

БУДУЩЕЕ ЯДЕРНОЙ АРХЕОЛОГИИ: СОКРАЩЕНИЕ РИСКОВ НАСЛЕДИЯ ОРУЖЕЙНЫХ РАСЩЕПЛЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

***Томас У. Вуд, Брюс Д. Рейд, Кристофер М. Туни, Каннан Кришнасвами,
Кимберли А. Бернс, Ларри О. Касацца, Дон С. Дейли, и Лиза Л. Дакворс***

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается обоснование технических возможностей и программы применения «ядерной археологии», направленной на разрешение неопределенностей, относящихся к производству и использованию оружейных расщепляющихся материалов. Главная тема этого направления состоит в том, что никогда нельзя быть уверенным в том, что весь расщепляющийся материал надежно защищен, без ясного понимания того, что означает «весь», и что неопределенность в этом вопросе порождает риск. Мы утверждаем, что это предложение так же действительно сегодня, когда появляются ядерные угрозы на уровне государств, и, возможно, на негосударственном уровне, как оно было в контексте ситуации сразу же после окончания холодной войны, и мы рассматриваем как методы ядерной археологии могут быть использованы для верификации деклараций о расщепляющихся материалах, или для оценки и характеристики производства расщепляющихся материалов вне зависимости от деклараций. Были продемонстрированы методы для точной оценки производства плутония на графитовых реакторах, которые могут быть распространены на реакторы других типов. Предлагаемые методы для оценки производства ВОУ подают надежды, и их разработка продолжается.

Авторы статьи работают в Тихоокеанской Северо-западной национальной лаборатории США, Ричленд, штат Вашингтон, США.

Почтовый адрес для корреспонденций: Thomas W. Wood, PNNL, 902 Battelle Blvd, Richland, WA 99354, USA.
Адрес электронной почты: thomas.wood@PNNL.gov

Статья получена 2 марта 2013 года и принята к публикации 3 октября 2013 года.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ

В 1993 году Стив Феттер призвал к осуществлению программы «ядерной археологии» для прояснения исторических записей о производстве плутония и высокообогащенного урана (ВОУ) в период холодной войны¹. В это время было широко распространено мнение о том, что Соединенные Штаты и Россия представят обоюдные декларации о производстве оружейных материалов, и что появление таких деклараций приведет к возможностям их технической верификации.

Исследование этой концепции, финансируемое Управлением исследований и разработок Министерства энергетики (DOE/NN-20) и проведенное Тихоокеанской Северо-западной национальной лабораторией (PNNL) с поддержкой Ок-Риджской площадки, изучило техническую реализуемость верификационных измерений и анализа производства как плутония, так и ВОУ. Это исследование привело к аналитической и экспериментальной программ, которые продемонстрировали высокоточную методику изотопных отношений для определения производства плутония в графитовых реакторах.

Результатом этих программ стало создание работоспособных методик для сбора образцов, подготовки образцов, аналитической химии, и физики реакторов, которые обеспечили возможность проведения оценок производства плутония за время работы реактора со стандартными ошибками меньше 2% для хорошо охарактеризованных графитовых реакторов². Оценка полного производства плутония на нескольких графитовых реакторах позволит получить еще большую точность за счет агрегирования независимых составляющих ошибок³. Этот метод был распространен на другие конструкции реакторов и сделан более практичным благодаря усовершенствованию методики подготовки образцов и измерений изотопных отношений.

Хотя в последние 20 лет в верификации производства плутония был достигнут существенный прогресс,

мало что было достигнуто, или даже предпринято в оценке и верификации производства ВОУ. В первоначальном исследовании реализуемости, проведенном PNNL, не было найдено никаких легко применимых сигнатур, с помощью которых можно было непосредственно сделать выводы об истории производства высокообогащенного урана, а последующие активные исследования проблемы верификации ВОУ были приостановлены, поскольку ресурсы были направлены на разработку методов верификации плутония. Сегодня PNNL и другие организации пересматривают техническую осуществимость верификации, или независимой оценки производства ВОУ⁴. Для повторного исследования этого вопроса имеются убедительные причины.

Неопределенность исторического производства ВОУ в бывшем Советском Союзе намного больше, чем для плутония. Неопределенность самых лучших оценок производства ВОУ в России составляет 120 тонн, что соответствует тысячам существенных количеств Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Напротив, Анатолий Дьяков оценивает неопределенность производства плутония в России в 8 тонн⁵. Любая надежда на уверенность в том, что «все запасы» ВОУ были ликвидированы или переведены в режим гарантий, потребует более определенного учета, чем имеющегося в настоящее время.

Договор о прекращении производства расщепляющихся материалов (FMCT), недавно обсуждавшийся на Конференции по разоружению, не относится к запасам ранее произведенных расщепляющихся материалов. В настоящее время договор FMCT рассматривается как осуществимый только пятью постоянными членами Совета безопасности ООН (P-5), ни один из которых не сталкивается ни с какими ограничениями по доктрине ядерного оружия, или по эффективности прекращения производства расщепляющихся материалов. Для намного более полного режима расщепляющихся материалов, в отношении как области действий договора, так и возможностей технической верификации понадобятся надежные технические возможности (в том числе и методы верификации производства ВОУ). Такой договор между странами группы P-5 мог бы в конце концов привести к более широкому режиму прозрачности расщепляющихся материалов⁶.

Мир, в котором ядерная археология⁷ могла бы быть применена к проблеме прозрачности расщепляющихся материалов, сильно отличается от того, которого ожидали сразу же после развала Советского Союза и когда появился этот термин. В частности, уровень доверия между Соединенными Штатами и Россией, может и не быть ключевым движителем в верификации запасов расщепляющихся материалов. Напротив, совместная ответственность США и России в установлении высокого стандарта и примера для остального мира, а также стремление к прочному техническому основанию для учета расщепляющихся материалов на государственном уровне в глобальном масштабе, могут стать ключевыми мотивирующими факторами в методах разработки и раннего применения.

ОРГАНИЗАЦИЯ СТАТЬИ

Данная статья состоит из следующих разделов:

- **Ядерная археология – краткая история:** представляет краткую сводную историю методов ядерной археологии, разработанных в PNNL и других лабораториях в течение последних двадцати лет, в основном направленных на верификацию производства плутония, и завершается сводкой статуса археологических методов.
- **Текущее состояние знаний о производстве расщепляющихся материалов:** подытоживает текущий уровень знания общемирового производства расщепляющихся материалов на уровне стран, включая количественные оценки неопределенности для объема производства и запасов⁸. Это представляет текущую стартовую линию, с которой может начаться программа прозрачности расщепляющихся материалов.
- **Обобщение концепции ядерной археологии:** описывает полезность концепции за пределами верификации производства для включения утилизации и ликвидации расщепляющихся материалов. Это отражает тот факт, что и контроль над вооружениями, и распоряжение излишками расщепляющихся материалов потребует длительных промежутков времени.
- **Перспективная точность ядерной археологии:** изучает, насколько неопределенность текущих оценок может быть уменьшена с течением времени, чтобы быть минимизированной к моменту крайне важной «завершающей стадии» ядерного разоружения.
- **Резюме и выводы:** представляет конкретные рекомендации для ближайших действий.

ЯДЕРНАЯ АРХЕОЛОГИЯ – КРАТКАЯ ИСТОРИЯ

Развитие ядерной археологии было мотивировано следующими принципами: 1) неопределенность в управлении расщепляющимися материалами неминуемо приведет к увеличению риска, и 2) самые большие

перспективы уменьшения риска должны привести к инвестициям в этой области. Учитывая, что последствия отвлечения ядерных материалов (будь то внутри страны или в группу, стремящуюся к ядерным возможностям) неоспоримо будут такими же большими, как они были всегда, уменьшение неопределенности в отношении производства, запасов, и гарантированного распоряжения расщепляющимися материалами являются целью для методов ядерной археологии. Применение этих принципов требует, чтобы мы начали с лучшего возможного учета, доступного в настоящее время.

