

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ АУТЕНТИФИКАЦИИ БОЕГОЛОВОК С АТТРИБУТАМИ: ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ

Малте Геттше и Гералд Кирхнер

Представлен обзор различных методов измерений, применимых в контексте подхода атрибутов для идентификации боеголовок, для демонстрации текущих возможностей и недостатков. По этой причине будут рассмотрены их технические преимущества и ограничения, в особенности в аспекте верного определения характеристик позиции, конфигурация которой известна инспектирующей стороне не в полном объеме. Обсуждаются пассивные и активные измерения для оценки наличия делящихся материалов, изотопный состав и масса делящегося плутония и урана.

Малте Геттше и Гералд Кирхнер работают в Центре исследований науки и мира имени Карла Фридриха фон Вайцзеккера Гамбургского университета, Гамбург, Германия.

Почтовый адрес для корреспонденции: Malte Götttsche, Carl Friedrich von Weizsäcker-Centre for Science and Peace Research, University of Hamburg, Hamburg, 20144 Germany.

Адрес электронной почты: malte.goettsche@physik.uni-hamburg.de

Статья получена 4 октября 2013 года и принята к публикации 14 апреля 2014 года.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время верификация контроля над ядерными вооружениями сводится к верификации средств доставки. Так, например, предусмотрено в новом Договоре по сокращению стратегических наступательных вооружений между Россией и Соединенными Штатами¹. Боеголовки подсчитываются опосредованно через средства доставки, с которыми они связаны. В отношении долгосрочного будущего контроля над ядерными вооружениями и ядерного разоружения представляется, что существует достаточно широко распространенное мнение о том, что верификация должна будет стать более интрузивной, и что жизненно важную роль в таком подходе должна будет сыграть прямая верификация боеголовок, как развернутых, так и не развернутых. Сценарии, в которых может потребоваться верификация боеголовок (и компонентов боеголовок)², включая в себя декларации запасов боеголовок и компонентов, или процесс демонтажа, в котором боеголовки разбираются на свои компоненты; верификация, относящаяся к обеим направлениям, может быть основана на Договоре о нераспространении (обязательства по демонтажу по Статье VI) или на других двусторонних или многосторонних режимах контроля над вооружениями или разоружения, примеры которых могут включать будущий режим для Соединенных Штатов и России, или региональные режимы, например, на Ближнем Востоке.

Частью такого режима верификации может стать аутентификация боеголовки. В данном контексте аутентификация представляет собой процесс во время инспекции на месте, в течение которого проводятся измерения, показывающие, является ли конкретное изделие ядерной боеголовкой (или ее компонентом). Государства, декларирующие свои ядерные арсеналы, скорее всего не разрешат инспекции, которые раскрывают информацию о конструкции боеголовки, как если инспектор принадлежит к государству, обладающему ядерным оружием, так и если инспектор принадлежит к государству, не имеющему ядерного оружия, будь то по соображениям нераспространения или национальной безопасности, или по другим причинам. Предполагая вероятный сценарий, в котором верификационные мероприятия определяются совместным способом, взаимное соглашение по процессу аутентификации боеголовок может быть достигнуто только тогда, когда государства, обладающие ядерным оружием, будут уверены в том, что информация о конструкции их боеголовки не будет подвергаться риску. Инспектирующая сторона, интересы которой состоят в достижении максимальной уверенности в истинной природе заявленной боеголовки, вероятно, предпочтет довольно интрузивные и всеобъемлющие меры аутентификации. Цель состоит в создании системы аутентификации боеголовок, которая будет способна обеспечить уверенность, одновременно предотвращая недопустимые уровни вмешательства, которые могли

бы раскрыть информацию, которую не желает разделять инспектируемая сторона. Интуитивно кажется, что такие требования несколько противоречивы.

Решение может заключаться в том, чтобы проводить потенциально интрузивные измерения, содержащие чувствительную информацию, но такая измерительная информация должна будет автоматически обрабатываться с помощью определенного алгоритма, так чтобы инспектор мог видеть только выходные данные не чувствительного характера (например, зеленый или красный световой сигнал, означающий «указанная боеголовка» или «не указанная боеголовка»; возможны также другие варианты вывода). Предотвращение утечки чувствительной информации будет задачей так называемого информационного барьера. Главные требования к такой системе аутентификации таковы, что: (а) автоматическое измерение и анализ должны функционировать удовлетворительным образом, чтобы было получено наилучшее возможное указание аутентичности, и (б) не должно быть раскрыто никакой чувствительной информации. Требование (а) служит интересам как принимающей стороны, так и инспектора, поскольку открытая принимающая сторона заинтересована в том, чтобы получить признание демонтажа истинной боеголовки и предотвращение ложной тревоги, в то время как инспекторы заинтересованы в том, чтобы убедиться в том, что его не обманывают. Поэтому в идеальном случае система должна будет принимать все указанные боеголовки и отвергать все прочие позиции, проявляя малые вероятности ложных положительных и ложных отрицательных ответов. Требование (б) очевидно служит интересам принимающей стороны, но также и интересам инспектора, поскольку все стороны должны будут соблюдать Статьи I и II Договора о нераспространении³. Это накладывает ограничения на возможные варианты выводимой информации, и возможно также на допустимые измерения и методы анализа. Поэтому системы аутентификации должны быть спроектированы таким образом, чтобы и принимающая сторона, и инспектор, должны быть уверены в том, что принимающая сторона не обеспечила встроенную возможность манипуляции результатами измерений, а инспектор не обеспечил встроенную возможность получения доступа к чувствительной информации. Можно рассмотреть и приветствовать некоторые правдоподобные концепции процесса обработки информации, в частности, подход шаблона⁴, но данная статья будет направлена на подход атрибутов. В такой концепции инспектируемая сторона должна будет декларировать атрибуты, которые характеризуют боеголовку, которая будет аутентифицироваться, и которые не содержат чувствительной информации. Для надежной аутентификации атрибуты должны будут выбираться таким образом, чтобы минимизировать возможность обмана, так, чтобы другие изделия, которые не являются боеголовками, не удовлетворяли атрибутам, и, напротив, аутентифицированные боеголовки удовлетворяли им. Атрибуты могут быть качественными (например, наличие делящегося материала), или количественными (например, минимальные пороговые значения массы).

Назначение данной статьи состоит в том, чтобы предоставить обзор различных методов измерений, применимых в контексте подхода атрибутов, и оценить предлагаемые ими технические преимущества и недостатки, в частности, в терминах корректной характеристики изделия, конфигурация которого недостаточно точно известна инспектирующей стороне. Статья основана на обзоре существующих публикаций, дополненных некоторыми результатами исследований авторов. Такие методы ядерных измерений будут хорошо приспособлены к верификации сигнатур компонента боеголовки с делящимся материалом. Неядерные методы измерения могут оказаться применимыми к определению атрибутов, как это обсуждалось Кузесом и Джилхудом⁵; в данной статье, тем не менее, будут рассматриваться измерения нейтронов и гамма-лучей. Кроме того, недавно были разработаны методы построения изображения в нейтронах, которые могут играть некоторую роль; они также не включены в данную статью⁶.

Пограничные технические соображения

В большинстве ситуаций, в которых характеризуются радиоактивные образцы, определенная информация известна еще до измерений. Могут быть известны геометрия и другие свойства, по крайней мере приближенно. Методы количественного анализа могут опираться на калибровку детектора по представительным стандартам. Это не применимо к аутентификации боеголовки (компонента). Информация по конструкции боеголовки (компонента) доступна не будет, особенно в том случае, когда инспектор будет из страны, не обладающей ядерным оружием. Это поднимает проблему того, что спроектированная система должна будет аутентифицировать изделие, конфигурация которого, такая, как геометрия, в основном останется неизвестной. По этой причине авторы предлагают, что оптимальная измерительная система должна быть выбрана таким образом, чтобы она не зависела от калибровки на материалах, представительных для боеголовки или компонента, и что должно быть сделано минимальное количество предположений, относящихся к природе изделия.

Частью данной проблемы является потенциально неизвестная защита. В случае полностью собранных боеголовок защита может обеспечиваться материалом, окружающим делящийся компонент, или самопоглощением в самом делящимся материале. Кроме того, большая часть ядерных боеголовок по соображениям безопасности хранится в контейнерах, которые действуют как дополнительная защита. Компоненты боеголовок также могут храниться в контейнерах, которые действуют в качестве защиты. Существует много таких контейнеров. Двумя примерами являются контейнеры АТ-400 и 9975, которые могут использоваться для компонентов^{7,8}. Контейнер АТ-400 в основном состоит из двух оболочек из нержавеющей стали (толщиной 0,1 см и 0,2 см), разделенных слоем полиуретана (7,0 см). В нем располагается защитная оболочка – цилиндр из нержавеющей стали толщиной 0,6 см⁹. Контейнер 9975 состоит из внешней оболочки из нержавеющей стали толщиной 0,1 см, оболочки из материала Celotex® толщиной 11,7 см и свинцовой защиты толщиной 1,6 см¹⁰.

Такие вопросы могут повлиять на измерения, и, следовательно на конечный результат анализа атрибутов. Необходимо признавать, что обеспечение положительного исхода аутентификации служит интересам инспектируемой страны. Если влияние конфигурации будет настолько сильным, что полученные результаты не позволят сделать окончательный вывод, то в интересах инспектируемой страны будет предложить альтернативный метод, или декларировать защиту инспектирующей стране. Кроме того, желательно (и, может быть, даже существенно важно) использовать методы измерений, в функциональности которых уверена инспектирующая сторона, несмотря на уверения инспектируемой стороны.

Насколько известно авторам, до сих пор большая часть технических исследований была направлена на разработку методов измерений, которые не раскрывают конструктивных особенностей боеголовки, когда они применяются вместе с информационным барьером. Было обнаружено, что следует провести больше исследований для изучения предлагаемых методов в аспекте возможных требований инспектирующей стороны.

