

ПРИМЕНЕНИЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ ЯДЕРНОЙ АРХЕОЛОГИИ НА ЗАВОДАХ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА

Мэтью Шарп

АННОТАЦИЯ

Содержание урана-235 в продукции завода обогащения урана связано с содержанием урана-234 в его отходах, что позволяет проверить с помощью согласованности измерений состава отвалов с декларированной историей производства. Верификация более применима для известного состава загружаемого материала, но даже с неизвестным исходным изотопным составом на основании измерений состава отвалов можно отличить производство низко обогащенного и высокообогащенного урана. Оценка массы продукции более трудна; обсуждаются сценарии утаивания. Дополняя традиционный учет ядерных материалов, соотношения изотопных составов продукции и отвалов, или «ядерная археология» может увеличить доверие к точности деклараций истории производства расщепляющихся материалов.

Мэтью Шарп работает в Бюро европейских и евразийских отношений Государственного департамента США, Вашингтон, округ Колумбия, США.

Почтовый адрес для корреспонденции: Matthew Sharp, PhD, Bureau of European and Eurasian Affairs, U.S. Department of State, 2201 C st. NW, Washington, DC, USA.

Адрес электронной почты: matthew.k.sharp@gmail.com

Статья получена 18 июня 2009 года и принята к публикации 6 ноября 2012 года.

Данная статья не является субъектом закона об авторских правах США.

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная археология стремится к разработке набора методов, которые могут предоставить независимую верификацию или перекрестный контроль истории производства плутония и высокообогащенного урана. Такие средства могут усилить доверие к декларациям государства по истории производства расщепляющихся материалов, усиливая таким образом доверие к продвижению к ядерному разоружению¹. Археология в контексте производства плутония требует измерения и моделирования продуктов активации в конструкции ядерного реактора для того, чтобы оценить полную интегральную плотность потока нейтронов, и, следовательно, полное количество произведенного плутония. Такой метод был детально исследован и успешно применен к контрольному примеру².

В данной статье исследуется один из способов, в котором ядерная археология может быть применена к операциям по обогащению урана. Существует связь между обогащением урана-235 в продукции обогатительного завода и обеднением урана-234 (присутствующего в малых количествах в природном уране) в его отходах, или отвалах. Из этой связи следует, что измерение состава отвалов может оказаться полезным для подтверждения декларированной истории производства³.

В этом анализе предполагается, что страна произвела полный подсчет производства обогащенного урана, и задача заключается в том, чтобы подтвердить, что страна не утаивала в своей декларации производство существенного для военных целей количества высокообогащенного материала. Анализ проводится в предположении, что инспектор имеет доступ к декларации, в том числе и к хронологии количества и степени обогащения всего произведенного на заводе материала, и что отвалы от работы завода доступны для инспекции, так же, как и образцы заявленного обогащенного на заводе продукта. Задача состоит в том, чтобы на основании этой информации подтвердить, что из декларации не было удалено производство существенных количеств высокообогащенного урана (VOU).

Далее вкратце рассматриваются методы ядерной археологии и оценивается их эффективность в контексте трех иллюстративных примеров. Для идеального сценария малого обогатительного предприятия (то есть, всего

нескольких сотен килограммов общей продукции и единственного обогащательного завода) с загружаемым материалом с известными свойствами, инспекция отвалов может предоставить неплохие определения вида продукции и его количества. Такой пример представляет наилучший возможный сценарий, но он не является полностью нереальным; в начале 1990-х годов МАГАТЭ пыталось верифицировать южноафриканскую декларацию аналогичной истории производства. В аналогичном примере простой программы обогащения с неизвестными свойствами загружаемого материала (более вероятном для небольшой программы) все еще может быть определено различие между низким и высоким уровнем обогащения.

В больших программах, похожих на американскую, с сотнями тонн произведенного на нескольких предприятиях материала, подобные определения исключительно трудны из-за большей сложности операций завода и широко распространенной переработкой самих отвалов в дальнейшем обогащении. Эти схематические модели исследовались для того, чтобы определить ситуации, в которых потенциальные измерения могут оказаться полезными для проверки согласованности с декларацией. Сценарии, в которых может быть скрыто незаявленное производство, могут быть идентифицированы, и можно будет отождествить соответствующий перекрестный контроль, который потребует от укрывателя согласующимся способом изменять материал или записи, что делает такие сценарии более сложными.

Простота рассматриваемых здесь сценариев предназначена для того, чтобы исследовать потенциал перекрестного контроля и предложить измерения, которые могут быть использованы для построения доверия к декларации. Применение таких проверок в более реалистичных сценариях может потребовать значительно более сложных моделей установок, а достижимая точность может сильно зависеть от конкретного варианта. Потребуется дополнительная работа для того, чтобы определить, сможет ли эффективность предлагаемых здесь проверок быть соизмеримой с их стоимостью.

Ниже определяются соответствующие переменные для модели завода обогащения урана и вводятся ограничения, приводящие к связям между этими переменными. Затем эти связи используются для демонстрации полезности ядерной археологии в концепции идеализированного простого обогащательного завода. Усложнения в значительно более запутанных производственных операциях вводятся таким образом, чтобы могла быть оценена продолжающаяся эффективность этих методов в подобных случаях. Обсуждается возможность определения даты переработки материала на основании измерения состава отвалов, и, наконец, рассматривается влияние применения этих методов для нескольких различных способов утаивания производства материала.

ОБОГАЩЕНИЕ УРАНА

Обогащение можно рассматривать как процесс с неизвестным внутренним устройством, который преобразует поток загружаемого материала в поток продукции, содержание урана-235 в которой выше, чем в загружаемом материале, и поток обедненных отвалов, содержащий меньше урана-235. В случае идеального каскада не происходит потери работы разделения из-за смешивания материалов с различной степенью обогащения. На установках малого масштаба ограниченное количества действующих ступеней, или другие относящиеся к затратам или технике факторы, могут привести к тому, что каскад будет неидеальным; инспектор может постараться построить по схеме такого каскада точную модель, но получаемый результат анализа будет сильно зависеть от конкретного варианта. Завод характеризуется определенной разделительной способностью, относящейся к возможной скорости приложения работы к загрузке, и измеряемой в единицах работы разделения (EPP) в год, где единица работы разделения измеряется в килограммах урана. Вообще говоря, можно считать, что уран состоит из трех изотопных компонентов: доминирующего урана-238, расщепляющегося и требуемого урана-235, и урана-234, присутствующего в природном уране в небольших количествах. Процесс обогащения может быть описан девятью переменными:

- Масса материала в каждом из потоков завода (кг/год): M_f , M_t , M_p .
- Обогащение ураном-235 в потоках: x_f , x_t , x_p .
- Обогащение ураном-234 в потоках: y_f , y_t , y_p .

Здесь подстрочные индексы f , t , p указывают, что количество измеряется для потока загружаемого материала, отвалов, или продукции. Разделительная способность завода S часто трактуется как десятая переменная, но она не независима от масс потоков. В некоторых рассматриваемых ниже случаях эта способность трактуется как дополнительная переменная для удобства, но эта переменная непосредственно связана с абсолютной массовой шкалой операций завода, и не является действительной независимой и дополнительной переменной процесса. Впоследствии 10 процентов устанавливаются как обоснованная неопределенность производительности завода. На практике достижение даже такого уровня определенности будет исключительно

маловероятным, учитывая, подробности центрифужного, или газодиффузионного элемента вполне могут считаться засекреченной информацией, а все подробности истории эксплуатации завода скорее всего, будут известны только государству, подготовившему декларацию. Однако, назначение этого анализа состоит в исследовании взаимосвязей с верификационными последствиями между теми величинами, которые могут быть заявлены, а иногда и измеренными; определение разделительной способности обогатительного завода из нефальсифицируемых данных с точностью до 10 процентов, скорее всего, невозможно, но подтверждение того, что оценка производительности завода с точностью до 10 процентов согласуется со всеми неповрежденными записями на этом уровне, вполне осуществимо. В последующем это важное предостережение в оценке производительности завода будет безусловно подразумеваться.

