когда произошло деление, можно следующим образом использовать для верификации ДВЗЯИ.

Дискриминация ядерных взрывов

Деление в реакторе продолжается длительное время - от месяцев до нескольких лет. Изотопы с периодом

полураспада короче недель будут присутствовать в отходах в сильно уменьшенных количествах. Таким образом, если содержание короткоживущих изотопов во взятых образцах меньше того, что ожидается при ядерном взрыве, то взятые при бурении образцы могут относиться к захоронению реакторных отходов. Напротив, все деления при ядерном взрыве происходят практически в одно и то же время и это время можно вычислить путем измерения относительных содержаний разных пар изотопов. Каждое соотношение может дать оценку момента взрыва. Если все оценки времени взрыва, а также момент подозрительного события, зафиксированный средствами ДММ, совпадают друг с другом, можно считать подтвержденным, что событие является ядерным взрывом.

Решение о нарушении

Инспекционные группы могут также обнаружить площадки для подземных ядерных взрывов, проведенных до вступления в силу ДВЗЯИ. Определение момента взрыва может помочь организации ДВЗЯИ судить о том, произошло ли нарушение. Чтобы избежать раскрытия слишком большого объема секретной информации, интервалы измеряемой энергии бета- и гамма-излучения можно ограничить несколькими "окнами", где находятся характеристические пики конкретных изотопов.

ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ДЕЛЕНИЯ

Ошибка в измерении интенсивностей гамма-пиков зависит от уровня фона и полного числа отсчетов в детекторе. Такие ошибки можно оценить с некоторыми предположениями.

Предположим, что (1) мощность взрыва равно 1 кт, то-есть при взрыве произошло деление 57 г U-235; (2) взят образец весом 10 г из 1000 тонн остеклованной породы, содержащей радионуклиды; и (3) эффективность детектирования составляет 10%. Тогда скорость счета гамма-излучения от конкретного распада дается выражением (4):

$$D = \frac{57}{235} \times 6.023 \times 10^{23} \times \frac{10}{10^9} \times 10\% C(t) \lambda P = 1.46 \times 10^{14} C(t) \lambda P$$

где C(t) - содержание изотопа в момент времени t, даваемое уравнениями (2) или (3); λ - постоянная распада, P - вероятность излучения, соответствующая данной цепочке распада. Расчетные скорости счета гамма-лучей от изотопов Mo-99 и Tc-99 (с энергией 0.0987 МэВ) в разные моменты времени даны в Табл.4. Все необходимые параметры приведены в Табл.1 и 3, а также на Рис.1.

Если уровень фона В в 50 раз больше высоты чистого гамма-пика⁶, точность измерения интенсивности гамма-лучей равна (5):

$$\frac{\Delta C(t)}{C(t)} = \frac{\sqrt{2Bd}}{Dd} = \frac{\sqrt{2 \times 50 Dd}}{Dd} = \frac{10}{(Dd)^{1/2}}$$

где d - длительность каждого сеанса измерения гамма-излучения. Допустим, что каждое измерение занимает один час (d = 1 час). Вычисленные точности измерений для Mo-99 и Tc-99 в разные моменты времени приведены в Табл.4.

Содержание изотопов во взятом образце продуктов деления можно измерить также при помощи масс-спектрометра. Эти измерения займут больше времени и потребуют больших затрат, чем измерения радиоактивности, но они могут добиться очень высокой точности.

При вычислении момента времени, когда произошло деление, нам надо измерять относительные содержания, по крайней мере, одной пары изотопов из взятых образцов. Измеряемая пара может принадлежать одной цепочке распада. Например, можно измерять содержание Zr-95 и его дочернего изотопа Nb-95, Mo-99 и Tc-99, Nd-147 и Pm-147. Начальное содержание трех дочерних изотопов (Nb-95, Mo-99 и Pm-147) равно нулю и мы можем упростить уравнение (3) следующим образом:

$$C_1(t) = C_1(0) \exp(-\lambda_1 t)$$

$$C_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} C_1(0) [\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_1 t)]$$

Решив это уравнение, получим:

$$t = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \ln \left[1 + \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1} \frac{C_2(t)}{C_1(t)} \right]$$