Замечания об атрибутах

В Соединенных Штатах предлагался набор различных атрибутов, нередко они предлагались вместе с российскими специалистами. Перечень атрибутов со временем изменялся и дополнялся. Хотя в начале работ атрибуты относились только к плутонию, что является технически намного более легкой задачей аутентификации, затем было проведено много исследований по измерениям атрибутов урана. Перечень предложенных атрибутов приведен в таблице 1.¹¹⁻¹⁴ Все атрибуты выбирались так, чтобы выдавался двоичный ответ (да или нет); некоторые атрибуты имели качественную природу, в то время как другие устанавливали количественные пороговые значения. Преимущество пороговых значений заключается в том, что они не требуют декларации реальных значений, которые могут быть чувствительными. Тем не менее, пороговые не должны отличаться от реальных значений в такой степени, чтобы они перестали подходить для эксклюзивного описания боеголовок; в таком случае аутентификация по атрибутам потеряет смысл. Атрибуты не обязательно должны ограничиваться пороговыми значениями и двоичными ответами, однако все предложенные до сих пор атрибуты относились к этим двум категориям.

Таблица 1. Атрибуты, предложенные в различных инициативах. AVNG относится к верификации атрибутов нейтронами и гамма-лучами, FM TTD – к демонстрации технологии прозрачности делящихся материалов, 3G-AMS – к системе измерения атрибутов третьего поколения.

Наличие плутония	Трехсторонняя инициатива, AVNG, FM TTD, 3G-AMS
Отношение плутония-240 к плутонию-239	Трехсторонняя инициатива, AVNG, FM TTD, 3G-AMS
Пороговое значение массы плутония	Трехсторонняя инициатива, AVNG, FM TTD, 3G-AMS
Возраст плутония	FM TTD
Отсутствие оксида	FM TTD
Симметрия	FM TTD
Наличие урана-235	3G-AMS
Обогащение урана	3G-AMS
Масса урана-235	3G-AMS
Масса взрывчатого вещества	3G-AMS

Хотя выбор некоторых атрибутов является интуитивным, но, тем не менее, могут быть выбраны и не-

сколько атрибутов. В опубликованной литературе мало сведений о том, почему были выбраны конкретные атрибуты, но можно полагать, что атрибуты выбирались так, чтобы они могли быть успешно измерены (по крайней мере теоретически) с учетом геометрии и свойств защиты. Для одного теоретического примера укажем, что пороговое значение массы плутония в по крайней мере одной инициативе полагалось равным 500 г¹⁵. Это значение могло быть выбрано таким, чтобы измерение аутентифицируемых боеголовок давало бы массу, большую 500 г, позволяя учитывать возможную необъявленную защиту, которая делала бы результат измерений меньшим, чем реально присутствующая масса делящегося вещества. Уменьшение зависимости измерений от геометрии и защиты могло бы позволить применить более значимые пороговые значения атрибутов, как можно более близкие к реальным значениям, так, чтобы уровень доверия, достигаемый такой системой, был бы выше.

МЕТОДЫ ЯДЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В то время как рассматривался весь набор различных атрибутов (таблица 1), здесь будут обсуждаться методы ядерных измерений, относящиеся к оценке шести атрибутов, а именно, наличие, изотопный состав, и масса делящегося материала для плутония и урана. Данные атрибуты можно рассматривать как весьма существенные для успешной аутентификации. Основные методы ядерных измерений, которые обсуждались до сих пор, будут представлены без обязательного стремления к полноте. Обзор анализов приводится в таблице 2; подробности можно найти в данном разделе. Включены также некоторые новые методы, которые находятся на ранней стадии исследований, и способные проявить свой будущий потенциал.

Если аутентифицируемое изделие является полностью собранной боеголовкой или компонентом боеголовки, то оценка атрибута относится к свойствам компонента с делящимся материалом (или «первичного» компонента в случае термоядерных боеголовок). Будет представлен только набор атрибутов, которые могут быть оценены определенным методом. Другие атрибуты, которые могут быть оценены тем же самым методом, не будут подробно обсуждаться, если будет обнаружено, что такие атрибуты могут быть более легко оценены с помощью другого метода.

Пассивные измерения гамма-лучей

Измерения гамма-лучей могут быть использованы для определения присутствия и изотопного состава плутониевых боеголовок, но только в случае минимальной защиты, и, возможно, также для урановых боеголовок. В случае плутония этот метод может быть применен для оценки минимальной массы.

Наличие плутония и изотопный состав.

У плутония-239 имеется много гамма-линий, но у плутония-240 их значительно меньше. Энергии значительных линий равны 104,2 кэВ, 160,3 кэВ и 642,4 кэВ¹⁶. Во всех этих случаях линии плутония-239 располагаются рядом (например, 103,0 кэВ; 160,2 кэВ, 161,5 кэВ; 640,0 кэВ, 645,9 кэВ). Это полезно для анализа, поскольку зависящие от энергии эффективности и самопоглощение перестают быть проблемой, но на практике даже при использовании детекторов из германия высокой чистоты (HPGe) потребуются разделение близко расположенных пиков. В последующем обсуждении из-за требования высокого разрешения предполагается использование детекторов из германия высокой чистоты (HPGe). В случае оценки спектра «старого» плутония следует также учитывать накопление америция-241, образующегося при распаде плутония-241, например, линию с энергией 641,5 кэВ.

Определение атрибута. Наличие плутония (в частности, плутония-239) может быть определено с учетом суммы линий плутония.

Изотопный состав может быть определен из анализа области линии 640 кэВ, где может быть разрешен триплет линий плутония-239, плутония-240 и америция-241. Данную область спектра можно увидеть на рисунке 1, где показано измерение, выполненное в лаборатории PERLA в Совместном исследовательском центре в Испра на образце металлического плутония оружейного качества под названием «PM1» (масса плутония 12,5 грамма) за свинцовой защитой толщиной 2 мм¹⁷. В дату измерения основными присутствующими изотопами были плутоний-239 (95,4 процента), плутоний-240 (4,5 процента), уран-235 (0,1 процента) и америций-241 (0,02 процента). Наблюдается триплет и другие требуемые для анализа пики, даже несмотря на то, что скорости счета были низкими из-за малой массы образца.

Таблица 2. Не исчерпывающая выборка методов измерений, возможно подходящих для определения обсуждаемых в статье атрибутов. Перечислены преимущества и ограничения конкретных методов.

Атрибут	Метод измерения	Преимущества	Недостатки	
Наличие плутония	Гамма-спектрометрия	Не уязвим к небольшой внешней защите	Уязвим к значительной внешней защите	
			Требует однородного изотопного состава	
Изотопный состав плутония	Гамма-спектрометрия	Не уязвим к небольшой внешней защите	Уязвим к значительной внешней защите	
			Требует однородного изотопного состава	
Масса плутония	Пассивное измерение множественности нейтронов при известном изотопном составе	Калибровка без представительных стандартов	Несколько уязвим к внешней защите	
			Несколько уязвим к внешней защите	
	Измерения кросс-корреляции сцинтилляционным детектором при известном изотопном составе	Калибровка требует представительных стандартов		
Наличие урана	Гамма-спектрометрия		Физические ограничения из-за самопоглощения	
			Небольшая защита мешает анализу	
Обогащение урана	Активные измерения множественности нейтронов	Не уязвим к умеренной внешней защите		
			Не уязвим к умеренной внешней защите	
	Активные измерения кросс-корреляции и времени пролета сцинтилляционным детектором	Гамма-спектрометрия		Небольшая защита мешает анализу. Низкая активность протактиния-234m
				Несколько уязвим к внешней защите
Активные измерения множественности нейтронов		Небольшая защита не препятствует анализу	Может потребоваться калибровка с представительными стандартами из-за взаимодействия источника и образца	
			Точность тройных событий ограничена	
Масса урана	Активные измерения кросс-корреляции и времени пролета сцинтилляционным детектором	Небольшая защита не препятствует анализу	Несколько уязвим к внешней защите	
			Может потребоваться калибровка с представительными стандартами из-за взаимодействия источника и образца	
	Активные измерения множественности нейтронов		Небольшая защита не препятствует анализу	Несколько уязвим к внешней защите
				Может потребоваться калибровка с представительными стандартами из-за взаимодействия источника и образца
Активные измерения кросс-корреляции и времени пролета сцинтилляционным детектором		Небольшая защита не препятствует анализу	Точность тройных событий ограничена	
			Несколько уязвим к внешней защите	
			Может потребоваться калибровка с представительными стандартами из-за взаимодействия источника и образца	

Для анализа этой области было разработано несколько программ в соответствии с рассмотренной выше процедурой. В Соединенных Штатах была разработана программа Pu600 как часть совместного проекта по измерению атрибутов между Россией и Соединенными Штатами¹⁸. Метод был реализован в последующих инициативах, например в демонстрации технологии прозрачности делящихся материалов (FMSTD)¹⁹ как части проекта системы измерения атрибутов следующего поколения (NG-AMS); этот метод рассматривается также для

системы измерения атрибутов третьего поколения (3G-AMS)^{20,21}. Совсем недавно этот метод анализа был реализован и испытан в информационном барьере, разработанном в Великобритании и Норвегии. Британско-норвежская программа, так же как и программа Pu600, показали довольно удовлетворительные результаты, хотя и наблюдалось некоторое смещение²².

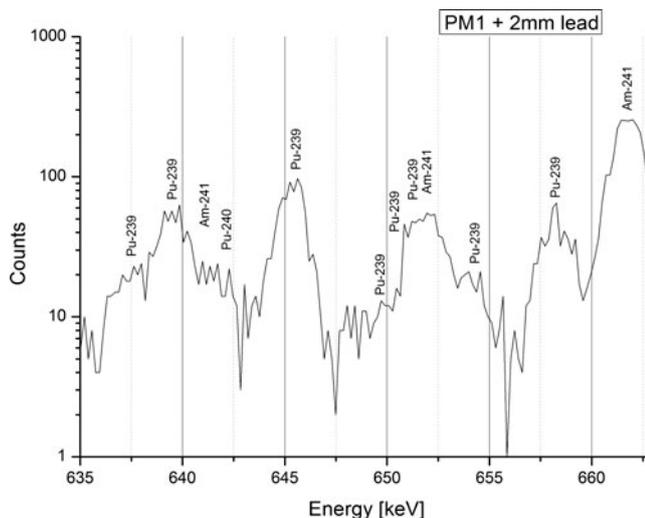


Рисунок 1. Спектр гамма-излучения образца PM1. На вертикальной оси отложено число отсчетов, на горизонтальной оси показана энергия в кэВ. Измерение проводилось со свинцовой защитой толщиной в 2 мм между образцом и детектором. Теоретически должны присутствовать указанные пики от плутония и америция, хотя видны только некоторые из них.