Завод Y, эксплуатировавшийся Южной Африкой на площадке Валиндаба с 1979 по 1990 год, предоставляет прекрасную иллюстрацию этого типа простого предприятия. Этот небольшой завод в особенности значим, потому что в течение всего периода работы он использовался для производства как низко обогащенного урана (НОУ) для реакторного топлива, так и высоко обогащенного урана (ВОУ) для ядерного оружия. Когда Южная Африка присоединилась к Договору о нераспространении ядерного оружия в 1991 году, инспекторы МАГАТЭ потратили почти два года на попытку реконструкции производительности завода и для верификации того, что не было возможно произвести достаточно необъявленного ВОУ для изготовления дополнительного оружия; это в точности совпадает с той задачей верификации, которую должна выполнять ядерная археология. На заводе Y для загрузки используется природный уран, и его средняя производительность оценивается в 15 000 ЕРР/год. Южноафриканский случай был привлечен единственно в качестве примера небольшой программы, в которой верификация была как трудной, как и вызывающей особый международный интерес; подробности этого примера из реальной жизни, включая уникальную используемую технологию обогащения, в дальнейшем не рассматриваются.

Перечисленные выше девять неизвестных не являются независимыми друг от друга. Гарза и др. определили функцию ценности для трех компонентов разделения:

$$V(x, y) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3H(x, y) + U(x, y) \quad (1.1)$$

где c_i – все независимые константы⁴. H и U задаются выражениями:

$$H(x, y) = yR^{-(2k-1)} \quad (1.2)$$

$$U(x, y) = \left[2x + \frac{2k(y-1)}{2k-1} \right] \ln(R) \quad (1.3)$$

с

$$R = \frac{x}{1-x-y} \quad (1.4)$$

и

$$k = \frac{\alpha_y - 1}{\alpha_x - 1} \quad (1.5)$$

Выигрыш в разделении для различных изотопов α_i зависит от технологии разделения⁵. Для завода с газовой диффузией для урана-235, отделяемого от урана-238 в газе UF_6 $\alpha = (352/349)^{1/2}$, так что k для разделения урана-234 и урана-235 равно 1,34. Разделение изотопов в газовой центрифуге может быть охарактеризовано близкими значениями α и k . Для конкретности, в приведенных ниже вычислениях используются значения для газовой диффузии, но эти методы также легко могут быть применены к заводам с обогащением на центрифугах. Более того, следует отметить, что в моделировании каскадов могут быть использованы более сложные methodologies, в частности, в случае заводов с обогащением на центрифугах, или в других случаях с большими коэффициентами разделения⁶. Однако, для целей настоящего анализа исследования взаимосвязи между относящимися к эксплуатации завода заявленными и измеримыми величинами достаточен более простой формализм.

В простейшей формулировке Гарза $V(x, y)$ – это функция ценности процесса; ее интегрирование по трем

потокам на завод и из него (взвешенное по массе на каждой ступени) позволит определить мощность работы разделения C . Поскольку все константы независимы, каждое из пяти выражений в правой стороне можно будет интегрировать отдельно, причем первые четыре результата должны быть равны нулю, а пятый даст значение C . Первые три из этих уравнений являются известными уравнениями сохранения массы в системе:

$$M_f = M_p + M_t \quad (1.6)$$

$$x_f M_f = x_p M_p + x_t M_t \quad (1.7)$$

$$y_f M_f = y_p M_p + y_t M_t \quad (1.8)$$

Интегрируя два последних выражения, получаем:

$$M_f H(x_f, y_f) = M_t H(x_t, y_t) + M_p H(x_p, y_p) \quad (1.9)$$

$$C = M_t U(x_t, y_t) + M_p U(x_p, y_p) - M_f U(x_f, y_f) \quad (1.10)$$

С девятью переменными и только с пятью уравнениями, ограничивающими их, для решения системы потребуются еще четыре порции информации (раскрывающие таким образом обогащение продукта). На этом уровне усложнения не имеется дополнительных ограничений, доступных для связи этих девяти величин. Вместо этого ядерная археология зависит от определения четырех из перечисленных выше переменных некоторыми иными способами.

ЯДЕРНАЯ АРХЕОЛОГИЯ – ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Для того, чтобы изучить подробности применения археологии к различным сценариям, для кодирования ограничений, перечисленных в последнем разделе, была использована серия программ в системе MATLAB. Эти программы принимали входные данные: концентрацию урана-234 и урана-235 в загружаемом потоке, содержание урана-235 в отвалах, производительность завода, и обогащение выходной продукции ураном-235; выходными данными программ были состав отвалов и все массы. Затем эти программы могли быть использованы для построения графиков, подобных рисунку 1, связывающих обогащение продукта с содержанием урана-234 в отвалах. Эта кривая уникально определяется составом загружаемого потока и содержанием урана-235 в отвалах завода.

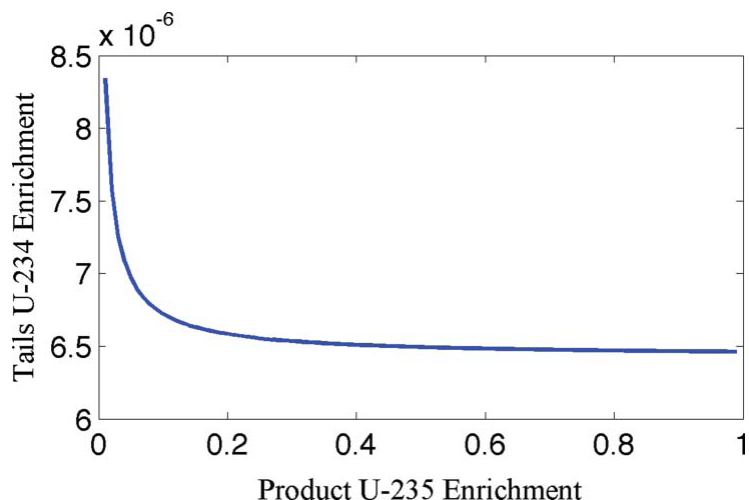


Рисунок 1. Соотношение между содержанием урана-234 в отвалах (на вертикальной оси) и содержанием урана-235 в продукции завода для загружаемого природного урана ($x_f = 0,0072$; $y_f = 5,5 \cdot 10^{-5}$ и $x_t = 0,002$).

В своей простейшей реализации предлагаемый метод реконструкции истории обогащения урана по составу связанных отходов зависит от знания инспектором величин x_i , u_i и x_t для того, чтобы он мог построить такую кривую; затем измерение содержания урана-234 в отходах позволит определить соответствующее обогащение продукции. Во многих случаях получение этих трех элементов информации будет возможным. Можно будет измерить содержание урана-235 в отвалах x_i ; известно, что содержание урана-235 в загружаемом материале x_t равно 0,71 процента. Фактически содержание урана-234 в природном уране может меняться в некоторых пределах, как это будет рассматриваться ниже, но пока его можно считать равным среднему значению $5,5 \cdot 10^{-5}$. В этом разделе постепенно вводятся более высокие уровни реализма и сложности в этом сценарии, и здесь исследуется, насколько эффективно ядерная археология позволит определить обогащение и массу материала продукта по мере смягчения предположений. Пока попытки скрытия производства будут игнорироваться, и этот вопрос будет рассматриваться в следующем разделе.

Простая модель завода с известным составом загрузки и ошибки измерений

Простую программу обогащения урана можно определить, как программу, в которой в обогатительном заводе имеется одиночный вход загрузки и два выхода – отвалы и продукция. Если концентрации урана-234 и урана-235 в материале загрузки завода известны, то тогда измерения состава отвалов и следование приведенной выше рекомендации позволит определить состав продукции. В этом разделе предполагается, что доступны все отвалы.

В предположении, что все свойства загружаемого материала точно известны, единственным источником неопределенности в определении состава продукции, соответствующего заданному образцу отвалов, будет случайная ошибка, связанная с измерениями состава отвалов. В последующих моделированиях исследуется соотношение между ошибками измерений состава отвалов и неопределенностями в определении состава продукции для различных уровней обогащения; результаты показаны на рисунке 2. Отсюда очевидно следует, что ошибка измерения состава отвалов в 1 процент приводит к ошибке в определении обогащения низко обогащенного продукта порядка 1 процента, но для ограничения обогащения высоко обогащенного продукта с точностью до 10 процентов потребуются более точные измерения. При соответствующих концентрациях такие методы, как термоионизационная масс-спектрометрия (TIMS) легко позволяют получить относительную ошибку на уровне $10^{-4} - 10^{-3}$. Поскольку ошибки случайны, повторные измерения повысят точность определения. Поэтому точный расчет состава продукции вполне достижим, если будет известен изотопный состав загрузки.