Приращение t можно записать в виде:

$$dt = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \{1 - \exp[(\lambda_2 - \lambda_1)t]\} \left[\frac{dC_2(t)}{C_2(t)} - \frac{dC_1(t)}{C_1(t)} \right]$$

Консервативная оценка неопределенности в установлении момента t будет тогда выглядеть так (6):

$$dt \leq \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \{1 - \exp[(\lambda_2 - \lambda_1)t]\} \left[\frac{\Delta C_2(t)}{C_2(t)} + \frac{\Delta C_1(t)}{C_1(t)} \right]$$

где $\Delta C_1(t)/C_1(t)$ и $\Delta C_2(t)/C_2(t)$ - относительные ошибки измерения содержаний, выражаемые уравнением (5). Неопределенность расчетов в этом случае зависит от относительных ошибок измерения содержаний, времени измерений и постоянных распада.

Таблица 4: Неопределенности определения момента деления при измерении гамма-излучения Mo-99 и Tc-99.

T(дни)	1	7	14	21	28	70
$C_1(t)$	$4.7 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
$C_2(t)$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$5.8 \cdot 10^{-3}$	$6.0 \cdot 10^{-2}$	$6.0 \cdot 10^{-2}$	$6.0 \cdot 10^{-2}$
$D_1(t)$	$6.4 \cdot 10^{10}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	$2.4 \cdot 10^9$	$4.1 \cdot 10^8$	$7.1 \cdot 10^7$	1.789
$D_2(t)$	723	2690	3152	3231	3244	3246
$\Delta C_1/C_1$	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$4.9 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.236
$\Delta C_2/C_2$	0.372	0.193	0.178	0.176	0.176	0.176
Δt , час	7.89	15.22	16.49	16.72	16.82	39.23

Примечание: Обратите внимание, что t - это промежуток времени между ядерным делением и измерением гамма-излучения; $C(t)$ - содержание Mo-99 в момент t ; C - содержание Tc-99 в момент t ; D - скорость счета (в час) гамма-излучения Mo-99 с энергией 0,14 МэВ в момент t ; D - скорость счета (в час) гамма-излучения Tc-99 с энергией 0,0987 МэВ в момент t ; $DC(t)/C(t)$ - неопределенность определения содержания Mo-99 в момент t ; $DC(t)/C(t)$ - неопределенность определения содержания Tc-99 в момент t ; Dt - неопределенность в определении момента времени, когда произошло деление, путем измерения содержания Mo-99 и Tc-99. При расчетах принято, что длительность измерения равна одному часу. Выражение E-2, например, соответствует 10 и т.п.

Для пары изотопов из разных цепочек распада неопределенности начальных содержаний также могут дать некоторый вклад в конечные результаты. Если два измеряемых изотопа a и b являются первыми в своих цепочках распада, отношение их содержаний равно

$$\frac{C_a(t)}{C_b(t)} = \frac{C_a(0)}{C_b(0)} \exp[(\lambda_b - \lambda_a)t]$$

и отсюда можно вывести время t :

$$t = \frac{1}{\lambda_a - \lambda_b} \ln \left[\frac{C_a(0) C_b(t)}{C_b(0) C_a(t)} \right]$$

а также его приращение

$$dt = \frac{1}{\lambda_a - \lambda_b} \left[\frac{dC_a(0)}{C_a(0)} - \frac{dC_b(0)}{C_b(0)} + \frac{dC_a(t)}{C_a(t)} - \frac{dC_b(t)}{C_b(t)} \right]$$

так что временную неопределенность в данном случае можно оценить в виде (7):

$$\Delta t \leq \frac{1}{|\lambda_a - \lambda_b|} \left[\frac{\Delta C_a(0)}{C_a(0)} + \frac{\Delta C_b(0)}{C_b(0)} + \frac{\Delta C_a(t)}{C_a(t)} + \frac{\Delta C_b(t)}{C_b(t)} \right]$$

где $\Delta C_a(t)/C_a(t)$ и $\Delta C_b(t)/C_b(t)$ - ошибки измерения содержаний, даваемые уравнением (5), а $\Delta C_a(0)/C_a(0)$ и $\Delta C_b(0)/C_b(0)$ - относительные неопределенности начальных содержаний.