Первоначальное исследование осуществимости, проведенное в PNNL и на Ок-Риджском газодиффузионном заводе, привело к выводу, что изотопные отношения в продуктах активации при облучении нейтронами примесей к графиту реактора предлагают многообещающую сигнатуру, которую можно использовать для оценки нейтронного флюенса, и, соответственно, интегрального производства плутония. В течение почти двадцати лет после проведения этого исследования была проведена серия все более перспективных и усложненных экспериментов для развития, подтверждения, и обобщения подготовительного и аналитического базиса для оценок производства плутония. Сейчас этот метод был продемонстрирован для ассортимента изотопов, суммарно обеспечивающих чувствительность в широком диапазоне нейтронных флюенсов. В дополнение к строго экспериментальным достижениям программа позволила построить операционные возможности для сбора образцов в полевых условиях и их анализа. В таблице 1 приведена сводка некоторых из ключевых событий этой программы. Самое примечательное состоит в том, что эта программа продемонстрировала в масштабах реактора технику изотопных отношений^{9,10} для оценки производства плутония в графитовых реакторах с высокой точностью¹¹.

Таблица 1. Временная шкала ядерной археологии.

Год	Событие
1992	Стив Феттер опубликовал первую статью по «ядерной археологии».
1993	Начат проект PNNL по оценке осуществимости, сначала был рассмотрен метод изотопного отношения для графитовых реакторов.
1993	Исследования с моделированием в PNNL показали многообещающую ожидаемую точность.
1994	Первые исследования характеристики элементов в архивах графита PNNL.
1994	Подтверждение принципа для метода изотопных отношений в графите (GIRM) для облученного в реакторе Hanford-C и французском реакторе P2 графита.
1994	Методы масс-спектрометрии с тепловой ионизацией (TIMS), разработанные и использованные для титана и кальция в качестве индикаторных элементов.
1995–1996	Полномасштабная демонстрация метода GIRM на коммерческом реакторе Magnox Trawsfynydd-II в Великобритании.
1997	Усилия по продвижению применения метода GIRM на реакторы с низким флюенсом.
1998	Разработаны методы масс-спектрометрии с вторичной ионизацией для использования бора в качестве индикаторного элемента в применении к малым флюенсам.
1999	Разработаны методы TIMS для использования урана и плутония в качестве индикаторных элементов, в первую очередь для приложения к низким флюенсам.
2000	Демонстрация подтверждения принципа для приложения метода GIRM для низких флюенсов на реакторе VEPO в Великобритании.
2001	Разработка специального оборудования для сбора образцов графита для метода GIRM.
2002	Образование базирующейся в Великобритании группы сбора образцов графита с оборудованием.
2002	Начата разработка метода для распространения методов изотопных отношений на другие реакторы, такие, как исследовательские.
2003	Разработка возможности использования метода SIMS для оценки индикаторных элементов хлора, титана и бора, а также метода TIMS для урана и плутония в активированных металлах.
2004	Демонстрация подтверждения принципа для приложения метода IRM к исследовательскому реактору Michigan's Ford.
2005–2006	Демонстрация подтверждения принципа для приложения метода IRM к исследовательскому реактору российской разработки (Грузия, Тбилиси).
2007	На комплексах в США и Великобритании организованы квалифицированные лаборатории для метода GIRM.
2010	Демонстрация оборудования для сбора образцов для метода IRM на исследовательских реакторах.
2011	Образование базирующейся в США группы сбора образцов графита с оборудованием.
2012	Демонстрация подтверждения принципа для приложения метода IRM к тяжеловодным реакторам

Этот метод был распространен на другие конструкции реакторов с использованием металлических образцов из элементов конструкции активной зоны, и сделан намного более практичным из-за улучшения методов аналитической химии для подготовки образцов и измерений изотопных отношений.

Методы изотопных отношений для количественной оценки производства плутония проявляют некоторые ключевые особенности с точки зрения приложений. Во-первых, они в основном были разработаны и опубликованы на несекретной основе. Поэтому их основная феноменология доступна для любых заинтересованных сторон, а надежность метода хорошо обоснована и общепризнана. Ядерные поперечные сечения и природные рас-

пространности изотопов, определяющие точно метода, известны с большой уверенностью и высокой точностью, и они опубликованы в стандартных ядерных библиотеках. Во-вторых, этот метод может базироваться на изотопных отношениях для нескольких элементов (включая бор, кальций, гафний, таллий, плутоний и уран), что делает его широко применимым как для графитовых реакторов, в которых состав примесей меняется в широких пределах, но обычно включает несколько полезных индикаторных элементов, так и к другим реакторам, которые обычно содержат полезные индикаторы в металлических сплавах в конструкционных элементах активной зоны. В-третьих, использование нескольких индикаторных элементов в конкретном реакторе может значительно уменьшить ошибку и повысить надежность метода. И, наконец, в методе используются изотопные отношения для стабильных или долгоживущих изотопов, что делает «сигнал» перманентным, а не затухающим со временем.

Хотя в исследованиях и разработках верификации производства плутония еще многое следует сделать, работы последних двадцати лет заложили относительно сформировавшиеся возможности с предполагаемой точностью, которая считается лучше, чем официальные американские оценки производства плутония, и намного лучше, чем неофициальные оценки российского производства оружейного плутония. В перспективе исследований, разработок и методики, проблема оценки исторического производства ВОУ является технически более требовательной, и экспериментально намного менее развитой¹².

В таблицах 2 и 3 приведена сводка распространения технологий производства расщепляющихся материалов во всем мире и статуса археологических методов для каждой из них. Значения в таблице 2 являются приблизительными, и они предназначены только для того, чтобы передать ощущение важности технологии. Как указано в таблице 3, некоторая работа уже была проведена, или ведется в настоящее время почти по всем важным технологиям, но еще остается выполнить заметный объем исследований и разработок для того, чтобы сделать археологические методы общедоступными для использования в качестве инструментов верификации производства, в особенности для обогащения урана. Текущие параметры экспериментальных работ по этой проблеме рассматриваются в разделе по перспективной точности ядерной археологии.

Таблица 2. Распространение и использование технологии производства расщепляющихся материалов

	Количество стран	Количество заводов	Производство
Производство плутония			
Реакторы с графитовым замедлителем	7	>25	> 250 т
Тяжеловодные реакторы	10	>18	>100 т
Прочие реакторы	4	4	<100 кг
Системы с ускорителями	2	2	Несколько кг
Переработка			
Предприятия по выделению плутония	11	>19	>350 т
Производство ВОУ			
Центрифуги	7	11	>1000 т
Газовая диффузия	5	8	>1000 т
Другие технологии обогащения	3	3	>100 кг

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ЗНАНИЙ О ПРОИЗВОДСТВЕ РАСЩЕПЛЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Определение количества расщепляющихся материалов (определяемых как ВОУ и выделенный плутоний оружейного качества), произведенного и хранящегося в настоящее время, является необходимым первым шагом на пути к любым усилиям по ядерной безопасности, нераспространению, или разоружению между объявленными государствами, обладающими ядерным оружием. Без точных и поддающихся проверке оценок (в пределах приемлемых пределов неопределенности) учет расщепляющихся материалов представляет серьезную проблему. В этом разделе рассматриваются текущие сведения о расщепляющихся материалах на уровне страны, с особым вниманием к степени определенности, с которыми известны объемы производства и запасы.