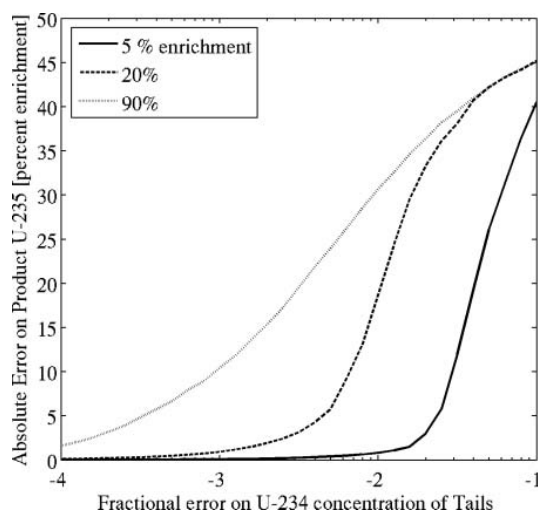


Рисунок 2. Ошибка нашего определения содержания урана-235 в продукции (в процентах обогащения; по вертикальной оси) в зависимости относительной ошибки измерений содержания урана-234 в отвалах (по горизонтальной оси) для трех уровней обогащения продукции. Содержание урана-235 в отвалах предполагалось равным 0,2 процента.

Обнаружение производства высокообогащенного урана

Есть два сценария, в которых ядерная археология может предоставить верификационную информацию посредством измерений содержания урана-234 в отвалах завода. Первый сценарий соответствует случаю, в

котором страна заявила, что она производила только низко обогащенную продукцию. В этом случае задача верификации состоит в том, чтобы подтвердить, что фактически не было произведено никакого высокообогащенного урана. Как показано выше, если инспектор получит доступ к подробным сведениям по составу загрузки и отвалов во время эксплуатации, то он сможет рассчитать обогащение продукции с точностью до нескольких процентов, и можно будет провести непосредственное обнаружение производства ВОУ. Если было заявлено, что в течение заданного периода времени производства ВОУ не было, но измерения состава отвалов укажут на противное, то попытка скрыть незаявленное производство будет обнаружена.

Определение массы продукции высокообогащенного урана

Если было заявлено производство высокообогащенного урана, то вторая задача ядерной археологии будет заключаться в том, чтобы выявить заниженную декларацию производства этого продукта. Имея предполагаемые, измеренные, или рассчитанные параметры состава загрузки, отвалов и продукции, можно определить отношение M_p/M_t , решив уравнения 6 и 7. С точностью измерения состава отвалов в 0,1 процента, можно определить это отношение с точностью 13 процентов для материала, обогащенного ураном-235 до 90 процентов, или с точностью в 1 процент для материала, обогащенного ураном-235 на 4 процента. С измерением массы отвалов M_t масса продукта, связанного с этими отвалами, может быть определена с той же самой неопределенностью. Если производительность завода известна с точностью 10 процентов, то тогда общее производство этого материала за заданный промежуток времени (даже материала, для которого отвалы недоступны) может быть оценено с той же самой точностью.

Определение состава загрузки

Хотя вышеуказанное предполагало знание содержания урана-234 в загрузке завода, концентрация этого изотопа в природной урановой руде может меняться от шахты к шахте и вполне может оказаться неизвестным. Если завод получает всю свою загрузку из одного источника, то тогда образец из этого источника, будь то в форме необогащенной руды, или неиспользованного UF_6 , может показать содержание урана-234. Однако, в 1980 году, когда начал работу завод, представляющий относительно простой пример из южноафриканской программы, на более, чем 20 местных рудниках было добыто 6 000 тонн урана, из которых было произведено 200 тонн UF_6 , загруженных в обогатительный завод⁷. Точный состав руды для урана, загружаемого на заводе, скорее всего неизвестен, и он мог изменяться в течение эксплуатации завода. При отсутствии хороших данных по загрузке инспектор может обратить внимание на продукцию. В южноафриканском сценарии инспекторы получили доступ к большей части заявленной продукции. Эта продукция, если она может быть связана с соответствующими отвалами по дате, может быть использована для определения состава загрузки. Определение возраста материала зависит от измерения накопления продуктов распада, которые могут быть отделены в любой химической переработке, последующей за обогащением. Хотя отвалы скорее всего не подвергались химической переработке после отправки с завода, это может оказаться неверным для продукции, которая перед использованием может быть окислирована или преобразована в металл. Такая переработка может сделать невозможным определение даты, в которую материал был выведен из каскада, хотя все еще можно будет определить дату самой последней химической переработки. В некоторых ситуациях это может оказаться достаточным для определения состава загрузки в зависимости от времени.

Простой завод с неизвестным составом загрузки

В некоторых случаях ни один из этих методов определения состава загрузки не сможет оказаться возможным, и тогда надо будет рассмотреть применение этих верификационных тестов в том варианте, когда содержание урана-234 в загрузке будет неизвестно. Уран-234 образуется в результате цепочки распадов, начинающейся с урана-238; некоторые из промежуточных стадий этой цепочки могут быть выведены из руды под действием влаги, что изменяет относительную распространенность двух изотопов в зависимости от локальных условий. Это приводит к тому, что уровни содержания урана-234 могут изменяться от рудника к руднику в некотором диапазоне. Международный союз теоретической и прикладной химии (IUPAC) определяет этот диапазон как $5,0 \cdot 10^{-5} - 5,9 \cdot 10^{-5}$.⁸ Однако, недавний анализ образцов из многих шахт показывает, что этот диапазон должен быть значительно более узким, и что природный уран содержит долю урана-234 и более узком интервале от $5,1 \cdot 10^{-5} - 5,4 \cdot 10^{-5}$.⁹ С таким интервалом реконструкция обогащения продукции с любой точностью станет невозможной. Однако, все еще может оказаться возможным отличить производство материала, обогащенного

до уровней оружейного качества, от производства материала, предназначенного для использования в реакторном топливе.

Определение обогащения продукции

Можно предложить два способа использования отвалов для раскрытия производства высокообогащенного материала без знания точного состава загрузки. Первый способ опирается на предположении определенной величины содержания урана-234 в загрузке; если возможный интервал действительных значений довольно узок, то это может оказаться достаточным для различения производства высокообогащенного материала от умеренно обогащенной продукции. Второй метод связан с использованием массы отвалов и оценки производительности завода для определения обогащения продукции. Совместное применение двух методов должно обеспечить успешное определение уровня обогащения продукции в широком интервале.

Использование предполагаемого состава загрузки

Без точного знания концентрации урана-234 в загрузке невозможно определить точное значение обогащения продукции только по одним отвалам. Однако, если диапазон возможных значений концентрации урана-234 довольно узок, часто можно будет наугад выбрать концентрацию урана-234 в загрузке и затем рассчитать оценку обогащения продукции, довольно близкую к реальности, чтобы определить, будет ли действительное значение обогащения продукции выше или ниже заданного порога.

Далее мы промоделируем составы отвалов, соответствующих производству материала, обогащенного до 4 процентов и до 93 процентов, для того, чтобы проверить возможность различения между этими вариантами с помощью предлагаемых методов ядерной археологии в этих неидеальных обстоятельствах. В обоих вариантах моделирования реальное содержание урана-234 в загрузке u_i однородно выбирается из указанного интервала, и процесс обогащения моделируется для получения расчетного состава отвалов. По результатам этого моделирования можно будет определить обогащение продукции, используя предполагаемое содержание урана-234 u_i . Значение u_i , которое использовалось для реконструкции продукции по моделированным отвалам, вообще говоря, не совпадает со значением u_i , реально соответствующим производству этих отвалов. Подразумеваемый продукт обозначается как HEU_i, если обогащение реконструированного продукта превышало порог t , или как LEU_i, если рассчитанное обогащение было меньше порога t . Определяя долю отвалов от производства материала с обогащением 93 процента, которые были правильно идентифицированы как HEU_i, и долю отвалов от производства материала с обогащением 4 процента, которые были правильно идентифицированы как LEU_i, можно оценить эффективность теста как средства для различения двух типов работ по обогащению на основании отвалов и без точного знания состава загрузки.