Существуют два источника неопределенностей начальных содержаний. Приведенные в таблицах начальные значения сами обладают некоторыми ошибками в пределах 5-15% (см. Табл.1). Второй источник ошибок в том, что мы не знаем конфигурацию делящегося вещества и энергию падающих нейтронов, которая может изменить начальное содержание изотопов в группе 1 (Табл.2) на 10-25%. Таким образом, максимальная совместная неопределенность начальных выходов равна 40%.

Из уравнений (6) и (7) можно вычислить неопределенности в установлении момента времени, когда произошло деление, по измерению интенсивности гамма-распада продуктов деления. Все необходимые параметры приведены в Табл.1 и 3, а также на Рис.1. В Табл.4 и 5 даются результаты для разных случаев.

Таблица 5: Неопределенности в определении момента времени, когда произошло деление.

t (сутки)	1	7	14	21	28	70
Измеряемые изотопы	Δt (сутки)					
Zr-95/Nb-95	0.03	0.114	0.198	0.287	0.383	1.24
Mo-95/Tc-95	7.89	15.22	16.49	16.72	16.82	39.23
Nd-147/Pm-147	0.104	0.287	0.411	0.510	0.603	1.49
Mo-99/Nd-147	102	102	102	102	102	132
Ce-141/Ce-144	461	461	461	461	461	461

Примечание: Обратите внимание, что t - время между моментом, когда произошло деление, и моментом измерения; Dt - неточность определения времени при измерении гамма-излучения. Относительная вероятность гамма-перехода выбрана при этих расчетах максимально высокой для каждого распада. Предполагается, что измерение длится один час.

Наибольшая неопределенность в Табл.5 составляет 461 час (19 дней). Поэтому в целях верификации ДВЗЯИ все неопределенности, приведенные в Табл.5, подходят для определения момента ядерного взрыва. Если сравнивать результаты измерений с разными парами изотопов, можно получить даже еще меньшие неопределенности.

ВЗЯТИЕ ОБРАЗЦОВ ВОЗДУХА И ГРУНТА ПРИ ИНСПЕКЦИЯХ НА МЕСТЕ

Группой экспертов по радионуклидам было предложено специальному комитету рабочей группы по верификации ДВЗЯИ создать глобальную сеть детекторов радионуклидов для ДММ, чтобы следить за пылинками с радионуклидами. Некоторыми экспертами из этой группы рассматривается также глобальный мониторинг за благородными газами.

Благородные газы и пылинки со следами радионуклидов, возникающие от ядерных взрывов, обладали бы большими плотностями на испытательных полигонах. Часть благородных газов может выйти из трубы взрыва в атмосферу через системы вентиляции или через трещины и разломы в окружающих породах, возникшие в результате взрыва. Примерами служат Kr-89, Xe-133, Xe-133m (метастабильный Xe-133), Xe-135 и Xe-137. Обнаружение этих благородных газов могло бы помочь засечь место возникновения события. Ряд дочерних изотопов этих благородных газов тоже радиоактивны, например, Sr-89, Cs-135 и Cs-137. Они будут оставаться вблизи полигона, поскольку их "родители" имеют короткое время жизни и не могут уйти слишком далеко. Инспекционная группа могла бы проследить за событием, детектируя Sr-89, Cs-135 и Cs-137.

Некоторые изотопы, активируемые нейтронами, и их дочерние продукты (например, C-14 или Ag-37) могут также иметь более высокое содержание на испытатель-

ном полигоне. Обнаружение этих изотопов можно было бы рассматривать как метод для установления места проведения подземного взрыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ продуктов деления в образцах, взятых при бурении, может надежно определить время, когда были произведены ядерные взрывы. Его можно применять также для того, чтобы отличить ядерные взрывы от свалки реакторных отходов. Обнаружение отдельных радионуклидов может помочь определить место ядерных взрывов.

