

ВЕРИФИКАЦИЯ ЯДЕРНЫХ БОЕГОЛОВОК: ОБЗОР СИСТЕМ АТТРИБУТОВ И ШАБЛОНОВ

Цзе Янь и Александр Глэзер

Верификация действующих договоров по контролю ядерных вооружений между Соединенными Штатами и Россией в основном опирается на верификацию средств доставки. Боеголовки подсчитываются косвенным образом через связанные с ними средства доставки. Когда государства перейдут к меньшим количествам ядерного оружия в своих арсеналах, перед верификацией, по-видимому, возникнут сложные проблемы. Наиболее важно то, что будущие договоры по ядерному разоружению могут установить пределы на общее количество ядерных боеприпасов в арсеналах. Их верификация должна будет потребовать инспекции индивидуальных ядерных боеголовок без раскрытия секретной информации. Подтверждение аутентичности ядерных боеголовок, и, возможно, также компонентов ядерных боеголовок, располагается в центре проблемы верификации будущих сокращений ядерных арсеналов. Данная статья представляет собой обзор развертывания систем верификации и выделяет проблемы и возможности будущих исследований в этой области.

Цзе Янь работает в Институте ядерной физики и химии Китайской Академии прикладной физики, Мянъян, Сычуань, Китай, а также по Программе науки и всеобщей безопасности Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Александр Глэзер работает по Программе науки и всеобщей безопасности Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Почтовый адрес для корреспонденции: Jie Yan, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Academy of Engineering Physics of China, P. O. Box 919-210, Mianyang 621900, Sichuan, China.

Адрес электронной почты: yanjie@mail.ustc.edu.cn

Статья получена 19 июня 2015 года и принята к публикации 19 июля 2015 года.

ПРЕДПОСЫЛКИ

Существующие соглашения по контролю над ядерными вооружениями между Соединенными Штатами и Россией устанавливают пределы на количество развернутых стратегических ядерных вооружений. Верификация этих соглашений получает преимущество от того факта, что развернутые вооружения ассоциированы с однозначными и легко подсчитываемыми платформами доставки (то есть, с ракетными шахтами, подводными лодками, и стратегическими бомбардировщиками), к которым приписано согласованное количество боеголовок. Тем не менее, следующий раунд двусторонних, и возможно, многосторонних соглашений по контролю за ядерными вооружениями, может назначить пределы на общее количество ядерных боеприпасов и боеголовок в арсеналах. Это может включать тактические вооружения, так же как и развернутые и неразвернутые вооружения.

Такие соглашения могут потребовать более всесторонних подходов к верификации, включая инспекции индивидуальных ядерных боеголовок в хранилищах и боеголовок, находящихся в очереди на демонтаж. Подтверждение аутентичности боеголовки, установление ее происхождения, и поддержание соответствующей непрерывности знания при демонтаже рассматриваются как три наиболее технически проблемных процесса верификации в этом процессе¹. В частности, подтверждение идентичности боеголовки может быть качественно наиболее проблемным. Конструкция ядерного боеприпаса представляет собой совершенно секретную информацию, которая не может быть раскрыта международным инспекторам, не только с точки зрения принимающей стороны, но и для требования нераспространения.

Эта статья подводит итог предыдущим попыткам разработки систем верификации боеголовок, основаным на анализе измерений радиации, и нередко совмещаемых с создаваемыми информационными барьерами для предотвращения раскрытия секретной информации. На основании предыдущих технических достижений в этой статье предлагается создание международной сети исследовательских организаций в странах, обладающих ядерным оружием, и в неядерных государствах, и в общих чертах намечает набор рекомендаций для инициирования исследований и обращения к остающимся проблемам.

БАЗОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ: АТРИБУТЫ, ШАБЛОНЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ БАРЬЕРЫ

Продуктивный подход к верификации должен будет разрешить противоречие между надежной верификацией того, что инспектируемая боеголовка аутентична, и предотвращением раскрытия информации о ее конструкции^{2,3}. Для решения этой проблемы были предложены два фундаментально различающихся подхода: подход "шаблона" (или сопоставления с шаблоном) и подход "атрибута". Лаборатории ядерного оружия в Соединенных Штатах и России провели обширную совместную работу по разработке обоих подходов для целей контроля над вооружениями и изготовили несколько прототипов систем для идентификации как ядерных боеприпасов, так и компонентов оружия. Недавно Великобритания вместе с Норвегией и Китаем начали исследовать аналогичные системы.