При применении этой методологии следует рассматривать два типа ошибок: ложные положительные, когда отвалы от производства материала, обогащенного до 4 процентов, будут ошибочно приняты как соответствующие производству материала с обогащением выше порогового, и ложные отрицательные, когда отвалы от производства материала, обогащенного до 93 процентов, будут ошибочно приняты как соответствующие производству материала с обогащением ниже порогового. На рисунке 3 показано, как частота ошибок каждого класса зависит от порога. Для этого теста значение u_i , используемое для генерации состава отвалов, случайным образом выбиралось из диапазонов IUPAC⁸ или Рихтера⁹, но концентрация урана-234 u_i , предполагаемая в реконструкции, фиксируется в центре допустимого диапазона. Если порог для различения HEU_i и LEU_i устанавливается как обогащение в 10 процентов, а диапазон возможных значений концентрации урана-234 соответствует более узкому диапазону Рихтера, то частота как ложных положительных, так и ложных отрицательных сценариев стремится к нулю, и можно будет точно идентифицировать, какие отвалы будут соответствовать продукту LEU₁₀ или HEU₁₀ в течение 100 процентов времени.

В том случае, когда содержание урана-234 в природном уране изменяется в более широком диапазоне, указанном IUPAC⁸, при том же самом указанном пороге в 10 процентов неправильное определение отвалов от материала с обогащением в 4 процента как высокообогащенного материала HEU₁₀ будет происходить примерно для одной четверти возможных концентраций урана-234, и отвалы от обогащения материала до 93 процентов будут неправильно обозначаться как LEU₁₀ примерно в четверти возможных сценариев. Отметим, что эти величины не являются вероятностью неправильной оценки обогащения продукции для заданного набора отвалов, а скорее долей всех возможных сценариев обогащения, для которых определение будет неправильным. Как видно из рисунка 3, можно отрегулировать порог таким способом, чтобы сумма частот ложных положительных ошибок и ложных отрицательных ошибок оставалась приблизительно постоянной. Рисунок 4 пока-

зывает, какие события были неправильно обозначены, и как выбор y_f влияет на соотношение ложных положительных и ложных отрицательных случаев.

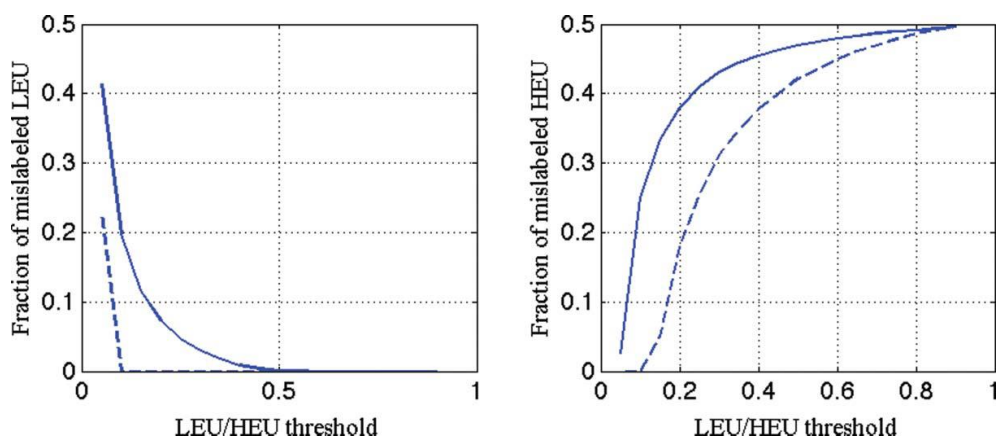


Рисунок 3. Моделируемые отвалы рассчитывались для обогащения 4 процента и 93 процента с однородной выборкой содержания урана-234 в загрузке (y_f) либо из диапазона разрешенных значений IUPAC (сплошные кривые), или более узкого диапазона Рихтера (штриховые кривые). После этого обогащение продукции реконструировалось по этим моделируемым отвалам с расчетом обогащения продукта ураном-235 с предполагаемой концентрацией урана-234 в центре разрешенного интервала (y_f). Если это рассчитанное обогащение превышает порог t , то продукт обозначается как HEU $_t$, и если рассчитанное обогащение меньше порога t , то продукт обозначается как LEU $_t$. На левой части показана доля отвалов от обогащения до 4 процентов, ошибочно обозначенных как HEU $_t$ (по вертикальной оси), в зависимости от порога t (по горизонтальной оси). На правой части показана доля отвалов от обогащения до 93 процентов, ошибочно реконструированных как LEU $_t$ (по вертикальной оси), в зависимости от порога t (по горизонтальной оси). Эти данные получены в результате рассмотрения 5 000 наборов моделированных отвалов и включают ошибки измерений.

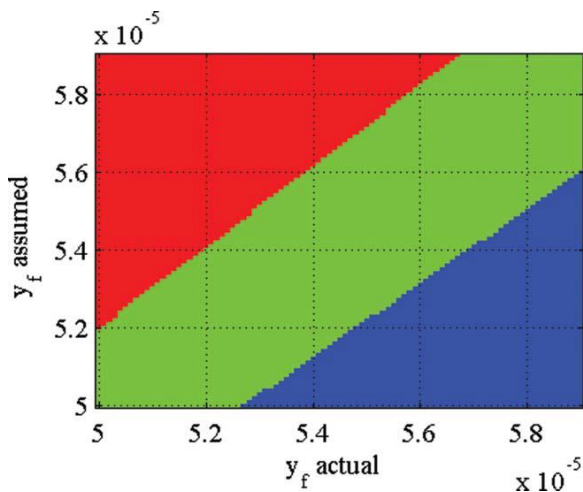


Рисунок 4. Каждая точка представляет комбинацию действительного значения y_f (концентрации урана-234 в загрузке, используемую для генерации моделируемых отвалов; по горизонтальной оси) и предполагаемого значения y_f (используемого для реконструкции типа производимой продукции; по вертикальной оси). Центральная (зеленая) область обозначает комбинации, правильно идентифицирующие отвалы с обогащением до 4 процентов как LEU $_{10}$, также, как и отвалы с обогащением до 93 процентов как HEU $_{10}$, в красной области неправильно идентифицируется продукция с обогащением до 93 процентов, а в синей области пропускается продукция с обогащением в 4 процента. Если диапазон возможных значений y_f может быть ограничен примерно до половины диапазона IUPAC (то есть, ближе к диапазону Рихтера), то предполагаемое значение y_f всегда будет генерировать правильный ответ. Внутри данного диапазона корректировка предполагаемого y_f позволит выравнивать частоты ложных положительных и ложных отрицательных выводов.

Если диапазон возможных концентраций урана-234 в загрузке можно будет ограничить диапазоном, соответствующем ширине зеленой центральной полосы на рисунке 4, то тогда значение u_i можно будет выбрать таким, что производство материалов с обогащением в 4 и 93 процента можно будет различить с использованием состава отвалов. Если природный уран попадает в диапазон, указанный Рихтером⁹, то природа уже выполнит эту работу (допустимый диапазон будет уже меньше, чем ширина зеленой полосы), и правильное разделение будет возможным для всех допустимых составов загрузки. Если природный диапазон содержания урана-234 в урановой руде во всем мире будет совпадать с более широким диапазоном IUPAC⁸, то все еще может оказаться возможным, что диапазон для загрузки, используемой на любом конкретном заводе, попадет в более узкий диапазон. Образцы руды или продукции, или даже самая общая информация о том, откуда могла произойти загрузка, могут помочь в ограничении этого диапазона. Если диапазон может быть ограничен достаточно сильно, то тогда на рисунке 4 можно будет выявить значение u_i , которое ядерный археолог сможет использовать для надежного различения отвалов от высокого и низкого обогащения. Если же диапазон останется слишком широким, то рисунок покажет предполагаемое значение, которое будет показывать большую частоту ложных положительных ошибок при правильном отождествлении всей обогащенной до 93 процентов продукции как HEU₁₀.

Использование массы отвалов

Во многих случаях отождествить производство продукта, обогащенного до 4 процентов, и до 93 процентов, можно будет только при знании диапазона возможных концентраций урана-234 в загрузке природного урана; в тех случаях, когда отвалы не могут всегда быть правильно ассоциированы с продукцией низко, или высокообогащенного урана, все таки будет возможно организовать обнаружение производства материала, обогащенного до 93 процентов, за счет появления в процессе большого количества ложных положительных событий. Затем для отделения таких ложных положительных сигналов от реального производства материала оружейного качества можно будет использовать массу отвалов. Этот метод опирается на корреляцию массы отвалов, произведенных в фиксированный интервал времени, и обогащения продукта, при условии постоянной производительности и постоянного состава отвалов (смотрите блок 1 на рисунке 5). При точном знании производительности и хорошем измерении массы отвалов, такая корреляция позволит определить обогащение продукции.