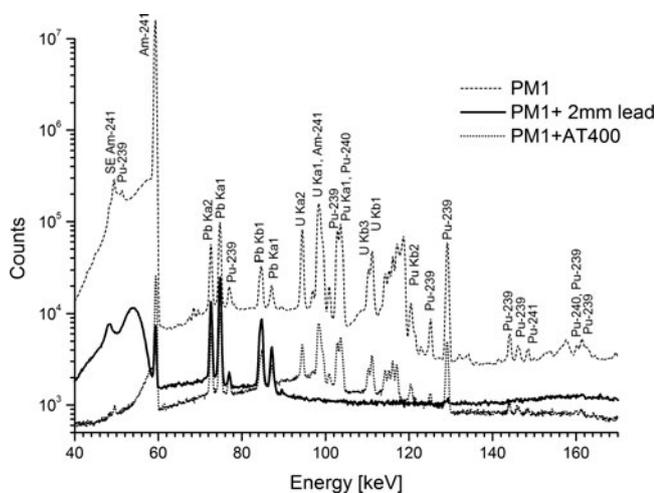


Рисунок 2. Спектр гамма-излучения образца PM1 из металлического плутония. На вертикальной оси отложено число отсчетов, на горизонтальной оси показана энергия в кэВ. Одно измерение проводилось без защиты, в другом измерении между образцом и детектором была помещена свинцовая пластина толщиной 2мм, в третьем измерении образец был помещен внутри контейнера AT400. Отмечены характеристические пики рентгеновского излучения ($K\alpha$ и $K\beta$ обозначены как $K\alpha$ и $K\beta$) от свинца, размещенного вокруг детектора, урана и плутония, пик от рентгеновской флуоресценции в кристалле детектора (SE от америция-241) и характерные гамма-линии.

Обсуждение. Защита от гамма-лучей может стать проблемой, в особенности при энергиях ниже 200 кэВ, как можно увидеть из измерений в Совместном исследовательском центре (смотрите рисунок 2). Таблица 3 показывает, что для сильного поглощения фотонов с энергией 150 кэВ требуется довольно малая толщина свинца. В то время как пики, относящиеся к свинцу, могут быть легко идентифицированы (и присутствует один пик америция-241), в области энергий до 170 кэВ нельзя легко отождествить ни пики плутония-239, ни пики

плутония-240. Без свинцовой защиты эти пики становятся видимыми. На рисунке 2 также показаны результаты измерений с контейнером АТ400. В этом измерении детектор находился дальше от образца, чем в двух предыдущих измерениях. Длительность двух предыдущих измерений равнялась 200 сек, а для измерения в контейнере АТ400 она составляла 12 000 сек. В измерении в контейнере АТ400 довольно легко можно отождествить некоторые из пиков плутония. Поскольку этот контейнер предназначен для хранения компонентов оружия, в этой области энергий в сценарии верификации можно будет определить изотопный состав. Однако, минимальная дополнительная защита может затруднить такой анализ. Следует отметить также, что измерения проводились без защитной оболочки, которая может составлять дополнительную защиту.

Таблица 3. Толщины слоев половинного ослабления (в которых поглощается 50 процентов излучения) из металлического свинца, урана и плутония для фотонов различных энергий (в миллиметрах).

	Свинец	Уран	Плутоний
150 кэВ	0,3	0,1	0,1
600 кэВ	5,2	2,6	2,4
4 МэВ	14,7	8,3	7,9

Влияние защиты становится намного меньшим при энергии более 600 кэВ, см. таблицу 3²³. Измерение источника РМ1 без свинцовой защиты приводит к результатам, похожим на представленные на рисунке 1, хотя свинец уменьшает скорость счета. То же самое справедливо для контейнера АТ400. Поэтому измерения в этой области энергий более предпочтительны, поскольку оценки будут меньше зависеть от внешних факторов, таких, как защита, о которых инспектирующая сторона может и не знать.

Потенциальная проблема заключается в том, что гамма-излучение из внутренних областей делящегося материала заметно поглощается до выхода на поверхность, так что оценка изотопного состава не даст среднего изотопного состава по объему, а скорее по поверхностной части этого объема. Эта проблема существенна тогда, когда изотопный состав переменен в объеме делящегося материала, например тогда, когда присутствуют и уран, и плутоний.

В целом, оценка наличия плутония и его изотопного состава методом гамма-спектрометрии в области 640 кэВ не очень уязвима к ограниченной внешней защите, подобной контейнеру АТ400, и этот метод будет давать хорошие результаты, пока изотопный состав делящегося материала будет распределен однородно. Следовательно, этот метод можно считать надежным. Более того, если защита не будет избыточной, то ее присутствие может быть определено из измерений.

Масса делящегося материала (плутония)

Определение атрибута. Самопоглощение гамма-излучения плутонием приведет к тому, что будет измеряться только часть от общей массы плутония. Это можно обнаружить по данным из таблицы 3, которые показывают, например, что интенсивность гамма-излучения с энергией в 600 кэВ уменьшается на 50 процентов после прохождения через 2,4 мм плутония. Отношение измеренной минимальной массы и реальной массы будет сильно зависеть от конфигурации плутония.

«Надежная демонстрационная система радиационного атрибута», разработанная в Национальной лаборатории Сандия, анализирует гамма-излучение для получения такой оценки минимальной массы²⁴. В ней предполагается, что самопоглощение не происходит, и что защита является однородной, признавая, что вычисление спектра на основании двух таких предположений даст минимальную массу. Свойства защиты рассчитывались, принимая во внимание интенсивность гамма-лучей на различных пиковых энергиях, так же как и интенсивности рассеянных фотонов с энергиями, приближающимися к пикам падающего гамма-излучения. Для получения оценки минимальной массы соответствующим образом подгонялся измеренный спектр, что требовало также приблизительной калибровки энергии. Измерение сплошного шара, содержащего 2230 г плутония-239, дало оценку в 290 г²⁵.

Обсуждение. Аргументом в пользу данного метода является то, что атрибут массы обычно рассматривается как пороговое значение минимальной массы, и поэтому измерять точную массу не нужно. Это следует принимать во внимание, несмотря на то, что для больших масс плутония недооценка будет весьма серьезной, так что атрибут будет намного меньше, чем действительное значение.

Наличие урана, изотопный состав и масса делящегося материала.

Хотя у урана-235 есть много гамма-пиков малой интенсивности, у четырех пиков интенсивность довольно высока. Интенсивность пика с энергией 185,7 кэВ равна 57,2 процента, а у пиков с энергиями 143,8 кэВ, 163,4 кэВ и 205,3 кэВ интенсивность попадает в диапазон от 5 до 11 процентов. У урана-238 есть два пика малой энергии с очень низкими интенсивностями, но уран-238 может быть отождествлен с помощью гамма-спектрокопии посредством идентификации пиков протактиния-234m (период полураспада 70,2 сек), который является дочерним нуклидом тория-234 (период полураспада 24 дня), в который распадается уран-238. У протактиния-234m имеется три пика между 740 и 790 кэВ, а самый сильный пик соответствует энергии 1001,0 кэВ.

Определение атрибута. Если защиты нет, то наличие урана-235 может быть определено посредством идентификации пика с энергией 185,7 кэВ. Наличие урана-238 может быть определено по пику протактиния-234m с энергией 1001,0 кэВ.

Изотопный состав может быть определен из сравнения двух упомянутых выше пиков. Если пик урана-235 с энергией 185,7 кэВ и пики протактиния-234m видны, то проблема заключается в том, что главные пики протактиния-234m и урана-235 расположены в различных энергетических диапазонах, и эффективность обнаружения будет зависеть от энергии из-за зависимости поглощения от энергии. По этой причине придется использовать метод внутренней калибровки. Относительные интенсивности могут быть получены для энергий, показывающих различные пики одних и тех же изотопов посредством анализа отношений таких пиков. Такой метод был реализован в программе FRAM²⁶.

Для того, чтобы оценить массу урана, можно будет рассмотреть подход, аналогичный оценке минимальной массы плутония. Насколько известно авторам, до сих пор на таком принципе не было основано ни одной системы аутентификации. Здесь все отмеченные выше проблемы, присущие измерениям урана, добавляются к вопросу самопоглощения, что делает такой подход к анализу малопривлекательным.

Обсуждение. Все пики, относящиеся к урану-235, находятся в области низких энергий, и могут быть легко защищены (таблица 3). Это существенно ограничивает успешное определение наличие и изотопный состав урана в боеголовках. Идентификация и количественное определение урана-238 через протактиний-234m также могут стать проблемой из-за того, что активность протактиния-234m, вероятно, будет низкой из-за ограниченной массы урана-238 в делящемся материале оружейного качества и его большого периода полураспада.

Оценка изотопного состава с использованием протактиния-234m требует предположения, что протактиний-234m находится в равновесии с ураном-238. Это предположение правильно, потому что активность тория-234 достигнет своего максимума через 867 суток, что является критерием равновесия. Делящийся материал, использованный в ядерном оружии, намного старше, по крайней мере в Соединенных Штатах и России.

Этот метод реализован с некоторой степенью успеха в конфигурациях с очень ограниченной защитой. Измерительная кампания по определению обогащения урана с помощью программы FRAM была проведена в Лос-Аламосской национальной лаборатории с урановыми источниками в 200 г и 1 кг, защищенных полиэтиленом толщиной 22 см, который намного менее эффективен в качестве защиты от гамма-лучей, чем элементы с большим атомным зарядом (он ослабляет 94 процента гамма-лучей с энергией 185,7 кэВ и 76 процентов гамма-лучей с энергией 1001,0 кэВ)²⁷. Большая часть реальных измерений обогащения находилась в пределах 3 стандартных отклонений, некоторые находились в пределах одного стандартного отклонения; образцы с большой массой и высоким обогащением показали лучшие результаты, чем образцы с малой массой и низким обогащением. Очевидно, что для конфигураций с более сильной защитой этот метод измерений будет гораздо менее надежным.