Чтобы этот метод заработал, надо прежде всего точно указать место подозреваемого события. Эта трудность остается.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит профессора Ду Сяньваня из Китайской академии инженерной физики, профессора Фрэнка фон Хиппеля, д-ра Хала Фейвесона и д-ра Сьюзен Джоунс за комментарии и предложения по улучшению работы.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. "Comprehensive Test Ban Treaty: Now or Never - A Report of the 1995 Conference on Disarmament Negotiations", ACRONYM No.8, October 1995).
2. Смотрите доклад группы экспертов по дополнительным сейсмическим станциям (8 декабря 1995 г.), доклад группы экспертов по инфразвуку (15 декабря 1995 г.), доклад группы экспертов по гидроакустике (8 декабря 1995 г.) и доклад группы экспертов по радионуклидам (15 декабря 1995 г.). Эти экспертные группы организованы специальным комитетом рабочей группы по верификации ДВЗЯИ, базирующейся в Женеве.
3. Toulouskian, Y.S., et al., eds., "Physical Properties of Rocks and Minerals", (McGraw-Hill Book Company, 1981), p.382.
4. Детали процесса и влияние подземных ядерных испытаний разбираются в книге Jozef Goldblat and David Cox, eds., "Nuclear Weapon Tests: Prohibition or Limitations?", (Oxford University Press, 1988), pp.75-91.
5. У молибдена имеется летучий оксид MoO_3 с температурой кипения 1155 °C; летуч оксид рутения RuO_4 с температурой кипения 40 °C (см. David R.Lide et al., eds., "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 76th

Edition, CRC Press 1995-1996, pp.4-72, 4-81). В соответствии с расчетами Р.А.Лопентца (см. "Status of Valiation of the Corsor Computer Code Used for the Accident Source Term Reassessment Study" in T.S. Kress Compiled, "Review of the Status of Valiation of the Computer Codes Used in the Severe Accident Source Term Reassessment Study, Oak Ridge National Laboratory, 1985, pp.286,301) одна пятая миллионной доли рутения выделяется в воздух каждую минуту при температуре 1200 °C; при той же температуре темпы выделения молибдена еще даже ниже. Поэтому при оценке их содержания среди продуктов взрыва можно игнорировать потери рутения и молибдена из остеклованной породы, связанные с уходом их летучих оксидов.

6. В соответствии с текстом ДВЗЯИ через несколько недель после проведения подозрительного события будут братья твердые образцы при бурении. На это время твердые изотопы, у которых еще осталось сильное гамма-излучение, должны удовлетворять трем следующим требованиям: (1) начальный выход их цепочки распада должен превышать 1%; (2) период полураспада этого или родительского изотопа должен превышать несколько дней, чтобы количество изотопа не уменьшилось слишком сильно; (3) период полураспада изотопа должен быть короче нескольких лет, чтобы иметь хорошую скорость распада. Девять изотопов удовлетворяют указанным выше стандартам (это Zr-95, Nb-95, Mo-99, Ru-103, Ce-141, Ce-144, Nd-147, Sr-89 и Pm-147, см. Табл.1 и Рис.1). У них имеется всего 17 гамма-пиков с вероятностью излучения выше 1% (см. Табл.3). Ширина каждого из этих пиков превышает 1 кэВ - типичное значение для энергетического разрешения германиевого детектора при МэВ-ных энергиях. См. Robert Mozley and Oleg F. Prilutsky, "Radiation Detectors and Backgrounds", in Frank von Hippel and Roald Z. Sagdeev, eds., Reversing the Arms Race, (Gordon & Breach Science Publishers, New York, 1990). Так что все эти пички можно разделить германиевым детектором. (См. "Methods of Nuclear Experiment", Fudan Univ. edited, p.186). В предположении, что интенсивности всех 17 пиков сравнимы, отношение интенсивности в пиках к созданному всеми пичками комптоновскому плато составит примерно $40/17 = 2.4$. Если рассмотреть случай, когда вероятности излучения отдельных изотопов может оказаться в 100 раз меньше, чем у остальных (то-есть, 1% вместо 100%, см. Табл.3), отношение пика к общему комптоновскому фону должно превышать 0.02.
7. См. [2].