К сожалению, возможно, что обогатительная производительность завода не будет точно известна. В этом случае записи данных, такие, как потребляемая заводом мощность электроэнергии (доступная в южноафриканском примере), или зависимость от времени количества и типов используемых блоков разделения могут помочь сформировать оценку производительности завода, а данные по потокам массы загрузки, отвалов и продукции в различные моменты времени могут быть использованы для калибровки такой оценки в эти моменты. Если реальная производительность может быть оценена с точностью до 10 процентов, то можно будет получить распределения масс отвалов для продуктов, обогащенных до 4 процентов, и 93 процентов, показанные на блоке 2 рисунка 5. Тот факт, что эти два распределения не перекрываются, показывает, что даже с неточной оценкой производительности продукцию, обогащенную до 4 процентов, можно будет отличить от продукции, обогащенной до 93 процентов, используя массу отвалов, созданных в определенный период времени.

Измерение массы отвалов в конкретном резервуаре довольно просто, то определение скорости производства отвалов потребует также знания периода времени, за который наполнялся такой резервуар; это влечет за собой еще один источник неопределенности в любых попытках отличить производство высокообогащенного урана от низко обогащенного. Например, если десятипроцентная ошибка с распределением по Гауссу в измерении массы отвалов добавится к десятипроцентной неопределенности в производительности, то появится существенное перекрытие распределений измеренных масс отвалов от производства материалов реакторного и оружейного качества (блок 3 рисунка 5), что затруднит надежное различение этих двух сценариев с помощью такого метода. Блок 4 рисунка 5 иллюстрирует, как плохо такое перекрытие влияет на шансы успеха; при требовании 95-процентной уверенности в обнаружении любого обогащения ураном-235 в 93 процента была рассчитана частота ложных положительных сигналов (неправильно идентифицированных отвалов от продукции, обогащенной до 4 процентов) в зависимости как от неопределенности в производительности, так и ошибки в массе отвалов. Видно, что ограничение частоты ложных положительных сигналов до 5 процентов потребует точности оценок массы в примерно 5 процентов, если только не будет уменьшена неопределенность в производительности.

Способность инспектора достичь такой цели зависит от подробного знания особенностей инспектируемого завода и его операций. Содержимое конкретного резервуара может быть точно взвешено и датировано; для программы с продолжительностью в 20 лет средний возраст материала в резервуаре может быть определен с точностью около 1 недели по измерению продуктов распада. Если при выполнении программы каждый год

заполняется много емкостей с отвалами, и, если предполагается, что все эти отвалы до тогда инспектор сможет датировать все отвалы и просуммировать массы отвалов, соответствующих желаемому периоду. Полную массу, направленную в отвалы за один год заводом, производящим один 12-тонный контейнер отходов в месяц, или более (что примерно в десять раз больше, чем южноафриканский завод Y), можно легко измерить таким способом с точностью до 5 процентов. Если скорость накопления будет определена по частичному набору отвалов, или если потребуется узнать скорость производства за меньший период времени, то эта неопределенность пропорционально возрастет.

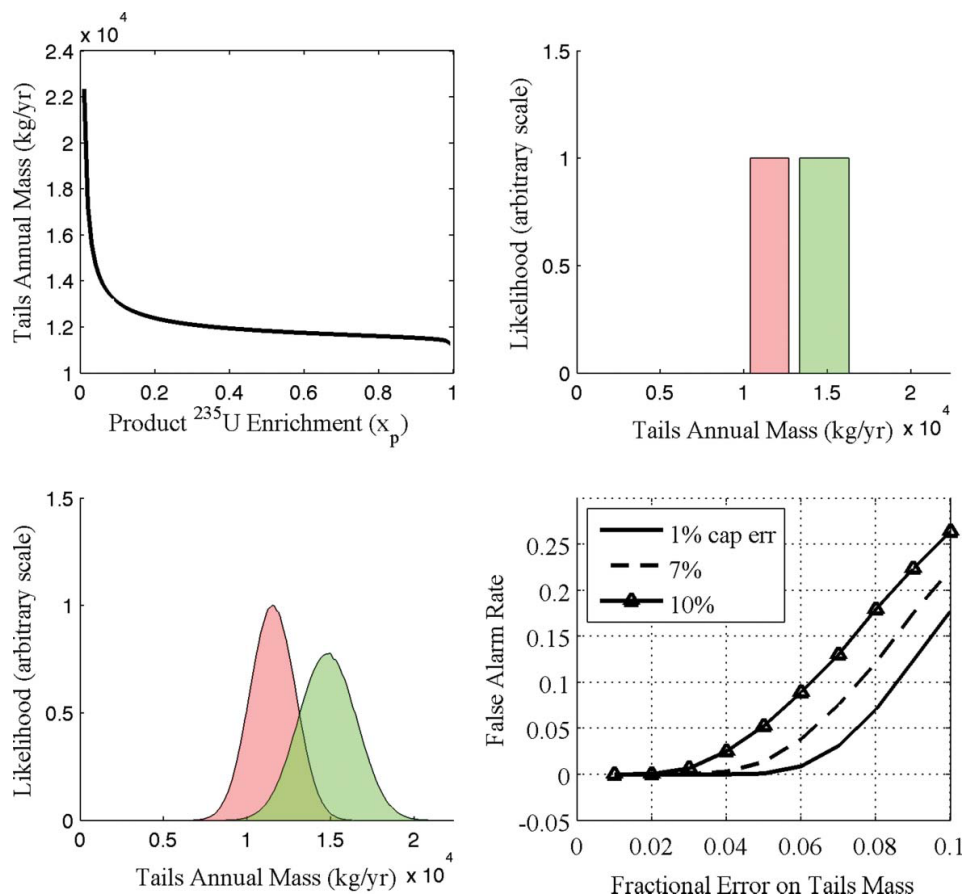


Рисунок 5. Слева сверху (блок 1). Соотношение между массой производимых за год отвалов (в кг за год, по вертикальной оси) и обогащением продукта (по горизонтальной оси) для завода с производительностью 15 000 ЕРР/год, работающего с отвалами, обедненными до 0,2 процента урана-235. Справа сверху (блок 2). Распределение возможных годовых масс отвалов, соответствующих обогащению в 93 процента (розовая область) и в 4 процента (зеленая область) в предположении 10-процентной неопределенности в производительности завода. Две раздельные области показывают, что массу отвалов можно использовать для различения обогащения в 4 процента и 93 процента. По вертикальной оси отложена вероятность (в произвольном масштабе), по горизонтальной оси – годовое производство отвалов (в кг за год.). Слева внизу (блок 3). Если к неопределенности в производительности добавить 10-процентную ошибку в измерениях массы отвалов, то области частично перекроются и различать два режима обогащения станет труднее. По вертикальной оси отложена вероятность (в произвольном масштабе), по горизонтальной оси – годовое производство отвалов (в кг за год.). Справа внизу (блок 4). Доля ложных положительных событий с неправильным отождествлением обогащения до 4 процентов (по вертикальной оси) для различных неопределенностей в производительности (три кривые на рисунке) и ошибок измерений массы отвалов (по горизонтальной оси) при поддержании вероятности обнаружения производства материала, обогащенного до 93 процентов, в 95 процентов.