В целом, из-за низкой энергии основной гамма-линии урана-235 этот метод не представляется надежным в присутствии защиты контейнерами для хранения или самими боеголовками.

Пассивные измерения нейтронов

Пассивные измерения нейтронов могут быть использованы для определения массы делящегося плутония, когда известен изотопный состав.

Определение массы плутония по измерениям множественности.

Плутоний-240 излучает нейтроны в процессе спонтанного деления со скоростью $1,02 \cdot 10^3$ нейтронов/с.г. Распределение множественности (т.е. количества нейтронов, излучаемых при делении) для спонтанного деления имеет среднее значение 2,16; излучаемые нейтроны следуют спектру Уатта со средней энергией 1,96

МэВ²⁸. Средняя множественность равна 2,88 для деления плутония-239, вызванного тепловыми нейтронами, и 3,16 для деления, вызванного нейтронами с энергией 2 МэВ²⁹.

Нейтроны могут испытывать упругое или неупругое рассеяние, а также вызываемые нейтронами ядерные реакции. Упругое рассеяние замедляет нейтроны и изменяет их направление. Средняя потеря энергии в упругом рассеянии равна $2EA/(A+1)^2$, что приводит к эффективной термализации только в легких элементах³⁰. Вероятность многих неупругих реакций под действием нейтронов быстро уменьшается с увеличением энергии нейтрона и она обычно высока только для тепловых и надтепловых (менее 1 эВ) нейтронов, хотя здесь также существенны резонансные интегралы. Самопоглощением нейтронов в плутонии пренебрегать нельзя, в особенности в области энергии резонанса, но оно не так сильно выражено, как в поглощении гамма-лучей, поскольку нейтроны деления являются быстрыми нейтронами.

Определение атрибута. Для того, чтобы определить массу плутония посредством пассивных измерений нейтронов, Нужно будет измерить скорость спонтанного деления, по которой можно будет определить массу плутония-240. Затем можно будет рассчитать полную массу плутония, если известен его изотопный состав, например из гамма-спектроскопии.

На поток нейтронов, испускаемый образцом делящегося материала, действует несколько возможно неизвестных свойств:

- Полная скорость спонтанных делений, зависящая от массы делящегося материала.
- Размножение нейтронов внутри образца, в особенности посредством индуцированного деления плутония-239.
- Реакции (α , n) в оксидах, если таковые присутствуют.

При пассивном подсчете множественности нейтронов измеряется распределение множественности (то есть распределение количества нейтронов, зарегистрированных во временных интервалах определенной длительности), которое может быть выражено в терминах его факториальных моментов, которые можно соотнести с факториальными моментами излучаемого распределения, которое включает спонтанное и индуцированное деление, так же как и реакции (α , n), называемые скоростями одиночных, двойных и тройных событий³¹. Излучаемое распределение базируется на «модели суперделения», которая предполагает, что все нейтроны индуцированных делений излучаются одновременно с первоначальным спонтанным делением или реакцией (α , n), и поэтому они могут быть скомбинированы в одном распределении, для которого может быть задана аналитическая форма³². Три неизвестных могут быть выражены через три измеряемых параметра.

Обычно для анализа множественности используются детекторы с гелием-3. Поскольку поперечное сечение захвата нейтронов в гелии-3 уменьшается с ростом энергии, быстрые нейтроны замедляются в полиэтилене, окружающем трубки с гелием-3. Это требует определенного времени, и поэтому вентили совпадений должны оставаться открытыми в течение достаточно большого времени (обычно 32 – 48 мкс). Вентили совпадений открываются нейтронным импульсом, так что коррелированные нейтроны попадут в интервал. Однако, при таких длительностях интервалов будут зарегистрированы также некоррелированные события. В таком методе требуется принять случайно запускаемые интервалы с некоррелированными событиями для того, чтобы вычесть их вклад из результатов измерений для определения числа реальных совпадений.

Такой метод был реализован в нескольких верификационных проектах систем аутентификации, включая Трехстороннюю инициативу, FM-TTD, NG-AMS, и 3G-AMS³³⁻³⁶.

В принципе для проведения анализа множественности могут быть использованы другие типы детекторов. В Ок Риджской национальной лаборатории предложили использовать для проведения измерений множественности систему идентификации ядерных материалов (NMIS), в которой применяются сцинтилляционные детекторы^{37,38}. В сцинтилляционных детекторах быстрые нейтроны регистрируются в процессе рассеяния без необходимости замедления нейтронов; такой тип детекторов обеспечивает намного лучшее временное разрешение и, следовательно, существенно меньший фон некоррелированных нейтронов³⁹, но эффективность регистрации нейтронов будет меньше, чем у детекторов с гелием-3. Важная проблема состоит в том, что уже обнаруженные нейтроны могут выходить из сцинтиллятора и возвращаться после рассеяния или входить в другой детектор, что может привести в многократной регистрации одного и того же нейтрона, и, соответственно, к ложным совпадениям. Хотя аналитическое определение массы с помощью рассмотренного анализа множественности сцинтилляционными детекторами еще не было достигнуто, работы в этом направлении продолжаются⁴⁰. Тем

не менее, если будут доступны калибровочные кривые (зависимость массы плутония-240 от двойных совпадений), то можно будет оценить массу делящегося материала⁴¹.

Обсуждение. Множественность нейтронов и скорость реакции (α, n) сильно зависят от конфигурации делящегося материала. Измерения множественности нейтронов отделяют эти эффекты от скорости спонтанного деления плутония-240. Дальнейшие упрощения, которые могут вводить зависящее от конфигурации смещение, включают предположение, что все нейтроны имеют одну и ту же энергию. Вероятность индуцированного деления (однородная множественность) предполагается однородной по объему образца; так же считается, что эффективность регистрации не зависит от точки их испускания («точечная модель»). «Модель суперделения» обычно считается обоснованной с учетом малости временного масштаба процесса деления по сравнению с процессом обнаружения; справедливость «точечной модели» зависит от конструкции детектора и образца⁴². Были выполнены некоторые исследования по ограничениям этих предположений и были предложены модификации, например, взвешенная точечная модель, которая принимает во внимание неоднородное размножение, зависимость от конфигурации образца остается^{43,44}. Необходимы дополнительные исследования для количественного описания этих эффектов с учетом широкого диапазона конфигураций образцов и детектора.

Первоначальное определение эффективности детектора может быть проведено с источником на калифорнии-252. Измерения множественности, основанные на такой калибровке, могут быть немного смещены из-за различной эффективности детектора для нейтронов от спонтанного деления калифорния-252 и деления плутония. Это происходит из-за несколько более быстрого энергетического спектра нейтронов по сравнению с плутонием-239 и плутонием-240. Однако, из-за схожести распределений, различие в эффективности мало (в моделировании по программе MCNP45 различие в эффективности между плутониевой металлической сферой массой 2 кг и источником с калифорнием-252 равнялось 3,3 процента). Конкретная конфигурация образца и детектора обсуждается ниже. Поэтому данный метод хорошо приспособлен для аутентификации боеголовок там, где представительные калибровочные стандарты (компоненты боеголовок) недоступны и где конфигурация делящегося материала остается в основном не известной инспектору, что требует подходов, не зависящих от конфигурации образца. Небольшое смещение может быть минимизировано введением факторов коррекции для эффективности конкретных детекторов для плутония и калифорния-252.

Однако, измерения множественности зависят от конфигурации (защиты) между делящимся материалом и детектором. Из представленных ниже результатов представляется, что контейнеры для хранения компонента могут повлиять на количественную оценку массы, но не тогда, когда присутствует некоторое заметное количество поглотителя нейтронов, они предотвращают регистрацию достаточного количества нейтронов.

Моделирование по программе MCNP были выполнены для плутониевого образца массой 2 кг (сплошная сфера, 95 процентов плутония-239, 5 процентов плутония-240), расположенного внутри контейнера 9975. Был использован детектор, состоящий из 8 полос, каждая из которых была заполнена полиэтиленом и 6 трубками с гелием-3, расположенных вокруг контейнера. Поток нейтронов через поверхность трубок с гелием-3 показан на рисунке 3⁴⁶. Результаты моделирования с контейнером 9975 сравниваются с результатами моделирования без контейнера и моделирования, которым Celotex® из контейнера 9975 был заменен на Celotex®, содержащий 5 процентов бора. Результат был таким, что скорость счета увеличилась на 33 процента с присутствующим контейнером 9975 и на 22 процента в конфигурации Celotex® с бором по сравнению с измерением образца без контейнера. К этому результату привели три процесса. Во-первых, Celotex® состоит из материалов с малым атомным номером, которые эффективно уменьшают энергии электрона из-за упругого рассеяния. Этот эффект добавляется к упругому рассеянию в полиэтилене детектора, так что он вносит вклад в замедление нейтронов, увеличивая вероятность их регистрации, как это показано на рисунке 3. Этот эффект зависит от детектора, и в данном случае он означает, что замедление в детекторе было неидеальным, поскольку замедление нейтронов в упругом рассеянии конкурирует с захватом нейтронов (в основном в водороде с зависимостью $1/v$). Следовательно, при увеличении количества замедляющего материала скорость регистрации нейтронов может уменьшиться из-за увеличения скорости захват тепловых нейтронов в замедлителе. Счетчики множественности обычно проектируются так, чтобы минимизировать зависимость скорости счета от энергии нейтронов⁴⁷, но этого трудно добиться для больших детекторов, которые требуются для этой цели (то есть таких, в которые могут поместиться соответствующие контейнеры), как это можно увидеть из результатов моделирования скорости счета для модулируемого детектора, рассмотренного выше. Во-вторых, в присутствии бора (или другого поглотителя нейтронов) захватываются надтепловые и тепловые нейтроны (поперечное сечение (n, α) бора-10 равно 1933 барна при энергии 0,1 эВ). Celotex® замедляет нейтроны до надтепловых и тепловых энергий, где поперечное сечение захвата в боре становится большим. Однако, рисунок 3 показывает, что содержание бора

в 5 процентов уменьшает скорость счета, но не предотвращает существенной регистрации. Скорости захвата нейтронов в других материалах, таких, как присутствующая в контейнере нержавеющая сталь, будут намного меньше. В-третьих, нейтроны рассеиваются назад в плутониевый источник и вызывают дальнейшие реакции деления, увеличивая таким образом скорость счета через увеличившееся размножение.