На январь 2012 года сообщенные национальные запасы расщепляющихся материалов в странах, обладающих ядерным оружием, далеко превосходили их оружейные потребности. В таблице 4 представлена сводка размеров современных запасов расщепляющихся материалов, полученная от Международной группы экспертов по расщепляющимся материалам¹³. В настоящее время на Соединенные Штаты и Россию приходится более 95% современных запасов расщепляющихся материалов. Однако, официальные источники не принимают во внимание любые неопределенности в объемах производства, и, в случае этих двух стран, представляют только расхождения в инвентарных ведомостях. Эти две меры неопределенности, которые часто используются в литературе по производству и запасам расщепляющихся материалов, определены ниже.

Таблица 3. Состояние разработки археологических методов в различных технологиях производства.

Технология производства	Состояние археологических методов
Производство плутония	
Реакторы с графитовым замедлителем	GIRM – хорошо разработана, верификация в масштабе реактора
Тяжеловодные реакторы	IRM в трубопроводах процесса, продемонстрирована на исследовательских реакторах
Прочие реакторы	IRM в элементах конструкции, продемонстрирована на исследовательских реакторах
Системы с ускорителями	Концептуальный подход
Переработка	
Предприятия по выделению плутония	Изотопный анализ материалов поддержки, объемов переработанных отходов, образцов газа для определения запасов плутония
Производство ВОУ	
Центрифуги	Ведется экспериментальная работа с заменителями и компонентами завода
Газовая диффузия	Предложена схема, основанная на осаждении UO_2F_2
Другие технологии обогащения	Концептуальный подход

Таблица 4. Оценки запасов расщепляющихся материалов по странам (Международной группы экспертов по расщепляющимся материалам).

	ВОУ		Оружейный плутоний	
	Запасы	Неопределенности	Запасы	Неопределенности
Россия	737	120	128	8
Франция	30,6	6	6	1,8
Китай	16	4	1,8	0,5
Пакистан	2,75		0,14	
Индия	2		0,05	
КНДР			0,03	
Прочие	20		–	
	ВОУ		Оружейный плутоний	
	Запасы	Разница инвентаризации	Запасы	Разница инвентаризации
США	740,7	3,2	95,4	2,4
Великобритания	21,2	0,22	7,6	0,29

- *Неопределенность объема производства* – это точность, с которой мы знаем совокупное производство данного материала, и она обычно задается либо в тоннах продукции, либо в процентах. Эта мера чаще всего задается как стандартная ошибка (стандартное отклонение) оценки, и она зависит от многих факторов.
- *Разница в инвентаризации* – это разность между совокупным производством и суммой известных использований и текущей инвентаризации. Разница в инвентаризации зависит как от неопределенности в объеме производства, так и от неопределенности совокупного распоряжения, так и корреляции между ними. Вообще говоря, разница в инвентаризации имеет смысл только для точных (с низкой неопределенностью) оценок объема производства.

Состояние знаний для каждой из следующих стран было основано на информации, доступной от Международной группы экспертов по расщепляющимся материалам¹⁴, если это не оговорено иначе.

Россия остановила свой последний реактор для производства плутония в 2010 году и прекратила производство ВОУ для оружия в 1989 году. Хотя в России не была опубликована официальных исторических сводок производства и распоряжения расщепляющимися материалами, недавно было выпущено два отдельных анализа¹⁵ от неправительственных организаций¹⁶. В 2011 году Дьяков сообщил, что российские запасы плутония оружейного качества составляют 128 ± 8 тонн; указанная точность составляет примерно 6% от общего производства. Неопределенность этих оценок в первую очередь обусловлена неопределенностью уровня мощности индивидуальных промышленных реакторов и предполагаемых продолжительностях их работы на таких уровнях мощности. Павел Подвиг опубликовал наиболее определенные оценки российского производства ВОУ с оцениваемыми запасами в 737 ± 120 тонн. Эта неопределенность в производстве ВОУ больше, чем объем всего производства за пределами России и Соединенных Штатов.

Франция публично не раскрывала своих запасов расщепляющихся материалов военного назначения или истории их производства, и до сих пор не было опубликовано никаких неформальных анализов. Хотя Франция остановила производство плутония оружейного качества в 1992 году, лишь в 1996 году было объявлено об определенном окончании производства расщепляющихся материалов и было остановлено производство ВОУ.

На основании доступной информации, запасы расщепляющихся материалов во Франции составляют $6,0 \pm 1,8$ тонн плутония оружейного качества и 31 ± 6 тонны ВОУ. Согласно Информационному МАГАТЭ по Франции (NFCIRC)/549, в декларации по ее гражданским запасам, 4,85 тонны ВОУ было предназначено для гражданских целей¹⁸, и для военных запасов остается 26 ± 6 тонн ВОУ и $6,0 \pm 1,8$ тонн плутония оружейного качества. По отношению к оцениваемому объему производства уровни неопределенности в современных запасах остаются большими, 30% для плутония и 19% для ВОУ.

Великобритания публично раскрыла как свои текущие запасы расщепляющихся материалов, так и историю производства ВОУ и плутония¹⁹. В 1998 году Министерство обороны обозначило 21,9 тонны ВОУ и 6,6 тонны плутония как текущие запасы расщепляющихся материалов. В то время как ВОУ продолжает использоваться в реакторах военно-морского флота и находится вне гарантий, 4,4 тонны плутония объявлены избыточными и помещены под гарантии Евратома²⁰.

В 2006 году производство ВОУ было пересмотрено, и текущий баланс оказался равным 21,64 тонны. Эта проверка, включавшая систематический аудит запасов ВОУ, выявила недостачу в +0,22 тонны, что означало, что имеющееся количество ВОУ было на 0,22 тонны меньше запасов, оцененных по объему производства и предыдущему использованию²¹. Это расхождение было приписано отсутствующим записям, трудностям в интерпретации существующих записей, и неточностям измерений в начальном периоде производства.

Аналогичный анализ производства и запасов выявил разницу в 0,29 тонны между запасами по бухгалтерским книгам и по аудиторской проверке. Это расхождение, так же, как и в случае ВОУ, было приписано плохому качеству и неполноте записей, потенциально отсутствующим записям, и неопределенностью измерений и сбора образцов на начальном этапе программы из-за уровня развития технологии²².

Соединенные Штаты прекратили производство плутония оружейного качества и ВОУ в 1960-х годах, хотя некоторые реакторы, предназначенные в первую очередь для производства трития, продолжали работать до 1980-х годов. В 1987 году все промышленные реакторы Министерства энергетики были выключены. В 1996 году Соединенные Штаты опубликовали отчет под названием «*Плутоний: первые 50 лет*», в котором Министерство энергетики США привело подробности о производстве, приобретении и использовании плутония с 1944 по 1994 годы²³. Согласно этому отчету, Соединенные Штаты произвели в общей сложности 99,5 тонны плутония оружейного качества²⁴. В июне 2012 года был выпущен обновленный отчет под заглавием «*Баланс плутония в Соединенных Штатах, 1994–2009*»²⁵. Согласно обновленному отчету, в запасах Соединенных Штатов находится 95,4 тонны плутония, и за все время производства расхождение между запасами по бухгалтерским книгам и по аудиторской проверке составило –2,4 тонны. Это представляет улучшение отчетности по сравнению с предыдущим отчетом как в уменьшении запасов на 4,1 тонны, так и в уменьшении расхождения на 0,4 тонны. Это расхождение часто называют «неучтенными материалами» (MUF).

Неопределенность в объеме производства плутония в США была приписана отсутствию современных систем управления ядерными материалами и недоступности компьютеризованных инструментальных средств на первоначальном этапе программы производства. В 2006 году Федерация американских ученых согласно Закону о свободе информации потребовала от Министерства энергетики опубликовать отчет под названием «*Высокообогащенный уран: примечательный баланс*»^{26,27}. Согласно отчету, текущие запасы ВОУ в США составляют 740 тонн, и расхождение между запасами по бухгалтерским книгам и по аудиторской проверке составило +3,2 тонны. Это расхождение приписывалось отсутствию документации, документам, не разработанным для отчетности ВОУ, и отсутствием достаточно усовершенствованных измерительных систем на ранней стадии производства. Однако, хотя опубликованный отчет не предоставляет определенной информации о точности оценок объема производства ВОУ, данные об истории производства ВОУ приводятся в килограммах с точностью до пяти значащих цифр.