На заводе меньшего размера каждый год будет наполняться меньше контейнеров с отходами, и резервуар со средней датой в заданном временном интервале вполне может содержать существенные количества отвалов с датами вне этого интервала. Для того, чтобы определить поток массы отвалов в таком сценарии, инспектору понадобится определить даты начала и окончания заполнения каждого резервуара. Неопределенность

потока массы будет пропорциональна неопределенности этих дат, так что для размера южноафриканского завода неопределенность в пять процентов будет соответствовать знанию дат с точностью в несколько недель. Эксплуатационные записи определенно могут предоставить такую информацию в тех пределах, в которых таким записям можно доверять. В качестве варианта, если известны средние возрасты двух последовательно заполненных резервуаров, то дата переключения будет находиться посередине между ними. Там, где скорости заполнения будут изменяться известным образом из-за изменения состава продукции или типа операций завода, это можно будет легко определить; для рассматриваемых здесь небольших заводов изменения состава продукции будут происходить редко. Хотя временная продолжительность заполнения резервуара может быть неверно оценена из-за изменения скорости заполнения или фальсификации записей, перемещение дат начала или заполнения увеличит скорость заполнения в одном резервуаре, сократив предполагаемую скорость заполнения в прилегающем по времени резервуаре; ошибка в одном направлении поэтому сбалансируется соответствующей ошибкой в противоположном направлении. В общей сложности для разнообразных сценариев эксплуатации завода пятипроцентная неопределенность измерения скорости производства отвалов завода вполне может стать возможной, что позволит разделить режимы высокого и низкого обогащения. Там, где такие точные измерения потока массы невозможны, следует ожидать большей частоты ложных положительных сигналов.

В этой иллюстрации представлена попытка различить производство продукции с обогащением 4 процента и 93 процента. Различение производства двух типов материалов с менее отличающимися уровнями обогащения будет более сложным, хотя пологость кривой зависимости массы отвалов и обогащения продукции в области выше 20 процентов указывает, что в большинстве случаев можно будет различить производство низкообогащенного и высокообогащенного урана.

Более того, хотя массу отвалов можно искусственно изменить, утаив определенное количество отвалов, таким способом можно будет только уменьшить массу отвалов. Как видно из блока 1 рисунка 5, спрятанные отвалы могут привести только к ошибочному отождествлению производства материала со степенью обогащения в 4 процента с производством материала, обогащенного до 93 процентов, но не наоборот. Если отвалы от производства низкообогащенного урана фактически будут отвлекаться для других видов использования, таких как изготовление боеприпасов из обедненного урана, или переработка, будет необходимо подтвердить вовлеченные количества и включить такой материал в отчетность, чтобы избежать ошибочного вывода о производстве высокообогащенного урана; отвлечение отвалов по любой причине делает работу ядерного археолога более трудной.

Выше представлены два метода использования отвалов для различения производства материалов реакторного качества и оружейного качества. Каждый из этих методов сам по себе может позволить произвести такое различие, если обстоятельства окажутся более или менее благоприятными: если содержание урана-234 в загрузке будет несколько ограниченным для первого теста, или если датирование отвалов будет достаточно точным для второго теста. Если не удовлетворяется ни один из этих критериев, то тогда каждый метод по отдельности приведет к неприемлемо высоким частотам ложных положительных сигналов, но два метода можно будет использовать совместно, чтобы обнаружить любые отвалы, соответствующие производству продукции с высокообогащенным ураном. Поэтому отсутствие подробной информации об изотопном составе загрузки не исключает полностью полезность ядерной археологии с применением обсуждаемых здесь мероприятий.

Определение массы продукции высокообогащенного урана

Для совокупности отвалов, соответствующих производству продукции, обогащенной как до 4 процентов, так и до 93 процентов, приведенные выше тесты могут быть использованы для изоляции всех отвалов, соответствующих более высокому уровню обогащения. Однако, без знания подробных сведений о материале загрузки, точное обогащение продукции с высокообогащенным ураном будет оставаться неизвестным, и по одним отвалам нельзя будет определить полную массу продукции. Тем не менее, можно будет проверить соответствие отвалов с декларациями. Поскольку отвалы могут быть датированы, их можно будет привязать к заявленной операции. Декларированное обогащение этих периодов определяет отношение масс продукции и отвалов, и согласованность этого отношения с заявленной массой продукции, измеренным количеством отвалов, и оцененной производительностью завода позволит повысить уверенность в правдивости декларации. Хотя масса продукции не может быть определена только с помощью этих средств, они значительно усложняют сокрытие продукции.

БОЛЕЕ КРУПНЫЕ ПРОГРАММЫ

Поскольку неопределенность в производстве расщепляющихся материалов переходит в неопределенность размеров арсеналов боеголовок, попыткам верифицируемым образом разоружить большие ядерные арсеналы Соединенных Штатов и России сильно помогли бы более точные оценки того, как много высокообогащенного урана находится в распоряжении обеих стран. Маловероятно, чтобы ядерная археология могла бы предоставить такую оценку с помощью обсуждаемых здесь средств, как из-за большей сложности их усилий по обогащению, так и из-за недоступности связанных с ними отвалов.

Простые заводы, обсуждаемые в предыдущих разделах, использовали одиночную загрузку и выпускали одиночный продукт, но большие программы Соединенных Штатов и Советского Союза были намного более сложными, чем эта простая картина. Например, в американском случае производство высокообогащенного урана в основном проводилось на газовых диффузионных заводах в Портсмуте и Ок-Ридже, но эти заводы загружались низко обогащенным ураном, произведенным на отдельном заводе в Падьюке, который, в свою очередь, часто питался ураном, который уже был облучен (и поэтому обеднен ураном-235). В то же время введение урана-236 в этот материал вводило новые ограничения на то, как относительные концентрации изотопов будут изменяться по мере их перемещения в системе. Иногда заводы работали с несколькими потоками продукции, что еще более усложняло учет.

В принципе, подробные записи обработки, приводящей к каждому набору отвалов, могут быть использованы для построения новых соотношений между составами отвалов и продуктов, которые все еще могут быть применены к определению соответствия с декларацией. Однако, процессы работы и в Соединенных Штатах, и в Российской Федерации, разрушают свидетельства, содержащиеся в отходах обогащения, посредством использования этих отвалов для других целей. В обеих странах отвалы повторно обогащались для извлечения урана-235, остающегося в этих отходах. В частности, более половины соответствующих отвалов в Падьюке повторно загружались в каскады, так же как и существенные части отвалов с двух других американских заводов, часто в смеси материалов из различных источников. Методы, придающие смысл отвалам от переработки таких смесей других отвалов, будут обладать гораздо большей неопределенностью по сравнению с теми, которые обсуждались здесь, и эффективность таких методов будет сильно зависеть от подробных записей эксплуатации различных заводов. Весьма сомнительно, чтобы такие записи стали доступными, и даже если они существуют, их легко будет фальсифицировать. Тем не менее, такие проверки согласованности деклараций позволят повышать доверие, и впоследствии их следует изучать.

Объем повторной переработки российских отвалов менее понятен, но, по оценкам, общее количество все еще доступных российских отвалов примерно одинаково с американскими запасами. Поскольку советское производство высокообогащенного урана превышало американское, вероятно, что эти отвалы повторно перерабатывались в еще большей степени. В течение прошедших лет российский высокообогащенный уран разбавлялся материалом, обогащенным до полутора процентов, для получения низко обогащенного урана для продажи в Соединенные Штаты по «сделке по БОУ»; если этот полуторапроцентный материал получался от обеднения отвалов, то эти обедняемые отвалы получались от отдельного соглашения по повторному обогащению отвалов от URENCO, а не от предыдущей деятельности Советского Союза по обогащению. Поэтому данная конкретная деятельность не влияет на применение этих мероприятий к советской оружейной программе.

Дополнительная часть запасов обедненных отвалов была использована для производства боеприпасов из обедненного урана. В середине 1990-х годов спрос на этот материал в Соединенных Штатах достигал 2 000 тонн в год, или примерно половина процента от полного объема отвалов. Возможно, что для этой цели было выведено до десяти процентов всего доступного запаса отвалов, и они больше не будут доступными для ядерной археологии, хотя выведенный материал не обязательно соответствует ранним периодам производства оружейного материала.

Хотя подобная деятельность делает невозможной полную верификацию американской и российской программ обогащения с использованием отвалов, доля отвалов, которые не были повторно обогащены или использованы для боеприпасов с обедненным ураном, может быть в принципе использована по крайней мере для демонстрации согласованности с объявленной деятельностью, при условии, что они были точно датированы, как это обсуждалось выше. К сожалению, даже это в скором времени может оказаться невозможным. В 2008 году в США завершено строительство двух заводов для преобразования оставшихся полумиллиона тонн отвалов из UF_6 в более устойчивую форму оксидов в течение наступающих десятилетий. Хотя такая конверсия не должна нарушить изотопного состава урана, она, вероятно, будет включать химическую переработку, которая сделает датирование отвалов очень трудным. В программах с такими большими объемами и диапазонами продуктов невозможность связать отвалы с определенным временным интервалом производства будет катастрофичной для любых надежд использования отвалов для целей верификации; в течение следующих 20 лет

любые измерения отвалов на американских производителях высокообогащенного урана станут просто невозможными. Планов преобразования остающихся российских отвалов из UF_6 не имеется.