Подход шаблона

Шаблонные измерения не должны определять абсолютные или относительные значения параметров, характеризующих отдельный предмет (таких, как масса плутония или его изотопный состав); вместо этого, в подходе шаблона стремятся создать уникальный характерный признак предмета и сравнить эту сигнатуру с записанным шаблоном, определенным ранее для эталонного предмета, известного как аутентичный, или считающегося таковым. Характерный признак часто состоит из набора характеристик боеголовки, или компонента боеголовки, включающий различные комбинации механических, тепловых, электрических, акустических и ядерных свойств. Сейчас большинство концепций опираются только на испускание гамма-лучей⁴, но другие (не ядерные) сигнатуры также могут оказаться в равной степени полезными, в особенности если они будут считаться менее интрузивными, чем радиационные измерения.

Системы шаблона могут быть пассивными или активными. Пассивные системы шаблона обычно основаны на собственном гамма-излучении изотопов плутония или урана, содержащихся в ядерном боеприпасе, или в его компонентах, в состав которого входят гамма-кванты высоких энергий, обладающие высокой проникающей способностью, и от которых нельзя легко защититься, и поэтому они могут быть легко зарегистрированы. Идентификация боеголовок с помощью метода шаблона сталкивается с несколькими проблемами. Самая фундаментальная проблема связана с установлением аутентичности самого эталонного предмета, то есть с обеспечением того, что шаблон был создан с использованием аутентичной боеголовки или компонента боеголовки. Такой эталонный образец для определенных типов, называемый также "золотой боеголовкой", может также быть создан как средний по нескольким боеголовкам с использованием случайной выборки из популяции таких боеголовок из объявленных развернутых ядерных боеприпасов на ракетах, или в арсенале, измеренный с помощью совместно разработанной и надежной системы инспекции шаблонов. Тем не менее, даже в отсутствие эталонного образца системы шаблона могут быть полезным средством инспекции: они могут подтвердить, что некоторое количество образцов являются идентичными, и они могут подтвердить идентичность одного и того же предмета в различные моменты времени. Другой особой проблемой является защита содержащейся в эталоне секретной информации о конструкции боеприпаса и защита шаблона или эталонного образца в период между измерениями. Стандартными концепциями, используемыми для обеспечения безопасности информации в подобных ситуациях, являются шифрование с открытым ключом и хэш-алгоритмы⁵. В любом случае, при подготовке шаблона и в ходе верификационных измерений потребуются информационные барьеры для защиты секретных данных. В таблице 1 приведен краткий обзор некоторых типичных систем инспекции, основанных на подходе шаблона.

В 1988 году Брукгейвенская национальная лаборатория предложила концепцию верификационной технологии с контролируемой интрузивностью (CIVET) с возможностью получения секретной информации при сохранении ее конфиденциальности в условиях двустороннего взаимодействия⁶. В течение 1990-х годов под эгидой Министерства энергетики и Министерства обороны США система CIVET проверялась в полевых испытаниях и была успешно применена для верификации боеголовок и их компонентов во время различных учений и демонстраций⁷. В 1999 – 2001 годах Национальные лаборатории Сандия разработали доверительную систему радиационной идентификации (TRIS)⁸ для создания и подтверждения шаблонов радиации объектов, подсчитываемых по договорам, технически базирующуюся на испытаниях их системы радиационной инспекции первого поколения, проведенных на заводе "Пантекс" и продемонстрировавших, что система TRIS может надежно идентифицировать различные типы боеприпасов и их компонентов, таких, как центральные металлические узлы и сборочные узлы в контейнерах. Впоследствии Национальные лаборатории Сандия разработали доверительную систему радиационной идентификации следующего поколения (NG-TRIS)⁹ для безопасного совместного мониторинга и верификации секретных образцов. Вся секретная информация и операционное программное обеспечение системы NG-TRIS защищены безопасным, инспектируемым и обнаруживаю-

щим вмешательство корпусом. Используются также дополнительные средства аутентификации его физической целостности и идентичности, использующие этикетку с отражающими частицами, применение которой обеспечивает и уникальный идентификатор, и указание на попытку вмешательства при ее прикреплении на сварочный шов или на другую точку соединения на объекте.

Таблица 1. Развитие системы верификации, основанной на подходе шаблона.