Среди государств, обладающих ядерным оружием, наблюдается широкий диапазон как в уровнях опубликованной информации, так и в степени доверия или определенности между национальными оценками и объявлениями объемов производства, использования и текущих запасов расщепляющихся материалов. Хотя формальные статистические ошибки (точности) оценок объемов производства полностью отсутствуют, подразумеваемая точность этих оценок может меняться от очень точной в случае оценок производства ВОУ в США, до весьма неопределенной в случаях оценок количества ВОУ во Франции, Китае и России. В каждом случае оценки опирались на реконструкцию истории производства на основании наилучших (предположительно) доступных записей многих производственных процессов. Более того, в каждом отчете отмечалось, что реконструкция на основании записей является неполной, несогласующейся, или и той, и другой.

На основании современного состояния сведений по Соединенным Штатам и Великобритании представляется, что анализ на базе записей может привести к очень точным оценкам объема производства ВОУ. Поэтому первым шагом в достижении прозрачности в отношении расщепляющихся материалов должен стать глубокий и основанный на записях учет объема производства ВОУ, при условии, что такие записи существуют.

ОБОБЩЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ЯДЕРНОЙ АРХЕОЛОГИИ

Сценарий, в котором первоначально предполагалась ядерная археология, был таким:

- Производство расщепляющихся материалов, было связывающим ограничением на запасы ядерного оружия, и возможности ядерных вооружений в целом.
- Существовала большая неопределенность в истории производства расщепляющихся материалов противником.
- Существовал низкий уровень доверия к предполагаемой декларации производства противником.

Все из приведенных выше особенностей проблемы существенно изменились, и возникли некоторые новые особенности. В этом разделе предлагается обобщение задач ядерной археологии в этом новом контексте.

Помимо расширения методов для применения в большинстве, или во всех производственных технологиях, основной смысл, в котором концепция требует обобщения, происходит из того факта, что разоружение и размещение расщепляющихся материалов превращаются весьма долгосрочную проблему. Даже при быстром недавнем прогрессе российско-американских договоров, ограничивающих средства доставки и боеголовки, осуществление нового договора по ограничению стратегических вооружений может потребовать 15 лет. Будущая перспектива такой программы будет определяться одними (или более) сложными многосторонними (или связанными двусторонними) договорными рамками, которые сейчас даже невозможно подробно предусмотреть. Более того, проблема распоряжения материалами также будет такой, которая потребует значительных инвестиций и времени; американская программа смешанных оксидов для диспозиции оружейного плутония – это самый последний такой пример. Хотя это означает, что мы не сможем быстро разрешить соответствующие неопределенности, такая ситуация также предоставляет время для тщательно спланированного кооперативного применения существующих технологий, и, возможно, развития дополнительных методов.

Следовательно, современный контекст ядерной археологии состоит в том, что она является долговременным процессом, а не одной из «инициализирующих» оценок запаса расщепляющегося материала, как в начале 1990-х годов часто ограничивалась ее задача. Одним из последствий этого расширенного временного контекста стало то, что соответствующие процессы определенности учета расщепляющихся материалов вышли за пределы истории производства и стали включать в себя распоряжение материалами. Реальным критерием, как предлагалось в статьях Дьякова и Подвига, является «остаток расщепляющегося материала, доступный для использования в оружии», и определенность, с которой мы сможем привязать эту метрику.

В терминах статистики мы хотим минимизировать ошибку оценки «материала, доступного для использования в оружии» (M_w), где

$$M_w = M_p - M_T - M_L - M_u \quad (1)$$

В этом уравнении M_p – объем производства, M_T – расход материала на испытания, M_L – потери (отходы), и M_u – использование материала не на оружие (либо ВОУ в качестве топлива для военно-морского флота, либо «диспозиция» (например, сжигание плутония в топливе со смесью оксидов, либо разбавление ВОУ для использования в реакторном топливе, либо преобразование в запасы под гарантией)).

Если мы предположим, что все члены уравнения (1) подвержены неопределенностям, и будем трактовать их как случайные переменные, то вариация критерия M_w будет равна

$$\begin{aligned} \text{Var}(M_w) = & \text{Var}(M_p) + \text{Var}(M_T) + \text{Var}(M_L) + \text{Var}(M_u) - 2\text{Cov}(M_p, M_T) \\ & - 2\text{Cov}(M_p, M_L) - 2\text{Cov}(M_p, M_u) + 2\text{Cov}(M_T, M_L) \\ & + 2\text{Cov}(M_T, M_u) + 2\text{Cov}(M_L, M_u) \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение (2) говорит нам о том, что все члены неопределенности (вариации) равным образом входят в неопределенность итогового критерия M_w , и что мы должны будем учитывать степень корреляции между этими четырьмя членами. Первый из этих пунктов показывает, что для минимизации $\text{Var}(M_w)$ нецелесообразно прилагать значительные усилия к скрупулезному учету для того, чтобы обеспечить контроль диспозиции запасов плутония на уровне граммов, если неопределенности других составляющих будут значительно большими. Такая статистическая перспектива показывает, что методы ядерной археологии следует прилагать к любому и

всем членам в правой стороне уравнения (2) в тех пределах, в которых они будут вносить существенный вклад в хорошие оценки материала, пригодного для использования в ядерном оружии (или устанавливать доверительные верхние пределы).

Ковариационные члены в уравнении (2) будут равны нулю, если все оценки будут статистически независимыми. Ковариационные члены следует оценивать тогда, когда будет построена формальная статистическая модель любой национальной программы производства для определения, какие из них будут применимы.

ПРЕДПОЛАГАЕМАЯ ТОЧНОСТЬ ЯДЕРНОЙ АРХЕОЛОГИИ

В этом разделе рассматривается предполагаемая точность основанных на измерениях оценок ядерной археологии как для производства плутония, так и для производства ВОУ; в качестве примера используется российское производство. Методы количественного определения плутония в перспективе точности хорошо обоснованы. Поскольку установленные методологии для ВОУ отсутствуют, обсуждение принимает форму идентификации источников ошибок в текущей оценке и их влияния на программу археологии. Из этих примеров *не следует*, что ядерная археология применима только к российской истории производства, но для этих двух случаев имеется хорошо изученный контекст (в основном благодаря работам Дьякова и Подвига).

Оценки для плутония

Современные методы могут поддержать широкую программу применения основанных на изотопных отношениях методов к всеобъемлющей оценке истории производства плутония в России, или в Соединенных Штатах. В обоих случаях предполагаемая точность основанных на измерениях оценок лучше, чем у текущих оценок. Анализ применения измерений изотопных отношений к российскому производству плутония указывает как на высокую предполагаемую точность²⁸, так и на техническую осуществимость²⁹. В таблице 5 приводятся результаты расчета точности на уровне комплекса, которые можно ожидать от такой программы при определении российского производства плутония оружейного качества³⁰. Значения ошибок (последний столбец в таблице) были получены применением типичных процентных ошибок метода графитовых изотопных отношений (GIRM) для графитового реактора к текущим (исторически обоснованным) оценкам для каждого реактора. Совмещение ошибок для отдельных реакторов в общую сумму предполагает их независимость. Хотя оценка для США может быть несколько менее точной из-за того, что заметная часть производства приходилась на реакторы с тяжеловодным замедлителем, точность должна быть сравнимой.