В итоге данный метод рассматривается как слабо зависящий от конфигурации делящегося материала, хотя это должно быть исследовано для конкретных конфигураций. Кроме того, следует рассмотреть влияние внешней защиты на оценку массы, как это позволяют предполагать представленные результаты моделирования. Анализ множественности со сцинтилляционными детекторами будет успешным, когда доступны калибровочные стандарты, но неясно, какими большими станут отклонения, когда конфигурации образцов будут отличаться от калиброванных образцов, использованных для анализа массы.

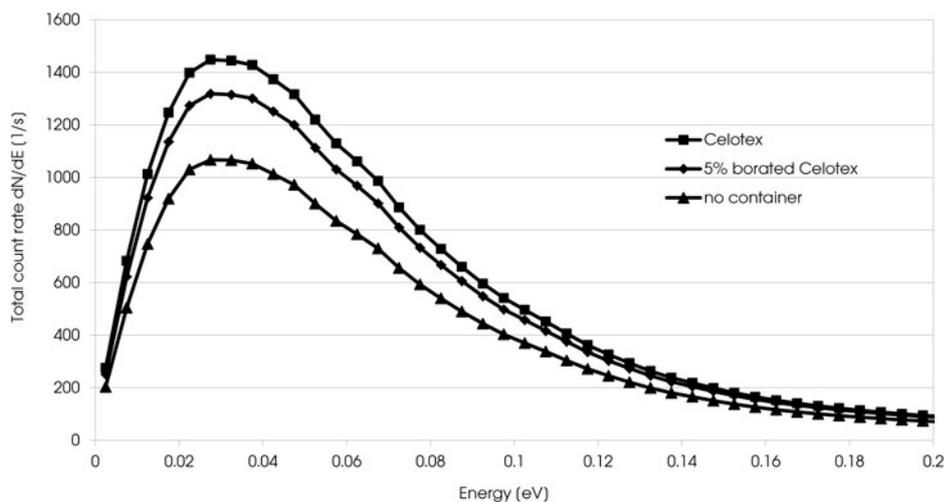


Рисунок 3. Энергетический спектр нейтронов низких энергий, проходящих через поверхности трубок с гелием-3 для источника из плутония оружейного качества массой 2 кг с контейнером 9975 (с интервалом энергий 0,005 эВ). Прямоугольные маркеры обозначают спектр в контейнере с материалом Celotex®, ромбические маркеры – в контейнере с материалом Celotex® с примесью бора в 5 процентов, треугольные маркеры – источнику без контейнера.

Масса плутония по кросс-корреляционным измерениям атрибута сцинтилляционным счетчиком

Определение. В распределении, показывающем обнаружение двух коррелированных нейтронов в различных сцинтилляционных детекторах в зависимости от разности времен их регистрации (рисунок 4) ширина распределения зависит от размножения в самом образце делящегося материала⁴⁸. Интеграл от функции распределения пропорционален произведению коэффициента размножения на массу делящегося материала. В системе идентификации ядерных материалов (NMIS) такой подход используется для оценки массы плутония⁴⁹. В принципе возможно также измерять кросс-корреляции более высокого порядка на более, чем двух детекторах⁵⁰.

Обсуждение. Определение соотношения между шириной распределения и коэффициентом размножения опирается на калибровку с материалами, представительными для подлежащих аутентификации образцов в терминах геометрии, состава, плотности и других параметров^{51,52}. Анализ массы плутония возможен при наличии подходящих калибровочных кривых⁵³. Если такие кривые не доступны инспектирующей стороне, то такой метод будет применим к определению массы только тогда, когда будет разработана процедура для расчета коэффициента размножения по ширине распределения. Авторам не известны исследования, в которых изучалась полезность кросс-корреляций высокого порядка.

Внешняя защита может оказать влияние на количественный анализ, как это обсуждалось ранее в контексте измерения множественности.

Анализ урана

Для урана-235 скорость спонтанного деления составляет $2,99 \cdot 10^{-4}$ нейтронов/с·г, а для урана-238 она равна $1,36 \cdot 10^{-2}$ нейтронов/с·г⁵⁴. Это примерно на 5 порядков величины меньше, чем для плутония-240. Для таких малых скоростей счета пассивные измерения множественности нейтронов нереальны.

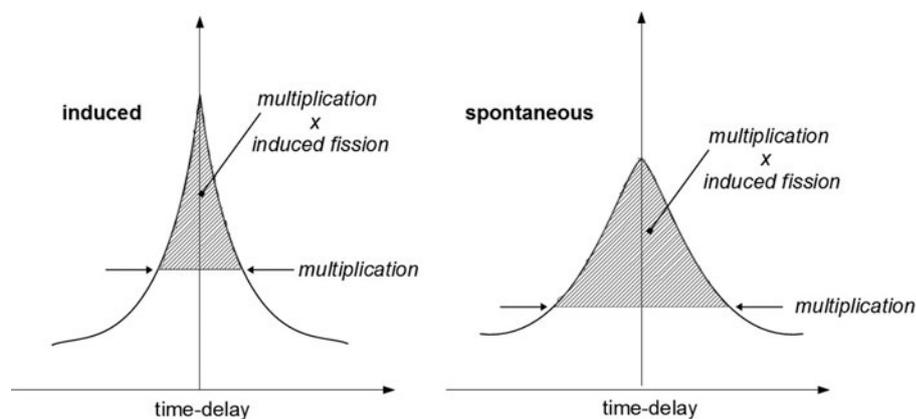


Рисунок 4. Распределение времен совпадения для сцинтилляционных детекторов в системе идентификации ядерных материалов (NMIS). На левой части рисунка показано распределение для индуцированных нейтронов, на правой части – для нейтронов спонтанного деления. На рисунках отмечены ширины линий для размножения и точки измерений для произведения коэффициента размножения на скорость счета индуцированного деления.

Измерения нейтронов, индуцированных нейтронами

Активные измерения нейтронов имеют отношение к определению присутствия урана, его обогащения и массы.

Присутствие урана, его обогащение и масса делящегося материала через измерения множественности.

Изотопы урана могут подвергаться делению при облучении нейтронами от внешнего источника. Поперечные сечения этого процесса (n, f) для урана-235 (в скобках – урана-238) равны 665 барн ($1,09 \cdot 10^{-5}$ барн) при 20 мэВ, 1,3 барна (0,5 барна) при 2,5 МэВ и 2,1 барна (1,1 барна) при 14 МэВ.

Типичными источниками нейтронов могут быть, например, америций-литиевые со средней энергией нейтронов 300 кэВ или D-T генераторы с энергией выходящих нейтронов 14 МэВ.

Оценка присутствия урана, его обогащения и массы с помощью детекторов с гелием-3 было предложено для системы 3G-AMS⁵⁵. Похоже, что исследования для системы 3G-AMS продолжаются, и их концепция будет представлена ниже.

Определение атрибута. Наличие чистого урана может быть определено посредством комбинации (а) пассивного измерения, не показывающего значимой скорости счета и (б) активного измерения, показывающего скорость счета, подтверждающую индуцированное деление. В зависимости от энергии падающих нейтронов, может происходить деление как урана-235 (при всех энергиях), так и урана-238 (при высоких энергиях нейтронов). В предположении, что в боеголовке с композитным ядром из делящегося материала присутствуют как уран, так и плутоний, массу плутония и его изотопный состав можно будет определить из пассивных измерений, и затем могут быть проведены активные измерения множественности для оценки того, будет ли отклик больше, чем это ожидается от плутония (поскольку изотопы плутония также могут делиться под действием нейтронов от внешних источников)⁵⁶. После этого могут быть определены обогащение урана и масса делящегося уранового материала при помощи активных измерений множественности с нейтронными источниками на двух различных энергиях. Во-первых, масса урана-235 может быть определена по измерениям множественности с нейтронным источником с энергиями ниже энергетического порога деления урана-238, например, америций-литиевого, и затем массы урана-238 по измерениям множественности с нейтронным источником с энергиями выше энергетического порога деления урана-238, например, D-T генератора, для оценки нейтронного отклика выше ожидаемого от уже определенных изотопов⁵⁷. Уравнения, преобразующие данные измерений в множественность и массу делящегося материала довольно похожи на свои аналоги в пассивном случае⁵⁸.

Обсуждение. Значительной проблемой является то, что взаимодействие между источником нейтронов и образцом вводит дополнительную неизвестную величину. Например, надтепловые (менее 1 эВ) нейтроны не

будут глубоко проникать в объем образца, поскольку длина их пробега будет короткой из-за большого поперечного сечения деления урана-235 под действием нейтронов. Это приведет к тому, что скорость деления не будет равномерно распределена по образцу, что приведет к зависимости оценок массы от геометрии, изотопного состава и т.п. Были разработаны различные подходы к определению взаимодействия, но они обычно опираются на калибровку с представительными образцами⁵⁹. Калибровка с представительными образцами не требуется только в случае однородно распределенного деления (когда в образец попадают только быстрые нейтроны), поскольку тогда скорость индуцированного деления на единицу массы будет зависеть только от падающего нейтронного потока и поперечного сечения деления нейтронами для энергии источника нейтронов⁶⁰.

К сожалению, при верификации боеголовки (или компонента) спектр источника нейтронов, падающих на делящийся материал, могут включать надтепловые нейтроны, поскольку нейтроны претерпевают столкновения перед своим поглощением. В контейнере для хранения боеголовки им надо будет пройти через слой материала Celotex® или полиуретана (в случае контейнера 9975 или контейнера AT-400, соответственно), и в полностью собранной боеголовке им надо будет пройти через взрывчатое вещество боеголовки.

Для наиболее эффективного счетчика множественности нейтронов (счетчик5а множественности надтепловых нейтронов) при времени измерения в 1000 секунд относительное стандартное отклонение будет меньше 1 процента при оценке массы урана-235 всего лишь в 1 кг. Для более широко используемого счетчика совпадений с активным колодцем точность в 1 процент достигается только для образца урана-235 массой в 4 кг⁶¹. Однако, измерения боеприпаса или компонента могут потребовать другого детектора (из-за требований к размеру полости для размещения подходящего контейнера), эффективность которого, вероятно, будет меньше. Поэтому статистика измерений может представлять проблему даже для больших масс. Следовательно, эффективность будет важным критерием при оценке различных конструкций детекторов.