Период	Система	Разработчик	Радиационные измерения	Информационный барьер
1988 – 1991	CIVET: Верификационная технология с контролируемой интрузивностью	Брукхейвенская национальная лаборатория	Пассивные, гамма-лучи (гамма-спектрометр высокого разрешения)	Есть
1999 – 2001	TRIS: Доверительная система радиационной идентификации	Национальные лаборатории Сандия	Пассивные, гамма-лучи (гамма-спектрометр низкого разрешения)	Есть
2007 –	NG-TRIS: Доверительная система радиационной идентификации следующего поколения	Национальные лаборатории Сандия	Пассивные, гамма-лучи (гамма-спектрометр низкого разрешения)	Есть
1984 –	(F)NMIS: (Полевая) система идентификации ядерных материалов	Окриджская национальная лаборатория	Активные нейтронные измерения	(Нет)

Поскольку уран-235 излучает гамма-кванты малой энергии с небольшой интенсивностью, которые легко поглощаются в других материалах боеприпаса, и от которых легко защититься, то гамма-излучение от таких боеприпасов может оказаться слишком слабым для того, чтобы предоставить полезный шаблон. Для обеспечения надежных сигнатур в таких условиях были предложены системы активных шаблонов. В таких системах для генерации событий деления в плутонии и уране боеприпаса используется внешний источник излучения. Одним важным примером является система идентификации ядерных материалов (NMIS)¹⁰, которая разрабатывается в Окриджской национальной лаборатории с 1984 года, и в которой активные или пассивные измерения нейтронов и гамма-лучей используются для определения характеристик или устройств, содержащих расщепляющиеся материалы¹¹. Ее полезность для идентификации шаблонов была продемонстрирована в "слепом" эксперименте, в котором прибор правильно различил 16 различных типов боеприпасов и компонентов боеприпасов. Недавние разработки для системы NMIS включают возможность получения изображений для быстрых нейтронов и полевой вариант прибора (FNMIS). Представляется, что система NMIS хорошо приспособлена к обнаружению защищенного высокообогащенного урана и плутония, но, по-видимому, она все еще не приспособлена к концепции информационного барьера.

Подход атрибута

Подход атрибута заключается в подтверждении характеристик, внутренне присущих ядерным боеприпасам и их компонентам. В Соединенных Штатах, зачастую в сотрудничестве с Россией, был предложен набор атрибутов для характеристики ядерных боеприпасов с высокой степенью уверенности. Для надежной аутентификации следует выбирать такие атрибуты, которые могут быть легко измерены, и которые делают мошенничество трудным и дорогостоящим; в идеальной ситуации объекты, которые не являются боеголовками или компонентами боеголовок, не должны будут одновременно удовлетворять всем атрибутам. Насколько нам известно, ядерные боеприпасы содержат килограммовые количества расщепляющегося материала, то есть плутония или высокообогащенного урана¹². Поэтому присутствие расщепляющегося материала может служить основным атрибутом боеголовки или компонента боеголовки.

В рамках подхода атрибута стороны должны будут согласовать одно пороговое значение (или более), характеризующее инспектируемый образец (например, больше, чем 2 кг плутония). Для того, чтобы быть аутентифицированным, инспектируемый образец может пройти несколько проверок атрибутов; должен быть также использован информационный барьер для защиты секретной информации, содержащейся в радиационных измерениях. Преимущества и ограничения методики измерения атрибутов для аутентификации боеголовок рассматривались и обсуждались ранее¹³. В этой статье приводится только краткий обзор развития систем измерения атрибутов. В 1990-х годах из-за необходимости согласования мероприятий по увеличению про-

значности для верификации оружейного происхождения плутония, который должен был помещаться в хранилище на комбинате "Маяк" в России и неразрешенных проблем секретности в отношении к шаблонам¹⁴, большая часть работ по исследованиям и разработкам перешла от методов, основанных на шаблонах, к измерениям атрибутов.

Было разработано и продемонстрировано несколько систем измерения атрибутов, использующих как пассивные, так и активные методы, хотя в конце 1990-х годов большая часть работ замедлилась. Краткий перечень предложенных атрибутов и соответствующих систем измерения приведен в таблице 2.

Таблица 2. Развитие системы верификации, основанной на подходе шаблона.

Атрибуты	Системы измерения атрибутов						
	TRADS (США)	AVNG (Россия)	AMS/IB (США)	NG-AMS (США)	3GAMS (США)	UKNI (Великобритания – Норвегия)	INPC (Китай)
Присутствие плутония	(√)	√	√	(√)	√	√	√
Изотопы плутония	√	√	√	√	√	√	√
Масса плутония	√	√	√	√	√	√	√
Возраст плутония			√	√	√	√	√
Присутствие оксида			√				√
Симметрия			√				√
Присутствие урана-235					√		
Обогащение урана					√		
Масса урана-235					√		
Присутствие взрывчатого вещества					√		

Примечание. Как указано в тексте, до сих пор на стадии исследований использовались только источники гамма-лучей.