Таблица 3. Предполагаемая точность оценки на основе графитовых изотопных отношений для российского плутония оружейного качества.

Площадка	Реактор	Текущая оценка производства плутония (кг) ¹	Стандартная ошибка метода GIRM (кг) ²
Маяк	А	6138	199
	АВ-1	8508	276
	АВ-2	8407	272
	АВ-3	7822	253
	ОК-180	53	2
Северск	И-1	8237	267
	ИЭ-2	7453	241
	АДЭ-3	14020	454
	АДЭ-4	19460	631
	АДЭ-5	19144	620
Зеленогорск	АД	15433	500
	АДЭ-1	14184	460
	АДЭ-2	16317	529
Всего		145175	1454

¹ Diakov A, "The History of Plutonium Production in Russia," *Science and Global Security* 19 (2011):28–45.
² Рассчитано как квадратный корень из суммы квадратов стандартной ошибки в 2,55 процента для метода графитовых изотопных отношений и 2 процентов для потерь при переработке (3,208 процента в сумме).

Для того, чтобы получить лучшее визуальное представление о последствиях влияния такой программы в подходящих для разоружения временных рамках, статистическая модель, рассмотренная в предыдущем разделе, была применена к предсказанию неопределенности нашего показателя качества – неопределенности в количестве доступного для оружия плутония в любой момент времени. На рисунках 1(а) и 1(б) показано, как предполагаемая неопределенность в количестве доступного для оружия плутония будет изменяться в базовом

случае «ничего не делать» и в гипотетическом сценарии, включающем применение метода GIRM ко всем российским промышленным реакторам. Эти рисунки базируются на истории производства, определенной по работе Дьякова³¹, а также на его оценках неопределенностей, связанных с оценками производства. В обоих вариантах используются его оценки использования плутония в испытаниях и недавняя декларация об избыточности 34 тонн плутония, и материал, доступный для оружия (синяя линия), определяется как разность между суммарным производством и использованием. Рисунок 1(a) – это проекция современного состояния знания российского производства плутония на программу, в которой программа распоряжения синхронизирована с целью полного ядерного разоружения в 2050 году. Основной особенностью рисунка 1(a) является то, что неопределенность в объеме производства наследуется в постоянном размере в течение всего этапа разоружения. Рисунок 1(b) иллюстрирует сценарий, в котором в течение следующих двадцати лет выполняется полный набор оценок объема производства на реакторах.

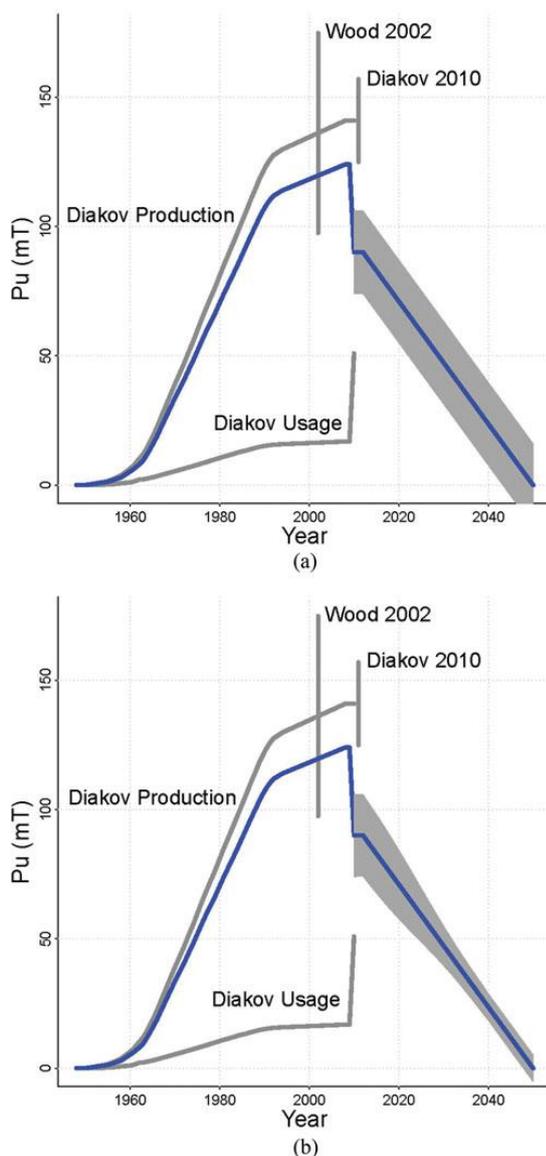


Рисунок 1. Неопределенность производства плутония для России: а) вариант «ничего не делать» и б) всеобъемлющая программа измерений по методу GIRM. На горизонтальной оси показано время в годах, на вертикальной оси – количество плутония в тоннах.

Из рисунков 1(a) и 1(b) можно сделать один полезный вывод о неопределенности во времени для точки, в которой ядерные возможности уменьшаются до нуля (или любого другого указанного нижнего предела). В базовом варианте эта неопределенность превышает десять лет. В том случае, когда оценки по методу GRIM будут сделаны для всех промышленных реакторов, эта неопределенность уменьшится примерно до трех лет.

Стратегия ядерной археологии для ВОУ

Для того, чтобы понять предполагаемый выигрыш от применения археологических методов к производству ВОУ для оружия, необходимо начать с базовой оценки и источников ее ошибок. Для этой цели мы будем использовать оценку Подвигом производства российского ВОУ оружейного качества 2012 года. На основании исторического производства в единицах работы разделения (ЕРР), размещения для оружейного и не оружейного использования, и неопределенности в степени обогащения отвалов и загрузки, общая точность определения количества российского ВОУ будет равна примерно 120 тонн для оценки объема производства 1250 тонн.

Очевидно, что наибольшая часть этой неопределенности приходится на неопределенность в производстве ЕРР. Подвиг использует оценку в 5%, или 20 миллионов кг-ЕРР из оцениваемого суммарного производства в 400 миллионов ЕРР. Это преобразуется в неопределенность в 100 тонн, или более 80% от общей неопределенности в 120 тонн. По сравнению с этим прочие источники ошибок и неопределенности второстепенны. При распределении 400 миллионов ЕРР на прочие продукты (низко обогащенный уран) приходится 136 ± 9 миллионов ЕРР, а на производства ВОУ приходится 264 ± 22 миллиона ЕРР. Это соответствует неопределенности в 110 тонн, если все ошибки не коррелированы.

Подвиг приписывает ошибку в $\pm 5\%$ неопределенности в содержании урана-235 в отвалах, что преобразуется в 40 тонн неопределенности в объеме производства. При добавлении в качестве независимого источника ошибки это увеличивает общую ошибку от 110 до 120 тонн³². Подвиг указывает, что в его расчетах принимается доля урана-235 в отвалах в 0,667% (вместо доли в природном уране в 0,71%), но, по-видимому, он не приписывает этому фактору никакой неопределенности.

Следствие для стратегии ядерной археологии для производства ВОУ состоит в том, что даже идеально точная оценка урана-235 в отвалах сократит общую неопределенность всего лишь на 7 – 10 тонн, что будет соответствовать сокращению текущих оценок всего лишь на 6 – 8%³³. Точная оценка разделения ЕРР между производством ВОУ и НОУ позволит выиграть около 10 тонн неопределенности, но очевидно, что наибольший предполагаемый выигрыш может появиться в результате лучшей оценки производства ВОУ. Для сравнения, если бы методы ядерной археологии могли бы добиться для ВОУ того же, что они сделали для плутония (1% общей точности), то это могло бы дать ошибку менее 10 миллионов ЕРР для общего производства, что составило бы около 20 тонн ВОУ. Добавив это к 40 тоннам ошибки, предполагаемой для отвалов, можно получить общую ошибку в 45 тонн, что очень близко к текущей (но еще не опубликованной) оценке неопределенности Подвигом.