ДАТИРОВАНИЕ ОТВАЛОВ

Способность точно датировать доступные отвалы очень полезна для определения массы отвалов, произведенных в заданное время, и для обнаружения государства, которое стремится утаить отвлечение материала. Из-за переработки при разделении вероятно, что уран-235 и уран-238 в отвалах покидают завод очищенными от любых продуктов распада каждого изотопа. Тем не менее, как только отвалы будут удалены, каждый изотоп урана начнет распадаться, оставляя дочерние продукты в концентрации, которая зависит от величины прошедшего времени. Поэтому измерение концентрации этих дочерних продуктов позволяет оценить, когда материал был вывезен с завода.

Для периодов полураспада, значительно превышающих временной масштаб деятельности по обогащению (что справедливо для всех имеющих отношение к делу продуктов распада), относительная погрешность в определении возраста материала по порядку величины равна относительной погрешности концентрации продукта распада. Даже для очень малых относительных уровней, относящихся к продуктам распада урана, современные методы масс-спектрометрии в принципе позволят провести измерения с точностью 0,1 процента, если можно будет получить однородные образцы.

При точности измерений 0,1 процента от возраста отвалов, не превышающего 10 лет (как в южноафриканском примере), неопределенность будет существенно меньше, чем количество времени, необходимого для заполнения резервуара. В этом случае измеренный возраст хорошо перемешанного резервуара представляет средний возраст содержимого резервуара. Раскрытие действительных дат начала и окончания этого резервуара потребует дополнительной информации, либо из записей, либо, как обсуждалось ранее, по датированию хронологически последовательных резервуаров.

Хотя могут быть достигнуты точности измерения на уровнях, требующихся для обсуждаемых здесь тестов, в сценариях реального мира, вероятно, возникнут значительные сложности. Реальная механика получения образца из контейнера отвалов, в которых содержатся продукты распада, будь то физическим перемещением твердого образца материала, или каким-то извлечением образца газовой фазы, содержащего как материал отвалов, так и продукты распада, может быть далекой от тривиальной. В этом анализе предполагалось, что доступна методика сбора образцов, позволяющая измерять концентрации продуктов распада; разработка такой методики потребует дальнейшей работы.

В принципе материал продукции также может быть датирован таким же методом, но химическая переработка может удалить соответствующие продукты распада, позволяя получать только нижние пределы возраста материала. В то время как большая часть материала продукта претерпевает какую-либо форму химической переработки, отвалы, продукт отходов, часто остаются нетронутыми. Как отмечалось ранее, здесь ситуация в США является исключением, поскольку приводятся в действие планы преобразования всех отвалов в более стабильную форму оксидов. Такая обработка драматически ослабляет возможность датирования материала.

УТАИВАНИЕ НЕОБЪЯВЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В большей части того, что обсуждалось выше, имеются очевидные способы изменения записей об отвалах таким способом, чтобы затруднить ядерному археологу обнаружение отвлечения материала. Такие сценарии можно будет рассмотреть в случае завода, похожего на южноафриканский, то есть, работавшего в течение примерно 10 лет, и с отвалами, продукцией, и записями, доступными для инспекции. Рассмотрим сценарий, в котором значимое для оружия количество высокообогащенного урана (25 кг) было отвлечено и скрыто, что соответствует примерно одному году переработки. Хотя скрытие или изменение отвалов делает такие методы ядерной археологии невозможными, инспекторы могут использовать эти методы для дополнения традиционного учета с целью обнаружения противоречивости в таком сценарии.

Удаление производства из записей

Если государство попытается удалить производство 55 кг высокообогащенного урана из своей декларации, но представит отвалы от своего производства инспектору, то тогда рассмотренные здесь методы выявят производство высокообогащенного урана в течение незаявленного периода и немедленно обнаружат отвлечение.

Соккрытие отвалов и заявление об отсутствии производства

Зная, что отвалы раскроют отвлечение, целеустремленный нарушитель, вероятно, будет скрывать их. Из-за того, что оставшиеся отвалы могут быть довольно точно датированы, пробел в доступных отвалах будет обнаружен, и будут потребованы объяснения. Возможно, что заявляющая сторона объявит, что в соответствующем году на заводе ничего не было произведено.

Возможность избежать обнаружения в таком сценарии будет зависеть от успешного изменения взаимосогласованным способом большого количества записей. В дополнение к сокращению приблизительно 30 тонн отвалов, заявитель должен будет изменить эксплуатационные записи завода так, чтобы они подтверждали отсутствие деятельности в течение целого года. В южноафриканском примере это должно будет включать подделку записей, относящихся к потреблению электроэнергии на заводе, введению примерно 30 тонн загружаемого материала и фторирования этой загрузки. Государство должно будет также убедительно объяснить подозрительный годовой перерыв, и надеяться, что интервью с большим количеством участников процесса не выявят ничего неправильного. Отметим также, что датирование отвалов позволит инспекторам обратить их внимание на соответствующий год.

Соккрытие отвалов и заявление о производстве низкообогащенного урана

Учитывая масштаб фальсификации, необходимой для заявления об отсутствии производства в том году, когда были спрятаны отвалы, может оказаться более целесообразным вместо этого заявить, что завод провел этот год, изготавливая низко обогащенную продукцию. Такой сценарий позволит избежать многих проблем, присущих предыдущему варианту, например, в нем не потребуются объяснять выключения завода, не отраженного в любых соответствующих записях, и он только потребует изменения количества загрузки (примерно на пятьдесят процентов) вместо того, чтобы скрывать ее целиком. Однако, здесь встает вопрос о том, что случилось с несколькими тоннами продукции с низко обогащенным ураном, которая была заявлена, но на самом деле не существует. Очевидно, что несоответствие отвалов и продукции за такой год вызовет подозрение.

Заявление о производстве высокообогащенного урана с качеством ниже оружейного

Если в декларации заявляется годовое производство высокообогащенного урана, но с качеством ниже оружейного (например, как обогащенный до 45 процентов материал, который Южная Африка использовала в топливе исследовательского реактора Сафари), то тогда не нужно будет скрывать отвалы, поскольку у инспектора не останется надежды измерить точную концентрацию урана-234 в загрузке завода. Хотя количество материала продукта, не вошедшего в декларацию, будет намного меньше, чем в предыдущем сценарии (около 100 кг), высокое обогащение делает этот материал гораздо более ценным, и маловероятно, чтобы он был утерян. Заявление о том, что материал был полностью сожжен в реакторном топливе, потребует довольно тщательно разработанных неправильных указаний, в особенности из-за того, что все производство высокообогащенного урана для реактора Сафари, вероятно, составит только около 70 кг (то есть, небольшое в масштабе требуемого отвлечения)¹⁰.

Распределение отвлекаемой продукции по всему времени работы завода

Вместо того, чтобы изменять записи для утаивания производства оружейного материала за седьмой год, государство может уменьшить докладываемое производства материала за каждый из семи лет, одновременно пряча 1/7 отвалов за каждый год. Это позволит в основном избежать осложнения привлечения внимания к году производства, в котором утаивалось отвлечение, как в предыдущих случаях. Хотя возможно, что такой сценарий труднее всего обнаружить, он внесет свои характерные осложнения. Если продукт доступен и может быть датирован, то тогда он должен будет соответствовать отвалам; отвлечение 1/7 отвалов каждого года может тогда потребовать 1/7 продукта каждого года, вместо простого отвлечения одного из семи ядерных боеприпасов. С другой стороны, несоответствие дат отвалов и продукта раскроет отвлечение. Преобразование высокообогащенного урана в металлическую форму может означать, что датирование продукта может определить возраст металла, но не первоначального высокообогащенного урана, но в случае программы с нехваткой материала, аналогичной южноафриканской, в которой материал преобразуется в пригодную к употреблению форму сразу же после его изготовления, эти две даты вполне могут оказаться достаточно близкими, чтобы можно было выявить несоответствие между отвалами и продуктом.