Национальные лаборатории Сандия разработали типичную пассивную систему – доверительную демонстрационную систему радиационного атрибута (TRADS)¹⁵, которая подтверждает атрибуты плутония оружейного качества и высокообогащенного урана в ядерных боеголовках или компонентах боеголовок, используя только детектор с высокочистым германием. Для приема и анализа данных и для удовлетворения потенциальных нужд режима контроля над вооружениями, в котором ядерные боеприпасы должны инспектироваться переносной системой, был впервые применен "доверительный процессор".

В соответствии с трехсторонней инициативой (1996-2002) ученые Российского федерального ядерного центра (ВНИИЭФ) при поддержке Лос-Аламосской национальной лаборатории и Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса сконструировали и разработали систему верификации атрибутов (AVNG)¹⁶ с информационными барьерами для измерения массы и изотопного состава. Были реализованы измерения трех атрибутов "присутствия плутония", "массы плутония 2 кг" и "изотопного состава плутония (Pu-240:Pu-239 0,1)"¹⁷ с помощью счетчика множественности нейтронов и системы спектрометра гамма-лучей. В конце периода действия трехстороннего соглашения изготовление, сертификация и демонстрация системы AVNG еще не были полностью закончены. После рассмотрения в обеих правительствах соглашение по обмену в области безопасности и защите ядерных боеголовок между Соединенными Штатами и Российской Федерацией утвердило проведение работ для завершения проекта. В июне 2009 года в Сарове, Россия, была проведена демонстрация системы AVNG перед совместной американо-российской аудиторией. Демонстрация включала в себя испытания в защищенном режиме и в открытом режиме работы AVNG с использованием набора эталонных плутониевых материалов с массой в несколько килограммов¹⁸.

Другим важным прецедентом стала демонстрация технологии прозрачности расщепляющихся материалов, проведенная в августе 2000 года в Лос-Аламосской национальной лаборатории. Технические эксперты США представили систему измерения атрибутов с информационным барьером (AMS/IB)¹⁹ делегации российских официальных лиц. Система была сконструирована и разработана группой из нескольких лабораторий, включая Лос-Аламосскую национальную лабораторию, Ливерморскую национальную лабораторию имени Лоуренса и Тихоокеанскую северо-западную национальную лабораторию. Результаты инспекции с использованием информационного барьера были представлены в простом режиме "да/нет" для каждого из шести атрибутов плутония (см. таблицу 2) для подтверждения того, что инспектируемые образцы обладают объявленными характеристиками¹⁹.

В 2005-2008 годах была разработана и построена система измерения атрибутов следующего поколения (NG-AMS)²⁰ с имеющимися в продаже аппаратными средствами и программным обеспечением с использованием случайной выборки с целью увеличения доверия к системе. Система NG-AMS определяла три атрибута: изотопный состав, массу и возраст плутония²¹. Впоследствии на этой базе была разработана система измерения атрибутов третьего поколения (3G-AMS)²² с финансированием от Управления ядерной верификации в Национальном агентстве по ядерной безопасности. По сравнению с предыдущими системами измерения атрибутов система 3G-AMS не только измеряет параметры, относящиеся к плутонию, но и учитывает также возможное присутствие урана и взрывчатых веществ.

Учеными из Великобритании и Норвегии в рамках Инициативы Великобритании и Норвегии была совместно разработана система измерения атрибутов гамма-излучения с встроенным информационным барьером. Эта инициатива направлена на разработку процедур управляемого доступа и информационных барьеров²³. В системе измерения коммерчески доступные детекторы из высокочистого германия используются для получения атрибутов гамма-излучения и определения присутствия плутония и сравнения изотопного состава с заявленным порогом. Для упрощения проведения испытаний системы информационного барьера и для обращения к техническим вопросам без риска обсуждения секретных характеристик материалов был разработан макет ядерной бомбы "Один" с двумя гамма-источниками с кобальтом-60 и натрием-22 для моделирования излучения плутония и выполнения верификационной задачи.

В течение двух последних десятилетий Китай продолжал проводить независимые исследования технологий верификации контроля над ядерными вооружениями, такие, как технология аутентичности ядерных боеголовок и их компонентов, технология информационного барьера, и технология мониторинга процесса демонтажа. В 2011 году в Институте ядерной физики и химии Китайской академии прикладной физики была разработана и завершена система измерения атрибутов плутониевых сборочных узлов с информационным барьером, показанная на рисунке 1²⁴. Эта система функционально подобна системе AMS/IB. Она была разработана специально для реализации аутентификации плутониевых сборочных узлов и предоставляла верификационные возможности для шести атрибутов плутония. Кроме того, была добавлена подсистема автоподстройки для испытываемых образцов и подсистема пассивного измерения гамма-излучения для определения атрибута симметрии, позволяющие усилить надежность возможность адаптации к различным сценариям верификации.