Предположив, что мы можем точно разрешить неопределенность с отвалами в дополнение к достижению точности в 1% для производства ЕРР, общая ошибка для российского производства ВОУ могла бы снизиться до 20 тонн, или менее 2% от объема производства. Эта цель весьма претенциозна, но она все еще будет представлять большую неопределенность по сравнению с предполагаемой точностью оценки США.

Оценка ВОУ на основании измерений

Предыдущий анализ рассматривает текущую неопределенность в терминах различных источников ошибок. Он определяет потенциальную стратегию измерений или цели основанного на измерениях археологического режима; однако, он ничего не говорит о предполагаемой точности таких основанных на измерениях методов.

В своей первоначальной работе Феттер обсуждает схему оценки производства ВОУ, в которой измеряется отношение количеств урана-234 и урана-235 в отвалах обогащения для показания уровня обогащения продукции. Хотя он и не приводил количественных показателей предполагаемой точности этого метода, из графика зависимости этого отношения от обогащения продукции ясно, что для подтверждения обогащения продукции ВОУ понадобится очень точная характеристика отвалов. Хотя это вполне возможно на уровне отдельного образца, но для обеспечения такой точности всего объема отвалов, произведенных на протяжении жизненных циклов обогатительных предприятий, понадобится много образцов. Если это будет возможно, такую оценку надо будет скомбинировать с массой отвалов для того, чтобы оценить и степень обогащения, и массу продукции.

Такая схема была оценена для простых случаев в недавней работе Шарпа³⁴. Шарп признает, что в сложных случаях (таких, как российский обогатительный комплекс) проявляются многие особенности, которые делают этот метод менее полезным. Поскольку такая оценка может быть очень чувствительной к деталям истории завода, для оценки ее точности может потребоваться подробное статистическое моделирование. В ожидании разработки альтернативных методов оценки производства ВОУ исследование моделирования условий, ап-

проксимирующих условия производства как в Соединенных Штатах, так и в России, могло бы быть весьма полезным.

Поскольку дальнейшие исследования и разработка потенциальных сигнатур суммарного производства ВОУ находятся на самых ранних стадиях³⁵, до сих пор невозможно количественно определить точность метода оценки производства, использующего эти сигнатуры. В данном разделе это вопрос кратко исследуется в качественном контексте.

В общем случае проблема оценки суммарного производства ВОУ требует оценки суммарного производства единиц работы разделения (ЕРР) на обогатительном предприятии. ЕРР – это количество работы разделения, произведенной в процессе обогащения, и эта единица не зависит от технологической природы процесса. Поэтому газодиффузионная, электромагнитная, центрифужная и лазерная технологии должны произвести одно и то же количество единиц ЕРР, чтобы получить заданное количество ВОУ из заданной загрузки природного урана, или другого низко обогащенного материала. Однако, возможные сигнатуры и стратегии измерений для этих различных технологий могут быть довольно разными. Для всех этих технологий скорость производства ЕРР в единицу времени для заданной конструкции довольно хорошо характеризуется экспериментами, проведенными на стадиях разработки и коммерциализации оборудования, но результаты таких экспериментов нередко не публикуются и считаются коммерческим секретом. Поэтому оценка историй работы индивидуальных машин или барьеров может предоставить основу для оценки верхнего предела производства. Поскольку в типичном каскаде очень много индивидуальных машин, то можно будет очень точно охарактеризовать *среднюю* историю работы, если можно будет найти и использовать результаты подходящих измерений.

Более прямая схема могла бы опираться на тот простой факт, что уран-238 и уран-235 соответственно распадаются до тория-230 и протактиния-231 с низкой, но очень точно известной скоростью. Для заданной конфигурации каскада масса обработанного урана, и, следовательно, масса продуктов распада, коррелируют с выходом ВОУ. Эти цепочки распада включают элементы с химической изменчивостью, существенно отличающейся от урана, и их осаждение на поверхностях может быть использовано для сигнатуры суммарного производства.

Схема использования изотопных сигнатур в материале, осажденном на компонентах обогатительного завода, в настоящее время экспериментально проверяется в лаборатории PNNL. Осажденный материал включает изотопы урана и дочерние продукты распада урана, которые присутствуют в концентрациях и отношениях, которые могут быть использованы для диагностики нескольких аспектов истории завода. Хотя присутствие таких сигнатур было признано уже давно, они считались едва различимыми и не пригодными для полезного использования. В современных методах, разрабатываемых в лаборатории PNNL, используется спектроскопический анализ на ультра-следовом уровне компонентов из оборудования промышленных обогатительных предприятий, дополненных образцами, приготовленными в лабораторных условиях, а также исследования моделей процесса, позволяющих преобразовать измеренные сигнатуры в оценки эксплуатационных параметров предприятия. Как указано в таблице 6, сигнатуры компонентов могут быть полезными для суммарной массы материала, обработанного на предприятии, степени обогащения, количеству кампаний обогащения, и времени, прошедшего после последней производственной кампании.

Таблица 6. Технический подход к оценке потенциальных сигнатур для верификации производства UF₆ на центрифужных заводах.

Потенциальная сигнатура	Подтверждаемая информация	Состояние исследований
Усредненный изотопный состав урана в коррозионном слое	Усредненное по времени обогащение UF ₆ (нелинейная скорость коррозии)	Полное доказательства принципа
Профиль по глубине изотопного состава урана в коррозионном слое	Временные вариации кампаний обогащения	Полное доказательства принципа
Толщина коррозионного слоя	Оценка времени экспозиции UF ₆	Разрабатывается
Суммарное количество продуктов распада (атомов протактиния и тория)	Кумулятивное пропускание массы через центрифугу	Концептуальная стадия
Элементное отношение продуктов распада в стенке ротора и коррозионном слое	Усредненное по времени обогащение UF ₆	Концептуальная стадия
Профиль по глубине имплантированных продуктов распада в стенке ротора	Временные вариации кампаний обогащения	Концептуальная стадия

Лаборатория PNNL завершила необходимые для доказательства концепции измерения среднего изотопного состава урана и глубинного профиля этой величины в коррозионном слое. Начальные результаты указы-

вают на возможность проводить различие между уровнями обогащения ураном-235 с высокой степенью точности. Более того, может оказаться возможным ассоциировать содержание изотопов в коррозионном слое с конкретной кампанией обогащения, по меньшей мере для ограниченного числа экспозиций. На рисунке 2 показан глубинный профиль в образце, последовательно экспонированном в двух средах из обедненного урана (UF_6); измерения проводились по методу масс-спектропии вторичных ионов. Эти данные показывают осуществимость применения метода в измерениях усредненной по времени степени обогащения на центрифуге. Для повышения убедительности измерений лаборатория PNNL разрабатывает метод определения полного времени экспозиции измерением толщины коррозионного слоя.