В итоге умеренная внешняя защита не будет препятствовать определению наличия урана. Однако, для количественного анализа (обогащения и массы) зависимость от конфигурации образца может оказаться сильной. Хотя защита будет оказывать влияние на оценки, как это обсуждалось для пассивных измерений множественности, и из-за взаимодействия, как это рассматривалось выше, небольшая защита не будет препятствовать всем измерениям, когда будет зарегистрировано достаточное количество нейтронов. Тем не менее, требования к достаточной точности будут составлять проблему. Очевидно, что установление методов для надежной оценки атрибутов урана находится на ранней стадии развития.

Присутствие урана, его обогащение и масса делящегося материала через измерения времени пролета и кросскорреляционные измерения на сцинтилляционных детекторах.

Система идентификации ядерных материалов (NMIS) использует D-T генератор или источник с калифорнием-252 и может в принципе рассматриваться для определения присутствия урана, его обогащения и массы посредством измерения совпадений, как это объясняется ниже⁶².

Определение атрибута. Наличие урана может быть определено по отсутствию спонтанного деления и присутствию деления нейтронами от внешних источников⁶³. Предлагается определять обогащение посредством кросскорреляционного измерения с нейтронами с энергией 14 МэВ для определения массы урана-235 через деление нейтронами от внешнего источника и измерения прохождения нейтронов для определения суммы масс урана-235 и урана-238, поскольку уран-235 и уран-238 будут уменьшать прохождение нейтронов от источника через неупругое рассеяние и поглощение⁶⁴. В указанной публикации не учитывается, что уран-238 также испытывает деление от нейтронов с энергией 14 МэВ.

Масса урана-235 может быть определена посредством оценки скорости индуцированного нейтронами деления из интеграла распределения совпадений. В другом подходе системы идентификации ядерных материалов (NMIS) к определению массы и обогащения сравниваются моменты распределения временной корреляции зарегистрированных нейтронов с использованием источника с калифорнием-252 для калибровочных величин, определяющих массу и обогащение как функцию от моментов, но этот метод требует калибровку с представительными материалами^{65,66}.

Кроме того, система идентификации ядерных материалов (NMIS) анализирует временное затухание излучения нейтронов (профиль ослабления, время пролета) после импульсного облучения нейтронами, которое является индикатором массы урана-235. Медленное затухание нейтронов после импульсного воздействия тепловыми нейтронами указывает на более длинную цепочку деления (размножения), которая может соответствовать высокообогащенному урану, в то время как более быстрое затухание указывает на меньшее размножение

(или даже его отсутствие) может соответствовать обедненному урану⁶⁷. Сразу же после импульса детектируемые события в основном соответствуют первичным нейтронам от источника, в то время как позже вклад от индуцированных актов деления становится доминирующим. Соответственно, разделив временное распределение отсчетов на два сегмента, было показано, что отношение интегралов второй части и начальной части сразу же после импульса надежно оценивает изотопный состав, если только доступны репрезентативные калибровки⁶⁸.

Можно также комбинировать времяпролетный и кросскорреляционный подходы. С помощью двух уравнений (при измерении калибровочных кривых репрезентативных образцов), связывающих интеграл профиля ослабления и кросскорреляционный интеграл с массой и обогащением, можно будет определить оба последних параметра⁶⁹.

Обсуждение. Не имеется никаких очевидных проблем, препятствующих качественному определению наличия урана. Для определения обогащения и массы применяются соображения, аналогичные тем, которые обсуждались для активных измерений множественности, то есть неоднородное взаимодействие, вместе с внешней защитой. Хотя защита и влияет на оценки, небольшая защита в целом не препятствует изменению, если будет зарегистрировано достаточное количество нейтронов. Калибровка с представительными материалами может потребоваться не только из-за взаимодействия источника с образцом, но также из-за метода анализа временного распределения и зависимости между его шириной и размножением. Грубая оценка возможна и без репрезентативных калибровок (например, различие между высокообогащенным ураном с высоким размножением и обедненным ураном почти без размножения)⁷⁰. Проблема состоит в том, что кросс-корреляция зависящая как от размножения, так и от массы, может быть разрешена дополнительным учетом профиля ослабления. Если репрезентативные материалы доступны, или если известна конфигурация изделия (так что может быть использовано моделирование по методу Монте-Карло), то комбинация профиля ослабления и кросс-корреляции дает результаты с малыми неопределенностями массы и обогащения⁷¹.

Авторам не известны исследования для проверки подходов в случаях, где конфигурация изделия не известна. Следует предоставить приоритет количественному описанию влияния геометрии образца на калибровочные кривые.

Новые активные методы

В дополнение к представленным выше технологиям, которые достигли определенного уровня развития, здесь обсуждаются находящиеся на стадии становления активные методы, которые в будущем могут оказаться полезными для измерения изотопного состава или массы плутония и урана. На современной стадии их развития трудно оценить их потенциал для определения атрибутов. Многие из новых технологий разрабатывались для обеспечения ядерной безопасности, например, для пограничного контроля, где основной задачей было общее обнаружение делящегося материала, возможно защищенного, за короткое время измерений, в то время как точная оценка изотопного состава или массы делящегося материала была вторичной задачей. Для некоторых из следующих технологий, даже если отвлечься от проблем практической реализации теоретически правдоподобных концепций, отправной точкой должно быть получение более подробных доступных ядерных данных, необходимых для рассмотрения реализации определения атрибутов. Сводка современного состояния содержится в работе Рункле и др⁷².

Внешние источники могут излучать гамма-кванты или нейтроны. Основными процессами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются комптоновское рассеяние, рождение пар и поглощение атомами. Излучение с энергией в несколько МэВ (обычно используются источники в интервале энергий от 1,5 до 8 МэВ)⁷³ могут возбуждать ядра и приводить к излучению гамма-квантов с характерными энергиями, которые зависят от ядерной структуры индивидуального изотопа. Это явление называют ядерной резонансной флуоресценцией. При энергиях гамма-квантов от 10 до 15 МэВ поперечные сечения фотоделения становятся большими⁷⁴. Кроме того, гамма-кванты могут вызывать реакции (γ, n) или ($\gamma, 2n$) в делящихся и не делящихся материалах, хотя в большинстве материалов порог таких реакций будет выше, чем порог фотоделения⁷⁵. Нейтронное излучение может вызывать деление, которое будет конкурировать с реакциями (n, γ) и другими реакциями поглощения в делящихся и не делящихся материалах.

В последнем десятилетии большая часть исследований была направлена на запаздывающее в результате β -распада после индуцированного внешним источником деления нейтронное и гамма-излучение. Основным

преимуществом такого метода является отсутствие фона от иницирующего пучка. В проекте «ядерная авто-мойка» делящийся материал облучается быстрыми нейтронами для наблюдения запаздывающего гамма-излучения с энергиями менее 7 МэВ, которое эффективно проходит через защиту как с малыми, так и с большими атомными номерами⁷⁶. Более того, большая часть продуктов наведенной активации (в не делящихся материалах) излучает фотоны сравнительно низких энергий, так что наличие излучения высоких энергий (более 3 МэВ) указывает на присутствие делящегося материала⁷⁷. Наблюдая запаздывающее гамма-излучение после облучения гамма-квантами, Риди и др. успешно различали образцы из делящихся и не делящихся материалов при регистрации излучения через 13 мс после иницирующего импульса⁷⁸. Далее они предложили использовать такой метод для определения изотопного состава делящегося материала. Теоретически это может быть достигнуто посредством идентификации осколков деления по их характерным распадам с излучением фотонов высоких энергий, и определению делящихся изотопов по их распределению осколков деления. Однако, экспериментальные проверки до сих пор не были проведены.

Кинло и Хант предложили метод для оценки изотопного состава по сигнатуре запаздывающих нейтронов, измеряемой детекторами с гелием-3. Они наблюдали различные скорости распада для запаздывающих нейтронов в зависимости от делящихся изотопов в течение первых 130 мс после облучения фотонами с энергией 20 МэВ⁷⁹. Специфической проблемой этого метода является то, что скорости распада для соответствующих изотопов (например, урана-235 и плутония-239) схожи⁸⁰, и что запаздывающие нейтроны излучаются только после 0,3 – 5 процентов реакций деления.

В детектировании мгновенного излучения накоплен меньший опыт, за исключением измерений нейтронных совпадений и множественности, которые рассматривались выше. Преимущество измерений мгновенного излучения в основном состоит в том, что интенсивность мгновенного излучения может быть на порядки величины больше, чем у запаздывающего излучения. С другой стороны, однако, доля испускаемого излучения обычно мала по сравнению с интенсивностью источника и мгновенными фоновыми эффектами (например, реакциями поглощения) от всех материалов^{81,82}.

Многообещающий метод спектроскопии мгновенных фотонов измеряет ядерную резонансную флуоресценцию. Поскольку излучаемые гамма-кванты характерны для конкретного изотопа, этот метод в принципе позволяет определять изотопный состав. Энергия фотонов от внешнего источника и излучаемые энергии лежат в диапазоне нескольких МэВ и такие фотоны могут проникать через защиту с большим атомным номером. Ядерная резонансная флуоресценция может также стать кандидатом для определения массы делящегося материала⁸³. Сегодня разработка все еще ограничивается идентификацией интересных резонансов и проведением измерений для доказательства принципа действия⁸⁴. Общими экспериментальными проблемами, относящимися к «быстрой» спектроскопии, являются требования высокого разрешения, вероятно требующие германиевых детекторов высокой частоты, у которых, однако, возникает проблема малой эффективности регистрации, в особенности для фотонов с энергией более 1 МэВ.

С учетом ранней стадии доказательства принципа действия для большинства методов, упомянутых в этом разделе, любые количественные оценки будут преждевременными. Тем не менее, потребуется ограниченное влияние измеряемой конфигурации и возможной защиты. Для оценок массы наведенные реакции в делящемся материале должны быть настолько изотропными, насколько это возможно. И, наконец, испускаемое излучение должно будет достаточно успешно проходить через возможную защиту между материалом и детектором. Как только эти новые методы докажут возможность удовлетворить требуемым критериям, нужно будет продвигать дальнейшие исследования.