Рисунок 1. Система измерения атрибутов плутониевых сборочных узлов с информационным барьером.

©Institute of Nuclear Physics and Chemistry in China Academy of Engineering Physics.

Воспроизведено с разрешения Института ядерной физики и химии Китайской академии прикладной физики. Разрешение для повторного использования должно быть получено от правообладателя.

Сравнение подходов шаблона и атрибутов

Подходы шаблонов и атрибутов обладают своими преимуществами и недостатками. Например, в обоих подходах необходимо производить измерения согласованного набора характеристик. Несмотря на то, что в подходе атрибутов имеется возможность аутентифицировать систему измерения, используя несекретные стандарты без необходимости сохранения секретных данных для дальнейших сравнений, он не позволяет идентифицировать конкретный тип ядерных боеприпасов или их компонентов. Сравнение подходов атрибута и шаблона для применения в аутентификации ядерных боеголовок приведено в таблице 3²⁵.

Таблица 3. Сравнение подходов атрибута и шаблона.

Атрибуты	Шаблоны
Оцениваются характеристики отдельного образца	Сравнение с эталонным образцом
Требуется информационный барьер	Требуется информационный барьер
Эталонные данные не хранятся	Требуется хранение эталонных данных
Требуется количественное значение и приемлемое отклонение	Количественное значение неизвестно; сравнение параметров является более точным

В целом, существует широкий консенсус в том, что подходы шаблона будут подходить для режима мониторинга, который включает измерения многих образцов одного и того же типа, в то время как подходы атрибута будут более пригодными для режима, включающего образцы, не принадлежащие к одному и тому же типу, но обладающие схожими особенностями. Подход шаблона обычно считается более надежным в противостоянии мошенничеству по сравнению с подходом атрибута, в то время как подход атрибута можно будет лучше всего применять к ядерным боеприпасам в дополнение к подходу шаблонов для того, чтобы получить дополнительную уверенность в том, что инспектируемые образцы являются подлинными.

Информационные барьеры

В большинстве сценариев верификации ядерных боеголовок никакие измерения радиации инспектируемых образцов не могут проводиться, если только секретная информация не будет надежно защищена. Эта проблема хорошо известна специалистам-практикам и принимающим решения лицам, и она изучалась ранее в национальных лабораториях Соединенных Штатов, России и Великобритании в аспекте применения информационных барьеров.

Информационные барьеры представляют собой конструктивно сложные системы аппаратных средств и программного обеспечения, на вход которых подаются секретные радиационные сигнатуры и результаты измерений, а на выходе появляется простой несекретный результат наблюдения (например, ответ "да или нет" о присутствии атрибута). Такие системы гарантируют принимающей стороне, что секретная информация никогда не попадет к инспектирующей стороне. В литературе подробно обсуждались фундаментальные функциональные требования к этим системам^{26,27}.

С точки зрения принимающей стороны важнейшим требованием к информационному барьеру является то, что секретная информация должна быть в высокой степени защищенной, или, иначе говоря, система никогда не сможет случайно выдать такую информацию и что утечка такой информации по неизвестному "побочному каналу" будет исключена. С точки зрения инспектирующей стороны ключевым требованием является получение адекватной информации для получения обоснованной уверенности в декларации принимающей стороны. Такая уверенность может быть создана и усилена посредством аутентификации и сертификации каждого компонента аппаратных средств и программного обеспечения системы информационного барьера для того, чтобы убедиться в отсутствии скрытых лазеек или "тroyанских коней". Неотъемлемая проблема применения информационного барьера состоит в том, что обе стороны должны будут доказать, что у них нет никаких скрытых от инспектора "лазеек", которые могли бы быть использованы для того, чтобы заставить систему декларировать недопустимые объекты как аутентичные, и что у них нет никаких неизвестных принимающей стороне побочных каналов, через которые секретная информация может стать доступной инспектору или другим лицам. Эти опасения являются серьезными препятствиями для принятия подобных систем.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД

Для того, чтобы избежать проблемы аутентификации системы информационного барьера, ученые Принстонского университета предложили фундаментально различный подход – так называемый протокол нулевой осведомленности²⁸. Вместо того, чтобы получать и затем анализировать секретные данные за конструктивно сложным информационным барьером, в этом новом подходе применяется криптографическое понятие доказательств с нулевой осведомленностью, обеспечивающее то, чтобы секретная информация никогда не изменялась и, соответственно, не было необходимости ее скрывать. Предлагаемая система инспекции с протоколом нулевой осведомленности совмещает активную методику измерения нейтронов высоких энергий с неэлектронными детекторами с использованием подхода соответствия шаблону²⁹. По существу, предлагаемая система базируется на прохождении нейтронов через боеголовку в контейнере и дает нулевой результат, если образец соответствует тому, что заявила принимающая сторона.