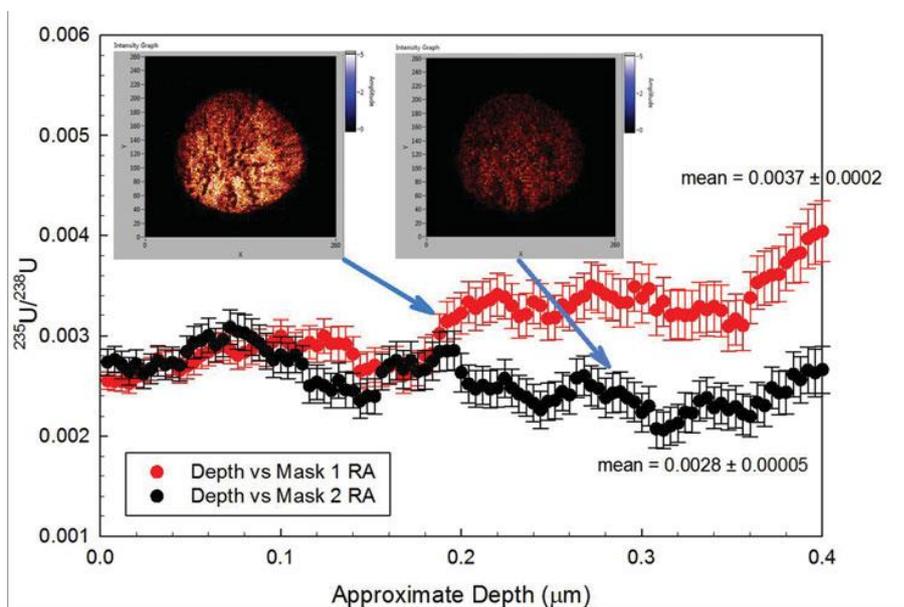


Рисунок 2. Изотопный анализ в зависимости от глубины коррозионного слоя. Эти данные показывают смешанный слой от двух экспозиций с разными изотопными обогащениями (черные и красные маркеры), который с увеличением глубины начинает разделяться на два отдельных слоя, что демонстрирует возможность различать многократные кампании обогащения. Микрофотоснимки представляют изображения, полученные в измерениях на масс-спектрометре вторичных ионов. По горизонтальной оси отложена приблизительная глубина в микронах, а на вертикальной – изотопное отношение $^{235}U/^{238}U$.

Лаборатория PNNL также определила три дополнительных сигнатуры, которые еще следует испытать. Эти сигнатуры основаны на возможности измерять дочерние продукты распада урана во многих местоположениях внутри центрифуги, используя различные методы для определения суммарного выхода, усредненного по времени обогащения, и временных вариаций уровня обогащения. Из-за большого периода полураспада урана заменители должны будут помещаться в среду гексафторида урана на значительный период времени для того, чтобы накопить измеримую концентрацию продуктов распада. Лаборатория PNNL определила потенциальные заменители для начала испытаний на их приемлемость.

В конечном счете полезность этих сигнатур для оценки суммарного потока гексафторида урана может ограничиваться насыщением коррозионных слоев на компонентах заводского оборудования. Лаборатория PNNL продолжит оценивать потенциальную применимость и осуществимость этих сигнатур с использованием реальных компонентов оборудования завода.

Независимо от работы по разработке сигнатур в остаточном материале на компонентах оборудования завода, должна быть проведена формальная статистическая оценка предложенного Феттером метода характеристики отвалов для условий, разумно приближенных к американскому производству, и, если это возможно, к российскому производству. Это должно быть проведено в совместном исследовании, и не должно включать (или почти не включать) исследования новых методов измерений.

Проблема оценки суммарного производства ВОУ по измерениям компонентов оборудования завода (таким образом, чтобы существенно не зависеть от исторических записей) сложнее, чем аналогичные способы оценки производимого в реакторах плутония. Она включает экстраполяцию относительно слабых сигнатур, затрагивающих малое количество атомов. Разработка содержательной и точной оценки на основании измерений может

оказаться невозможной, но она подает надежды, и исследования должны будут позволить провести оценку осуществимости методов примерно в течение одного года.

КРАТКАЯ СВОДКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Значительный технический прогресс в методах ядерной археологии был достигнут с тех пор, как в начале 1990-х годов была предложена эта концепция. Несколько экспериментов по доказательству принципа продемонстрировали техническую базу для оценки суммарного производства плутония в типах реакторов, на которые приходится подавляющее большинство мировых запасов плутония оружейного качества. В течение разработки этих методов было опубликовано несколько отчетов и статей по этим методам, и эти документы доступны в открытой литературе для независимого исследования и верификации. Сейчас реально запланировать и выполнить программу ядерной археологии, которая может уменьшить неопределенность в объеме производства плутония как в Соединенных Штатах, так и в России. Такая программа может послужить и примером для других стран, так и первым шагом к укреплению доверия в будущих двусторонних или многосторонних договорах по контролю за расщепляющимися материалами.

Даже хотя технический прогресс по методам ядерной археологии обещал получить более точные оценки производства плутония, чем мы имеем сейчас только на основании одних записей, эти методы все еще не были формально введены в действие. Размер неопределенности, характеризующий наилучшие оценки на основании записей производства плутония, все еще существенен для всех объявленных стран, обладающих ядерным оружием. Риск, представляемый этой неопределенностью, состоит в том, что пригодный для оружия материал находится за пределами формальных режимов контроля. Этот риск становится более важным по мере приближения ядерных арсеналов к нулю, или к любому другому нижнему пределу, согласованному качестве обособленной цели. Сокращение такого риска потребует реализации археологических мероприятий в дополнение к их разработке.

Текущее техническое состояние оценки производства плутония в графитовых реакторах достаточно хорошо для того, чтобы поддержать демонстрацию методов на реальном промышленном реакторе. Хотя такой эксперимент технически возможен на любом реакторе в Хэнфорде, он будет стоить намного меньше, если провести его до инкапсуляции («изоляции в коконе») активной зоны реактора. В настоящее время такая возможность будет сохраняться на реакторе КЕ в течение следующих примерно 12 месяцев. Лаборатория PNNL исследует вместе с Министерством энергетики возможность проведения такой демонстрации, которая могла бы быть проведена на прозрачной двусторонней или многосторонней основе с учетом других заинтересованных стран.

Среди современных методов ядерной археологии только методы изотопного отношения для оценки производства плутония достаточно развиты для ближайшего применения в контексте верификации договоров. Даже им может потребоваться дополнительная совместная разработка для убеждения подписантов договора в том, что они представляют приемлемые риски для использования в верификации.

Аналогичные методы, позволяющие получить точную оценку производства ВОУ, сейчас не существуют. Это вызвано следующими факторами, включающими сложную природу проблемы и приоритет, исторически присвоенный методам оценки плутония. Тем не менее, текущая неопределенность неформальных оценок производства ВОУ и технические факторы, заставляющие страны и другие негосударственные образования, желающие получить ядерное оружие, предпочесть оружие с ВОУ оружию с плутонием, позволяют предположить, что разработка достаточно надежных методов оценки производства ВОУ должна сейчас получить приоритет. Полезным первым шагом в такой программе исследований должно стать прояснение наилучших текущих оценок российского производства ВОУ на основании записей, улучшающее таким образом недавно опубликованные неформальные оценки Подвига.

Прогресс, достигнутый в американо-российских договорах по контролю над вооружениями, существенно опередил формальные соглашения, направленные на ликвидацию расщепляющихся материалов оружейного качества. Даже с учетом современных соглашений по ликвидации расщепляющихся материалов, существующие запасы доступных для оружия расщепляющихся материалов намного превышают количество, необходимое для современных арсеналов оружия. Неясно, останется ли такое развязывание расщепляющихся материалов и оружия при дальнейшем уменьшении количества оружия у Соединенных Штатов и России, но очевидно, что такая модель обычно неприменима ни к странам, старающимся получить ядерное оружие, ни к любым другим негосударственным образованиям, стремящимся к ядерным возможностям. В этих случаях запасы расщепляющихся материалов могут оставаться активным ограничением возможностей обладания ядерным оружием.

Значимость, уделяемая в программе ядерной археологии разработке методов, опирающихся на измерения, а не на записи, отражает стремление увеличить их значение в верификации деклараций. В современном политическом контексте это самое свойство может оказаться еще более важным для проведения оценки объемов производства в тех случаях, когда не делается никаких деклараций.

Реалистичная долгосрочная перспектива сокращения ядерного оружия и ликвидации расщепляющихся материалов позволяют предположить, что роль ядерной археологии в некоторых случаях может быть расширена до оценок условий использования и ликвидации, что нацеливание на точную оценку *материала, остающегося доступным для использования в ядерном оружии является* правильной задачей археологической программы.