ВЫВОДЫ

Имеется широкий ассортимент исследований методов измерений, относящихся к определению атрибутов, который обсуждается в данной статье. Сводка этих методов вместе с их преимуществами и недостатками приведена в таблице 2. В нее не включены новые активные технологии, поскольку их исследования находятся на самой ранней стадии. Некоторые ограничения могут быть преодолены в дальнейших исследованиях. Преимущества отмечаются тогда, когда конкретный метод измерений не уязвим, или менее уязвим к проблеме, которая проявляется в другом методе. Если не перечислены никакие ограничения, то метод измерений удовлетворяет требованиям, поставленным в данной статье. Основными различиями между индивидуальными методами в терминах правильной характеристики позиции, конфигурация которой не полностью известна инспектиру-

щей стороне, являются зависимость от защиты, внешней по отношению к делящемуся материалу, и зависимость от конфигурации делящегося материала (то есть, должна ли быть проведена калибровка детектора с использованием репрезентативных стандартов делящегося материала). Метод должен быть независимым от этих проблем настолько, насколько это возможно, для того, чтобы инспектирующая сторона была уверена в том, что он правильно функционирует.

Вообще говоря, методы измерений для атрибутов плутония продвинулись в своей разработке намного дальше, чем методы для урана. Представляется, что наличие и изотопный состав плутония могут быть определены при помощи гамма-спектрометрии тогда, когда не будет значительной внешней защиты. Определение массы плутония посредством пассивных измерений множественности нейтронов является методом, в котором обычно предполагается, что зависимость от конфигурации плутония невелика (хотя в отдельных случаях это следует пересчитать), но на него влияет внешняя защита, которая может оказать влияние на оценку массы. Определение наличия урана и его обогащения посредством гамма-спектрометрии будет возможно только тогда, когда не будет присутствовать никакой внешней защиты. Вероятно, что защиты будет слишком много. Измерения множественности нейтронов могут определить наличие урана. Однако, для оценки обогащения и массы урана с помощью активных измерений множественности нейтронов потребуется много дополнительных исследований для того, чтобы продемонстрировать его устойчивость и надежность. Помимо уязвимости к внешней защите, аналогичной имеющейся у пассивных измерений множественности, большая проблема заключается в неизвестном взаимодействии между источником нейтронов и делящимся материалом, которое вносит сильную зависимость от конфигурации. Новые активные методы могут оказаться полезными для характеристики урана, но их исследования в отношении к аутентификации боеголовок находятся на самой ранней стадии, что затрудняет в настоящее время оценку их будущего потенциала.

Это может создать различия между аутентифицируемой полностью собранной боеголовкой и компонентом боеголовки. Боеголовка может содержать материалы защиты, которые ослабляют излучение, выходящее из делящегося материала, которые также могут быть помещены в контейнер. В активных измерениях частицам от внешнего источника потребуется пройти через такие компоненты до того, как они достигнут объема делящегося материала, что может изменить их плотность потока и энергетическое распределение. Аутентификация компонентов боеголовки может столкнуться с аналогичными проблемами (хотя, возможно, и не столь выраженными), поскольку они могут быть помещены в контейнеры для хранения, которые также могут действовать как защита. В случае аутентификации компонентов боеголовок одним из подходов может быть раскрытие конструкции контейнера или его элементов инспектирующей стороне и (или) включение контейнера в калибровку детектора. Для полностью собранных боеголовок разрешить такие вопросы будет намного труднее из-за секретности. Было бы полезно, если бы принимающая сторона могла раскрыть некоторую информацию об ожидаемой защите без нарушения обязательств по нераспространению. Без достаточной информации по защите ни одна из количественных оценок атрибутов не будет надежной. В этом аспекте даже те методы измерений, которые обычно считаются надежными, потребуют дополнительной оценки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Немецкий фонд исследований мира за предоставление щедрого финансирования для данного исследовательского проекта. Кроме того, Паоло Пеерани и Рейнхард Берндт активно поддерживали исследование и помогли в кампаниях измерений в Объединенном исследовательском центре в Испра, Италия.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Russian Federation and United States of America, *Treaty between the United States and the Russian Federation on Measures for the Further Reduction and Limitation of Strategic Offensive Arms* (2010).
2. Термин «компонент боеголовки» для целей данной статьи относится к той части ядерной боеголовки, которая содержит делящийся материал. В рамках процесса демонтажа этот компонент будет отделен от других частей боеголовки.
3. Это относится также и к государствам, не являющимся сторонами Договора о нераспространении, поскольку маловероятно, что они захотят раскрывать чувствительную информацию по соображениям национальной безопасности.

4. National Academy of Sciences, *Monitoring Nuclear Weapons and Nuclear- Explosive Materials* (Washington, D.C.: The National Academies Press, 2005), 99.
5. Richard T. Kouzes and Bruce D. Geelhood, "Composite Signatures of Nuclear and Non-Nuclear Technologies for Weapons Material and Component Measurement," Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-13861, Richland (2002).
6. Alicia L. Swift, Brandon R. Grogan, James A. Mullens, Jason P. Hayward, and John T. Mihalcz, "Attributes from NMIS Time Coincidence, Fast-Neutron Imaging, Fission Mapping, and Gamma-Ray Spectrometry Data," Institute of Nuclear Materials Management 53rd Annual Meeting, Orlando, Florida, 15–19 July 2012.
7. Luisa F. Hansen, "A Comparison of the Shielding Performances of the AT-400A, Model FL and AL-R8 Containers," Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL- JC-120849, San Francisco (1995).
8. Информацию о сертификации можно найти в документе Department of Energy Packaging Certification Program, "Addendum to Safety Analysis Report for Packaging, Model 9975, B(M)F-85; WSRC-SA-2002-0008, Docket No. 09-29-9975" (2009). Контейнер 9975 сертифицирован в соответствии с Title 10 Code of Federal Regulations Part 71 и может быть соответственно использован для хранения целенометаллических узлов, смотрите U.S. Department of Energy, "Environmental Assessment for Interim Storage of Plutonium Components at Pantex and Department of Energy Response to Comments Received from the State of Texas," EA-0812 (1994).
9. "Comparison of Shielding Performances" (ссылка 7)
10. Davis A. Reed, Sedat Goluoglu, Calvin M. Hopper, and Robert M. Wham, "Nuclear Criticality Safety of the DOT 9975 Container for $^{237}\text{NpO}_2$ Storage, Handling and Transport," Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2003/200, Oak Ridge (2003).
11. Glen Warren, Daniel E. Archer, Mark Cunningham, Seth McConchie, and Jonathan Thron, "Concepts for the Measurements Subsystems of the Third Generation Attributes Measurement System," Institute of Nuclear Materials Management 53rd Annual Meeting, Orlando, Florida, 15–19 July 2012.
12. Diana G. Langner, Sin-Tao Hsue, Duncan W. MacArthur, Nancy J. Nicholas, Rena Whiteson, Thomas B. Gosnell, Zachary Koenig, James Wolford, Massimo Aparo, Iouri Kulikov, John Puckett, Julian Whichello, Sergei Razinkov, Alexander Livke, and Valery J. Poplavki, "Attribute Verification Systems with Information Barriers for Classified Forms of Plutonium in the Trilateral Initiative," International Atomic Energy Agency Symposium on International Safeguards: Verification and Nuclear Material Security, IAEA-SM-367/17/02, Vienna (2001).
13. Fissile Material Transparency Technology Demonstration, "Technical Overview of Fissile Material Transparency Technology Demonstration, Executive Summary," http://www.lanl.gov/orgs/n/n1/FMTTD/presentations/pdf/docs/exec_sum.pdf.
14. Sergey Razinkov, Mikhail Bulatov, Sergey Kondratov, Alexander Livke, M. Leplyavkina, Duncan MacArthur, D. Sivachev, Jonathan Thron, S. Tsybryaev, and A. V'yushin, "AVNG System Objectives and Concept," Institute of Nuclear Materials Management 51st Annual Meeting, Baltimore, Maryland, 11–15 July 2010.
15. "Fissile Material Transparency Technology Demonstration" (ссылка 13)
16. Если не указано иное, ядерные данные взяты из библиотеки ENDF/B-VI 8.
17. Авторы выражают признательность Мартину Уэйлу за предоставление экспериментальных данных.
18. S. John Luke and Daniel E. Archer, "Gamma Attribute Measurements – Pu300, Pu600, Pu900," Institute of Nuclear Materials Management 41st Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 16–20 July 2000.
19. "Fissile Material Transparency Technology Demonstration" (ссылка 13)
20. Pete J. Karpus and Richard B. Williams, "Designing a Minimum-Functionality Neutron and Gamma Measurement Instrument with a Focus on Authentication," Institute of Nuclear Materials Management 50th Annual Meeting, Tucson, Arizona, 12–16 July 2009.
21. "Third Generation Attributes Measurement System" (ссылка 11)
22. Tore Ramsøy, Edward Day, K. Allen, C. Marsh, M. Morgan-Reading, A. Richings, S. Backe, T. Bjerck, S. Hustvelt, S. Høibråten, K. Johansson, and H. E. Torkidsen, "United Kingdom – Norway Initiative Information Barrier Development: Technical Trial Results," Proceedings of the Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Palm Desert, California, USA, 14–18 July 2013.
23. Толщины слоев половинного ослабления рассчитывались из соответствующих коэффициентов массового ослабления, приведенных в Ellery Storm, Harvey I. Israel, "Photon Cross Sections from 0.001 to 100 MeV for Elements 1 through 100," Los Alamos Scientific Laboratory, LA-3753, Los Alamos (1967).
24. Dean J. Mitchell, and Keith M. Tolk, "Trusted Radiation Attribute Demonstration System," Institute of Nuclear Materials Management 41st Annual Meeting, New Orleans, 16–20 July 2000.