Этот подход все еще находится на стадии доказательства принципа. Предлагаемая система инспекции основана на активном исследовании испытываемого объекта нейтронами с энергией 14 МэВ, включающему как томографические исследования прохождения, которые чувствительны к конфигурации боеголовки, так и измерения рассеяния и деления, которые чувствительны к свойствам материала. Расчеты сценариев, в которых материал был извлечен из испытываемого объекта, показывают, что высокая степень дискриминации может быть достигнута и при нулевом раскрытии информации. Недавно была также предложена установка с нейтронами двух энергетических групп³⁰. Комбинируя дейтериево-третиевый нейтронный источник высоких энергий (14 МэВ) с протон-литиевым источником меньших энергий, система сможет лучше различать изотопный состав различных композиций урана и плутония.

ПЕРСПЕКТИВЫ: ЧТО ПОТОМ?

Речь президента США Барака Обамы в Праге в 2009 году, в которой он обрисовал свое видение "стремления к миру и безопасности в мире без ядерного оружия"³¹, придала новый импульс дебатам по ядерному разоружению во всем мире. Другие страны, обладающие ядерным оружием, также подтвердили недавно свою приверженность ядерному разоружению. Активная поддержка и продвижение Китаем полного запрещения и абсолютного уничтожения ядерного вооружения открывает путь к многосторонним подходам к этому вопросу³². На этом пути к миру, свободному от ядерного оружия, одной из проблем для любого существенного сокращения вооружений может стать верификация запасов боеголовок, то есть подтверждения правильности и полноты деклараций, предъявленных ядерными державами по своим ядерным арсеналам. Здесь всегда будет присутствовать фундаментальная напряженность между интрузивной верификационной деятельностью и жесткими требованиями по физической безопасности, информационной безопасности и защите. Аутентификация ядерных боеголовок без раскрытия секретной информации представляет собой качественно новую проблему для международной инспекции контроля над вооружениями.

Для того, чтобы способствовать укреплению доверия для нового раунда двусторонних и, возможно, многосторонних переговоров по контролю над вооружениями с целью глубоких сокращений ядерных арсеналов, следует как можно быстрее создать сеть лабораторий с международным участием, охватывающим как ядерные державы, так и страны, не обладающие ядерным оружием³³. Такое международное сотрудничество должно будет действовать в тех специфических направлениях, которые требуют дальнейшей проработки, включая:³⁴

Создание универсального испытываемого объекта

Для разработки систем инспекции, которые могли бы быть использованы в двусторонней или многосторонней верификации договоров, все партнеры должны будут согласовать требования к рабочим характеристикам таких систем. Для демонстрации возможностей предлагаемой системы исключительно полезным стал бы общепринятый эталонный образец. Такой универсальный испытываемый объект (УИО) позволил бы всесторонне исследовать и сравнивать преимущества и недостатки различных систем верификации, что крайне важно для принятия конструктивных решений и усиления всеобщей уверенности в процессе.

Определение набора согласованных минимальных атрибутов

Как отмечалось в разделе о концепциях, несколько обладающих ядерным оружием стран уже сконструировали и разработали одну, или более, систему инспекции на базе атрибутов. Поэтому вероятно, что первые

совместно разработанные системы также будут основаны на подходе атрибутов. По некоторым из базовых атрибутов боеголовки, таким, как присутствие плутония (или высокообогащенного урана), имеется широкое согласие, но по точному пороговому значению для базовых атрибутов консенсуса нет; а также широкое согласие отсутствует по некоторым другим атрибутам, например, по относящимся к геометрии или конфигурации. Единственным способом для окончательного определения набора согласованных минимальных атрибутов являются совместные международные исследования.