Если отобразить возможности археологии на существующий и обоснованно предсказуемый политический ландшафт, то появятся несколько возможных применений. В контексте возможной формулировки Договора о прекращении производства расщепляющихся материалов (ФМСТ) археологические методы могут дополнить существующее основанное на разделении определение производства плутония для того, чтобы повысить уверенность в том, что производство фактически было ограничено на стадии реактора. Основным препятствием для расширенного Договора о прекращении производства расщепляющихся материалов (ФМСТ) является асимметрия производства расщепляющихся материалов между Индией и Пакистаном. К этой проблеме можно подойти, по крайней мере частично, с помощью методов ядерной археологии.

Возможно, наиболее важно то, что методы ядерной археологии, включая набор методов, позволяющих оценить производство ВОУ, могут помочь ввести более полный режим контроля расщепляющихся материалов, который обращается к объему и распределению существующих запасов материалов и их соответствующей роли в будущем оружии и в соглашениях по ограничению вооружений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Этот отчет был подготовлен с использованием внутренних исследовательских фондов персоналом Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории (PNNL), управляемой Мемориальным институтом Баттеля для Министерства энергетики Соединенных Штатов. Она представляет взгляды только своих авторов, и не представляет политических позиций, мнений или заявлений фактов Мемориального института Баттеля, Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории (PNNL), Национальной администрации ядерной безопасности, или Министерства энергетики Соединенных Штатов. Она рассматривалась этими организациями только для целей определения секретности.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Steve Fetter, "Nuclear Archaeology: Verifying Declarations of Fissile Material Production," *Science & Global Security* 3 (1993): 237–259.
2. B.D. Reid, D.C. Gerlach, P.G. Heasler, and J.V. Livingston, *Trawsfynydd Plutonium Estimate* (Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, September 1997).
3. Если оценки для нескольких реакторов статистически независимы, то квадрат суммарной ошибки будет равен сумме квадратов индивидуальных ошибок.
4. Эта статья была подготовлена в рамках программы PNNL «Цель – лидерство» по «Количественному анализу производства ядерных предприятий». Инициатива по ядерной угрозе недавно начала «Проект верификации» для исследования масштаба и значения возможных технологий верификации для производства материалов и ядерного оружия. Смотрите также Matthew Sharp, "Applications and Limitations of Nuclear Archaeology in Uranium Enrichment Plants," *Science & Global Security* 21(2013): 70–92.
5. A. Diakov, "The History of Plutonium Production in Russia," *Science and Global Security* 19 (2011): 28–45.
6. James M. Acton, *Low Numbers A Practical Path to Deep Nuclear Reductions* (Washington, DC: Carnegie Endowment for International Peace, 2011) <http://carnegieendowment.org/files/low_numbers.pdf>.
7. Ядерная археология определяется как набор методов для изучения предприятий с целью определения прошлого производства ядерных материалов или истории переработки, включая тип, количество, распределение по срокам, и другие соответствующие атрибуты, с целью поиска таких оценок этих атрибутов, которые будут настолько независимы от деклараций оператора, насколько это возможно.
8. Информация, представленная в состоянии осведомленности, основана только на несекретной информации из открытых источников.
9. Reid et al., *Trawsfynydd Plutonium*, *op cit.* (ссылка 2)
10. J.P. McNeece, B.D. Reid, and T.W. Wood, *The Graphite Isotope Ratio Method (GIRM): A Plutonium Production Verification Tool*, PNNL-12095 (Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, 1999).

11. В эксперименте по слепому методу PNNL предсказала производство 3,63 тонны плутония на реакторе с графитовым замедлителем и газовым охлаждением в Великобритании. Реальное производство, объявленное оператором, равнялось 3,633 тонны.
12. Хотя оба набора методов основаны на изотопных сигнатурах, сигнатура производства ВОУ зависит также от химической динамики, определяющей осаждение продуктов распада урана-238 в сложной и переменной окружающей среде.
13. International Panel on Fissile Materials (<http://fissilematerials.org/>). Данные по плутонию оружейного качества для США и Великобритании основаны на официальной информации. Большинство данных по плутонию реакторного качества основаны на представленных в МАГАТЭ декларациях. Другие данные – это неправительственные оценки, часто с большой неопределенностью. Количество ВОУ представлено в эквиваленте обогащения до 90%.
14. Там же.
15. P. Podvig, "History of Highly Enriched Uranium Production in Russia," *Science & Global Security* 19 (2011): 46–67.
16. Это ни к коем случае не следует считать исчерпывающей оценкой; не было сделано никакого общего обзора литературы на русском языке.
17. H. Zhang, "China's HEU and Plutonium Production and Stocks," *Science & Global Security*, 19 (2011): 68–89.
18. International Panel on Fissile Materials (<http://fissilematerials.org/>).
19. Historical Accounting for U.K. Defense Highly Enriched Uranium, U.K. Ministry of Defense, London, March 2006, <http://fissilematerials.org/library/mod06.pdf>.
20. Strategic Defense Review, U.K. Ministry of Defense, July 1998, <http://fissilematerials.org/library/mod98.pdf>.
21. Отрицательные расхождения означают наличие избыточного материала по сравнению с аудиторской инвентаризацией.
22. The United Kingdom's Defense Nuclear Weapons Program, "A Summary Report by The Ministry of Defense on the Role of Historical Accounting for Fissile Material in the Nuclear Disarmament Process, and on Plutonium for the United Kingdom's Defense Program," <http://fissilematerials.org/library/mod00b.pdf>.
23. United States, *Plutonium, the First 50 Years United States Plutonium Production, Acquisition, and Utilization from 1944 to 1994* (Washington, DC: U.S. Dept. of Energy, 1996).
24. Это значение не включает 1,7 тонны гражданского плутония, 12,9 тонны плутония топливного качества, 0,6 тонны плутония, произведенного в исследовательских реакторах, и 5,7 тонны плутония, полученного от других стран, при общем запасе в 111,4 тонны.
25. U.S. Department of Energy, "The United States Plutonium Balance, 1944–2009," June 2012.
26. U.S. Department of Energy, "Highly Enriched Uranium: Striking a Balance," February 2006; U.S. Department of Energy, "Highly Enriched Uranium Inventory," January 2001.
27. U.S. Department of Energy, "Highly Enriched Uranium Inventory," January 2006.
28. T. Wood et al., "Confident Accounting for Russian Weapons Pu," *Nonproliferation Review* (1999).
29. A. Bushuev, V.N. Zubarev, and I.M. Proshin, "Composition and Content of Impurities in Graphite of Russian Reactors," Proceedings of Technical Working Group Meeting on the Graphite Isotope Ratio Method, RFNC-VNIIEF 205976-A-K4 (Sarov, Russia: RFNC-VNIIEF, 2001).
30. Основано на вычислениях, проведенных в PNNL Т. Вудом, 2012.
31. Там же.
32. Авторы рассчитали суммарную ошибку, равную 117 тоннам.
33. Это базируется только на точной информации по урану-235 и не принимает в расчет информирующей информации от характеристики урана-234, как предлагалось Феттером (Fetter, *Nuclear Archaeology*, 237–259, *op. cit.* – ссылка 1), и использовалось в недавней статье Шарпа (Sharp, *Applications and Limitations of Nuclear Archaeology* – ссылка 4).
34. Sharp, "Applications and Limitations of Nuclear Archaeology in Uranium Enrichment Plants," 70–92, *op. cit.* (ссылка 4).
35. Работы по этой проблеме были сознательно задержаны в пользу быстрой разработки методов оценки производства плутония в 1990-х годах. Методы оценки производства ВОУ продолжали рассматриваться на уровне описания проблемы в проектах, финансируемых лабораторией PNNL.