25. "Trusted Radiation Attribute Demonstration System" (ссылка 24)
26. Thomas E. Sampson, "Plutonium Isotopic Analysis Using FRAM," in *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials 2007 Addendum*, ed. Douglas Reilly (Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2007).
27. Duc T. Vo and David DeSimone, "Gamma-Ray Measurements of Uranium Items Inside an AWCC," Institute of Nuclear Materials Management 53rd Annual Meeting, Orlando, Florida, 15–19 July 2012.
28. Norbert Ensslin, "Neutron Origins," in *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*, Douglas Reilly, Norbert Ensslin, and Hastings A. Smith, eds. U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-5550 (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1991).
29. Martin S. Zucker and Norman E. Holden, "Energy Dependence of the Neutron Multiplicity Pv in Fast Neutron Induced Fission of 235,238U and 239Pu," American Nuclear Society Annual Meeting, Reno, Nevada, 15–19 June 1986.
30. Phil M. Rinard, "Neutron Interactions in Matter," in *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*, ed. Douglas Reilly, Norbert Ensslin and Hastings A. Smith, US Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-5550 (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1991).
31. Walter Hage and Donato M. Cifarelli, "Correlation Analysis with Neutron Count Distributions in Randomly or Signal Triggered Time Intervals for Assay of Special Fissile Materials," *Nuclear Science and Engineering* 89 (1985): 159–176.
32. Klaus D. Böhnelt, "The Effect of Multiplication on the Quantitative Determination of Spontaneously Fissioning Isotopes by Neutron Correlation Analysis," *Nuclear Science and Engineering* 90 (1985): 75–82.
33. "Trilateral Initiative" (ссылка 12)
34. "Fissile Material Transparency Technology Demonstration" (ссылка 13)
35. "Designing a Minimum-Functionality Neutron and Gamma Measurement Instrument" (ссылка 20)
36. "Third Generation Attributes Measurement System" (ссылка 11)
37. John T. Mihalczko, James A. Mullens, John K. Mattingly, and Timothy E. Valentine, "Physical Description of Nuclear Materials Identification System (NMIS) Signatures," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 450 (2000): 531–555.
38. Rafael B. Perez, Jose L. Munoz-Cobo, Timothy E. Valentine, John T. Mihalczko, and James A. Mullens, "Incorporation of Neutron and Gamma Multiplicity Measurements in the ORNL Nuclear Materials Identification System (NMIS): Passive and Active Measurements," Institute of Nuclear Materials Management 40th Annual Meeting, Phoenix, Arizona, 25–29 July 1999.
39. Andreas Enqvist, Marek Flaska, Jennifer L. Dolan, David L. Chichester, and Sara A. Pozzi, "A Combined Neutron and Gamma-Ray Multiplicity Counter Based on Liquid Scintillation Detectors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 652 (2010): 48–51.
40. Anthony D. Laviertes, Romano Plenteda, Nicholas Mascarenhas, L. Marie Cronholm, Michael Aspinall, Malcolm Joyce, Alice Tomanin, and Paolo Peerani, "Liquid Scintillator-Based Neutron Detector Development," Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Anaheim, California, October 29–November 3, 2012.
41. Jennifer L. Dolan, Matthew J. Marcat, Alexis Poitras-Riviere, Andreas Enqvist, Marek Flaska, Sara A. Pozzi, and David L. Chichester, "Characterizing Plutonium-Containing Materials with a Fast-Neutron Multiplicity Counter," Institute of Nuclear Materials Management 54th Annual Meeting, Palm Desert, California, 14–18 July 2013.
42. Norbert Ensslin, William C. Harker, Merlyn S. Krick, Diana G. Langner, Mark M. Pickrell, and Jim E. Stewart, "Application Guide to Neutron Multiplicity Counting," Los Alamos National Laboratory, LA-13422-M, Los Alamos (1998).
43. Stephen Croft, Eloisa Alvarez, Patrick M. J. Chard, Robert McElroy, and Sasha Philips, "An Alternative Perspective on the Weighted Point Model for Passive Neutron Multiplicity Counting," Institute of Nuclear Materials Management 48th Annual Meeting, Tucson, 8–12 July 2007.
44. Merlyn S. Krick, William H. Geist, and Douglas R. Mayo, "A Weighted Point Model for the Thermal Neutron Multiplicity Assay of High-Mass Plutonium Samples," Los Alamos National Laboratory, LA-14157, Los Alamos (2005).
45. X-5 Monte Carlo Team, *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987 (2003).
46. Malte Götsche, Paolo Peerani, and Gerald Kirchner, "Concepts for Dismantlement Verification and Neutron Multiplicity Measurements for Plutonium Mass Attribute Determination," European Safeguards Research and Development Association 35th Annual Meeting, Bruges, Belgium, 27–30 May 2013.
47. "Application Guide to Neutron Multiplicity Counting" (ссылка 42)

48. John K. Mattingly, John S. Neal, and John T. Mihalczco, "NMIS Passive Time-Dependent Coincidence Measurements for Plutonium Mass and Multiplication," Institute of Nuclear Materials Management 43rd Annual Meeting, Orlando, Florida, 23–27 July 2002.
49. "Nuclear Materials Identification System (NMIS) Signatures" (ссылка 37)
50. James A. Mullens, John S. Neal, Paul A. Hausladen, Sara A. Pozzi, and John T. Mihalczco, "Fast Coincidence Counting with Active Inspection Systems," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 241 (2005): 804–809.
51. "NMIS Passive Time-Dependent Coincidence Measurements" (ссылка 48)
52. John T. Mihalczco, John K. Mattingly, James A. Mullens, and John S. Neal, "NMIS With Gamma Spectrometry for Attributes of Pu and HEU, Explosives and Chemical Agents," Y-12 National Security Complex, Y/LB-16,123, Rev.1, Oak Ridge (2002).
53. Timothy E. Valentine, Lisa G. Chiang, and John T. Mihalczco, "Preliminary Evaluation of NMIS for Interrogation of Pu and HEU in AT-400-R Containers at Mayak," Oak Ridge National Laboratory, ORNL/M-6648 R4, Oak Ridge (2000).
54. "Neutron Origins" (ссылка 28)
55. "Third Generation Attributes Measurement System" (ссылка 11)
56. "Third Generation Attributes Measurement System" (ссылка 11)
57. "Third Generation Attributes Measurement System" (ссылка 11)
58. Norbert Ensslin, William H. Geist, Merlyn S. Krick, and Mark M. Pickrell, "Active Neutron Multiplicity Counting," in *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials 2007 Addendum*, ed. Douglas Reilly (Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2007).
59. "Active Neutron Multiplicity Counting" (ссылка 58)
60. Braden Goddard, "Quantitative NDA Measurements of Advanced Reprocessing Product Materials Containing U, Np, Pu, and Am," Ph.D. Dissertation, Nuclear Engineering, Texas A&M University, College Station (2013).
61. "Active Neutron Multiplicity Counting" (ссылка 58)
62. "NMIS Passive Time-Dependent Coincidence Measurements" (ссылка 48)
63. "NMIS Passive Time-Dependent Coincidence Measurements" (ссылка 48)
64. "NMIS Passive Time-Dependent Coincidence Measurements" (ссылка 48)
65. John K. Mattingly, Timothy E. Valentine, John T. Mihalczco, Lisa G. Chiang, and Rafael B. Perez, "Enrichment and Uranium Mass From NMIS For HEU Metal," Institute of Nuclear Materials Management 41st Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 16–20 July 2000.
66. Lisa G. Chiang, John K. Mattingly, James A. Ramsey, and John T. Mihalczco, "Verification of Uranium Mass and Enrichments of Highly Enriched Uranium (HEU) Using the Nuclear Materials Identification System (NMIS)," Institute of Nuclear Materials Management 41st Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 16–20 July 2000.
67. Seth McConchie, Paul Hausladen, and John T. Mihalczco, "Reflected Neutron Effects in Multiplicity Measurements of Bare HEU Assemblies," Institute of Nuclear Materials Management 51st Annual Meeting, Baltimore, Maryland, 11–15 July 2010.
68. "Preliminary Evaluation of NMIS" (ссылка 53)
69. James A. Mullens, Jarrod D. Edwards, and Sara A. Pozzi, "Analysis of Scintillator Pulse-Height for Nuclear Materials Identification," Institute of Nuclear Materials Management 45th Annual Meeting, Orlando, 18–22 July 2004.
70. "Attributes from NMIS" (ссылка 6)
71. "Analysis of Scintillator Pulse-Height" (ссылка 69)
72. Robert C. Runkle, David L. Chichester, and Scott J. Thompson, "Rattling Nucleons: "New Developments in Active Interrogation of Special Nuclear Material," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 663 (2012): 75–95.
73. Glen Warren, Jac Caggiano, and Patrick Peplowski, "Potential Applications of Nuclear Resonance Fluorescence," International Conference on Applications of Nuclear Techniques, Crete, 14–20 June 2009.
74. "New Developments in Active Interrogation" (ссылка 72)
75. "Potential Applications of Nuclear Resonance Fluorescence" (ссылка 73)
76. James M. Hall, Steve Asztalos, Peter Bilitoft, J. Church, Marie-Anne Descalle, Thomas Luu, Douglas Mannat, G. Joseph Mauger, Eric Norman, D. Petersen, Jason Pruet, Stanley Prussin, and Dennis Slaughter, "The Nuclear Car Wash: Neutron Interrogation of Cargo Containers to Detect Hidden SNM," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 261 (2007): 337–340.

77. "The Nuclear Car Wash" (ссылка 76)
78. E. T. E. Reedy, Scott J. Thompson, and Alan W. Hunt, "The Detection of Delayed Gamma-Rays Between Intense Bremsstrahlung Pulses for Discriminating Fissionable from Non-Fissionable Materials," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 606 (2009): 811–815.
79. Mathew Kinlaw and Alan W. Hunt, "Time Dependence of Delayed Neutron Emissions for Fissionable Isotope Identification," *Applied Physics Letters* 86 (2006).
80. "Time Dependence of Delayed Neutron Emissions" (ссылка 79)
81. "New Developments in Active Interrogation" (ссылка 72)
82. Brandon W. Blackburn, James L. Jones, Calvin E. Moss, John T. Mihalczko, Alan W. Hunt, Frank Harmon, Scott M. Watson, and James T. Johnson, "Utilization of Actively-Induced, Prompt Radiation Emission for Nonproliferation Applications," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 261 (2007): 341–346.
83. "Potential Applications of Nuclear Resonance Fluorescence" (ссылка 73)
84. "New Developments in Active Interrogation" (ссылка 72)