Конструирование аутентифицированного информационного барьера

В стандартной системе верификации ядерных боеголовок к системе должен быть добавлен информационный барьер для скрытия засекреченной информации. Хотя первичная задача информационного барьера состоит в защите секретной информации, имеются также, как отмечалось ранее, опасения, связанные с аутентификацией аппаратных средств и программного обеспечения информационного барьера. Хотя в почти каждой стране, обладающей ядерным оружием, уже накопился значительный опыт конструирования информационных барьеров, до сих пор не существует единых рамок для конструкции информационного барьера, или соглашения по общим стандартам. Совместные усилия по разработке аутентифицированных информационных барьеров могут помочь снять некоторые из имеющихся опасений.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Christine Comley et al., "Confidence, Security & Verification: The Challenge of Global Nuclear Weapons Arms Control." (Atomic Weapons Establishment, Aldermaston, U.K., 2000), 12-21.
2. Brian Anderson et al., "Verification of Nuclear Weapon Dismantlement: Peer Review of the U.K. MoD Programme," British Pugwash Group, 2012.
3. David Spears (Ed.) *Technology R&D for Arms Control*, (Washington D.C.: U.S. Department of Energy, Office of Nonproliferation Research and Engineering, 2001).
4. National Academy of Sciences, *Monitoring Nuclear Weapons and Nuclear-Explosive Materials: An Assessment of Methods and Capabilities* (Washington, D.C: National Academies Press, 2005), BOX 2-4A, 99.
5. *Monitoring Nuclear Weapons and Nuclear-Explosive Materials*, BOX 2-2, 92-94.
6. Cesar Sastre, "CIVET a Controlled Intrusiveness Verification Technology," Brookhaven National Laboratory, 1988, (BNL-90156-1988).
7. Peter B. Zuhoski, Joseph P. Indusi, and Peter E. Vanier, "Building a Dedicated Information Barrier System for Warhead and Sensitive Item Verification," Brookhaven National Laboratory (BNL-66214). Peter E. Vanier et al., "Study of CIVET Design of a Trusted Processor for Non-intrusive Measurements," 42nd Annual INMM Meeting, 15-19 July 2001, Indian Wells, CA.
8. Kevin D. Seager et al., "Trusted Radiation Identification System," 42nd Annual INMM Meeting, 15-19 July 2001, Indian Wells, CA.
9. Peter B. Merkle et al., "Next Generation Trusted Radiation Identification System," 51st Annual INMM Meeting, 11-15 July 2010, Baltimore, MD.
10. L. G. Chiang et al., "Nuclear Materials Identification System Operations Manual," Oak Ridge National Laboratory, 2001 (ORNL/TM-2001/65) Rev. 2.
11. В режиме активного расследования сигнатуры расщепляющегося материала, используемые для эталонного шаблона, могут быть точно охарактеризованы и защищены посредством использования методами зависящих от времени совпадений и корреляции с информационным барьером.
12. Соединенные Штаты рассекретили тот факт, что "во всех американских центральных металлических узлах, содержащих плутоний, имеется по крайней мере 500 граммов плутония" (RDD-8), Был также рассекречен тот факт, что "гипотетически, масса в 4 кг плутония или урана-233 достаточна для одного ядерного взрывного устройства".
13. Malte Gottsche and Gerald Kirchner, "Measurement Techniques for Warhead Authentication with Attributes: Advantages and Limitations," *Science & Global Security*, 22 (2014): 83-110.
14. Zarimpas, Nicholas (ed.), *Transparency in Nuclear Warheads and Materials: The Political and Technical Dimensions*, (Stockholm: Sipri, 2003), Appendix 8A, 166. Тем не менее, наконец Россия приняла решение хранить на комбинате "Маяк" только плутониевые детали, преобразованные в несекретные формы. Верифицировать, произошел ли материал из боеголовок, или нет, невозможно. Измерения атрибутов не были реализованы для верификации компонентов боеголовок.
15. Dean J. Mitchell and Keith M. Tolk, "Trusted Radiation Attribute Demonstration System," presented at INMM 41st

- Meeting, New Orleans, 16-20 July, 2000.
16. Sergey Razinkov et al., "AVNG System Objectives and Concept," 51st Annual INMM Meeting, 11-15 July 2010, Baltimore, MD. 51st Annual INMM Meeting, 11-15 July 2010, Baltimore, MD.
 17. Alexander Modenov et al., "AVNG System Software—Attribute Verification System with Information Barriers for Mass And Isotopics Measurements," 46th Annual INMM Meeting, 10-14 July 2005, Phoenix AZ.
 18. Sergey Kondratov et al., "AVNG System Demonstration," Los Alamos National Laboratory, 2010 (LA-UR-10-02620).
 19. "Technical Overview of Fissile Material Transparency Technology Demonstration—Executive Summary," http://www.lanl.gov/orgs/n/n1/FMTTD/presentations/pdf_docs/exec_sum.pdf. Diana G. Langner et al., "Attribute Verification Systems with Information Barriers for classified forms of Plutonium in the Trilateral Initiative," Symposium on International Safeguards, Vienna, Austria, October 29-November 1, 2001, IAEA-SM-367/17/02.
 20. Jason Shergur et al., "An Overview of the Design of a Next Generation Attribution Measurement System," 46th Annual INMM Meeting, 10-14 July 2005, Phoenix AZ.
 21. Кроме того, в системе были успешно продемонстрированы два существенных достижения. Одно улучшение было связано с использованием двух слабых гамма-источников с сильно различающимися временами жизни (один долгоживущий и другой короткоживущий), смонтированных на германиевом детекторе для замены питающихся от батареи часов реального времени. Вторым улучшением стало включение в систему вычислительного блока, гораздо более простого по сравнению с любой системой измерения атрибутов, разработанной в лабораториях США.
 22. Jonathan Thron et al., "Designing a 3rd Generation, Authentication Attribute Measurement System," Los Alamos National Laboratory, 2009, (LA-UR-09-03569). Dan Archer, "Third Generation Attribution Measurement System," 53st Annual INMM Meeting, 10-14 July 2012, Orlando, FL. Glen Warren et al., "Concepts for the Measurements Subsystems of the Third Generation Attributes Measurements System," 2012, Pacific Northwest National laboratory, (PNNL-SA-89171).
 23. David M. Chambers et al., "U.K.-Norway Initiative: Research into Information Barriers to Allow Warhead Attribute Verification Without Release of Sensitive or Proliferative Information," 51st Annual INMM meeting, 2010, Baltimore, MD, 11-15 July 2010.
 24. <http://www.caep.ac.cn/kxjsnew/yjz/wlx/13392.shtml> и <http://vip.dglib.cn:8080/FKArticleSearch.aspx?ID=41664840#> (на китайском языке)
 25. *Transparency in Nuclear Warhead and Materials: the Political and Technical Dimensions*, Appendix 8A.
 26. J. L. Fuller, "The Functional Requirements and Design Basis for Information Barriers," Pacific Northwest National Laboratory, 1999 (PNNL-13285). Duncan W. MacArthur and Rena Whiteson, "Comparison of Hardware and Software Approaches to Information Barrier Construction," *Nuclear Material Management*, July 2000. Duncan W. MacArthur, "Functional Description of an Information Barrier to Protect Classified Information," 40th Annual INMM meeting, 25-29 July 1999, Phoenix, AZ.
 27. Richard Williams et al., "Advances in Information Barrier Design," Los Alamos National Laboratory, 2005 (LA-UR-05-4149).
 28. Alexander Glaser, Boaz Barak, and Robert J. Goldston, "A Zero-Knowledge Protocol for Nuclear Warhead Verification," *Nature 510*: (2014) 497-502.
 29. Проще говоря, подсчет нейтронов, проходящих через боеголовку, будет создавать нейтронную радиограмму (для ссылки обозначим ее как T); для того, чтобы не смотреть эту радиограмму, и, следовательно, получать информацию, относящуюся к распространению, инспектор будет использовать детекторы, в которые принимающая сторона предварительно загружает негатив радиограммы боеголовки ($-T$). Таким образом, если образец является подлинным, то инспектор увидит нулевой сигнал: $-T+T=0$. После этого инспектор может подтвердить, что образец соответствует декларации, не имея информации о его детальном устройстве.
 30. Jie Yan and Alexander Glaser, "Two-Color Neutron Detection for Zero-Knowledge Nuclear Warhead Verification," 56th annual INMM meeting, 12-16 July 2014, Indian Wells, California. Смотрите также: Robert J. Goldston et al., "Zero Knowledge Warhead Verification: System Requirements and Detector Technologies," 55th annual INMM meeting, 20-24 July 2014 Atlanta, GA.
 31. Briefing Room, The White House, http://www.whitehouse.gov/the_press_office/Remarks-By-President-Barack-Obama-In-Prague-As-Delivered, 5 April 2009.
 32. Preparatory Committee for the 2015 Review Conference of the Parties to the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, Implementation of the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, Submitted by the People's Republic of China, 2014.
 33. Недавно Томас Е. Ши и Лаура Роквуд предложили создать "Центр МАГАТЭ по исследованиям и разра-

боткам для верификации ядерного разоружения". Поначалу задачи и миссия центра могут заключаться в "общих исследованиях и разработках, включая концепции, технологии и подходы к верификации, а также физические методы, атрибуты и информационные барьеры". Thomas E. Shea and Laura Rockwood, "IAEA Verification of Fissile Material in Support of Nuclear Disarmament" (Annex A), Belfer Center, Harvard University, Cambridge, MA, May 2015.

34. Организация "Инициатива ядерной угрозы" (NTI) недавно предложила дополнительный перечень рекомендаций по будущим работам в этой области. "Innovating Verification: New Tools & New Actors to Reduce Nuclear Risks, Verifying Baseline Declarations, of Nuclear Warheads and Materials," 2014, 7-8, 42-43.