Дополнительный риск для государства, стремящегося скрыть отвлечение материала таким способом, состоит в том, что общая масса, производимая каждый год, определяется производительностью завода. Если производительность известна с точностью в 10 процентов, отвлечение будет ограничено таким уровнем. В случае Южной Африки это ограничивает отвлечение примерно 5 кг высокообогащенного урана в год в течение семи лет, что намного меньше 55 кг. Для того, чтобы утаить больше материала, чем могут объяснить неопределенности в производительности, потребуется изменить эксплуатационные записи, чтобы скрыть избыточную производительность, и можно будет удивиться тому, почему производительность была намного ниже тогда, когда производился высокообогащенный уран, чем она была в остальное время работы завода. Более того, учитывая скорости заполнения резервуаров на южноафриканском заводе, эта форма отвлечения должна будет сопровождаться частичным опустошением резервуаров с отвалами. Оставление частично заполненных резервуаров с отвалами может вызвать подозрения, в особенности, если доля недостающих отвалов и доля неучтенной производительности точно совпадают. В намного большей программе скрыть такие отвлечения будет проще.

Фальсификация отвалов

В последнем варианте утаивания необъявленного производства отвалы остаются на месте, но в них добавляется дополнительный уран-234 для того, чтобы отвалы от производства высокообогащенного урана были более похожими на отвалы от производства низко обогащенного урана. Смешивая отвалы от 93-процентного обогащения с отвалами однопроцентного обогащения в соотношении 2 к 1, оператор делает их похожими на отвалы от производства 4-процентного продукта. Однако, попытки датировать смешанные отвалы приведут к результату, находящемуся на одной трети пути от реальных времен производства обеих компонентов. Если отвалы от однопроцентного материала были только что изготовлены, то это вероятно приведет к сбивающей с толку несогласованности в хронологии отвалов. Отметим также, что в этом примере масса отвалов увеличивается на 50 процентов, что драматически изменит подразумеваемую производительность завода, или потребует утаивания этого дополнительного материала.

Если отвалы от однопроцентного обогащения придут приблизительно одновременно с отвлечением высокообогащенного урана, то обнаружить отвлечение будет очень трудно. Однако, вероятно, что отвалы для разбавления придут с другого завода, не входящего в декларацию под верификацией, для того, чтобы избежать объяснения отсутствия однопроцентных отвалов. Утаивание становится довольно запутанным.

В каждом из этих случаев утаивание незаявленного производства в принципе может сойти с рук. Однако, эти искажения для ухода от обнаружения создают несогласованности с другими методами ядерного учета, и усилия, привлекаемые для обмана инспектора, становятся значительными. Хотя утаивание и не невозможно, оно определенно не просто.

ВЫВОДЫ

Выше рассматривались несколько тестов, которые могут быть применены к отвалам завода обогащения урана для обнаружения необъявленного производства высокообогащенного урана оружейного качества. В тех случаях, где в качестве загрузки используется природный уран и возможно провести измерения отвалов:

- При заданном содержании урана-234 в загрузке можно будет рассчитать обогащение продукции. Если доступны образцы загрузки или продукта, можно будет восстановить содержание урана-234 в загрузке.
- Если известно обогащение продукции, то можно будет рассчитать массу продукции, соответствующую количеству отвалов. В той степени, в которой известна производительность, можно будет независимо рассчитать полную массу продукции.
- Если содержание урана-234 в загрузке неизвестно, но может быть ограничено достаточно узким интервалом, то тогда часто можно будет отличить производство низко обогащенного урана от производства высокообогащенного урана по отвалам. Если возможно, что природные вариации концентраций урана-234 будут достаточно узкими, то это различие может быть проделано. Если, как это также возможно, природный интервал будет несколько шире, чем это требуется для различения, то интервал может быть сужен посредством измерения материала загрузки или продукции.
- Масса отвалов в комбинации со знанием производительности завода и достаточно хорошими оценками дат начала и окончания производства отвалов, может предоставить независимую оценку того, что производил завод – низко обогащенный или высокообогащенный уран. Комбинация этого теста с предыдущим должно позволить провести дискриминацию в большинстве подходящих случаев.

- Без точного знания обогащения продукта определение произведенной массы продукта затруднено, но там, где была сделана декларация, можно будет проверить согласованность объявленной массы и обогащения продукта, используя отвалы.
- Утаивание необъявленной продукции возможно, но требует тщательно разработанных мероприятий для того, чтобы избежать обнаружения.

При условии, что проект обогащения небольшой и простой по конструкции, можно сделать подробные выводы по обогащенному продукту, соответствующему любым доступным отвалам. Если доступна большая часть отвала завода, то ядерная археология может значительно затруднить утаивание производства высокообогащенного урана. В этом смысле она может предоставить инспекторам комплексов производства расщепляющихся материалов ценный инструмент верификации. Напротив, сложность потоков материалов в большой программе обогащения делает применение этих методов намного более трудным. В этом случае даже оценка согласованности между декларацией и доступными отвалами может оказаться проблематичной, хотя эта возможность заслуживает дополнительного изучения.

Очевидно, что эти инструменты могут оказаться полезными в верификации прошлого производства на обогатительном заводе после окончания его эксплуатации. Кроме того, исследование методов верификации может также помочь в разъяснении того, какие виды данных следует собирать во время эксплуатации завода для того, чтобы упростить будущий учет. Например, записи изотопного состава загрузки и отходов, включая следовые изотопы, могут предоставить большую прозрачность в эксплуатации завода. Измерения, или даже образцы, там, где это возможно, конечно будут предпочтительнее теоретических значений. В некоторых случаях отвалы, связанные с прошлым производством высокообогащенного урана, были переработаны с целью дальнейшего обогащения, что сделало их непригодными для многих из представленных здесь тестов. Если это так, то проведение измерений отходов до их последующей переработки предотвратит безвозвратную потерю этих данных. Датирование материала может быть облегчено, если не смешивать отходы из различных периодов, или может быть даже верифицируемо пломбировать контейнеры. Кроме того, верификация может быть облегчена, если вести точные записи, относящиеся к эксплуатационной производительности завода, таких параметров, как количество действующих разделительных блоков, потребление электроэнергии и т.п. Производительность завода определяет количество произведенного на нем материала; понимание способов определения этой производительности должно стать предметом следующей работы. Хотя такие мероприятия могут быть фальсифицированы без обнаружения, они могут усложнить утаивание производства материала, и предоставить проекту верификации большее доверие. Чем раньше в программе будет использоваться такая информация, тем большую уверенность она будет вызывать.

По существу, многие эксплуатационные параметры завода относятся друг к другу хорошо определенными способами; чем больше измерений и записей будет сохраняться во время эксплуатации завода, тем больше тестов можно будет провести для определения соответствия с заявленной деятельностью. Реализуя соответствующие хранение записей и учетные измерения с самого начала, руководители завода будут способствовать последующей верификации; записи программы должны сохраняться с мыслью о том, программа может быть подвергнута аудиторской проверке в будущем, и в отличие от того, как многие программы проводились в прошлом. Таким способом можно будет избежать больших неопределенностей в прошлом производстве расщепляющихся материалов, что поможет сделать возможным верифицируемое разоружение.

В то же самое время следует снова подчеркнуть, что реальные обогатительные предприятия неизмеримо сложнее, чем рассматриваемые здесь модельные установки.

Сделанные здесь выводы основаны на нескольких нетривиальных предположениях, в том числе и на возможности предлагаемых измерений. Необходима дальнейшая работа для того, чтобы оценить, как предложенные здесь проверки согласованности могут быть применены, и с какой трудностью, на более реалистичных предприятиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор с благодарностью признает поддержку исследовательской стипендии от Проекта по управлению атомом и Программы по международной безопасности в Белферовском центре по науке и международным отношениям Гарвардского университета; представленная здесь работа была проведена благодаря этой щедрой поддержке. Мнения, представленные в этой статье, принадлежат автору, и они не обязательно отражают мнения Государственного департамента США или Правительства США. Автор благодарен за полезные обсуждения и комментарии от Фрэнка фон Хиппеля, Стива Феттера, Алекса Глезера, Мэтью Банна, Джэвида Райта, Хуи Жанга, Мартина Мэлина и Елены Родригез-Виетез.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Steve Fetter, "Nuclear Archaeology: Verifying Declarations of Fissile-material Production," *Science and Global Security*, 3 (1993): 3–4, 237–261.
2. Thomas Wood, Bruce Reid, John Smoot, and James Fuller, "Establishing Confident Accounting for Russian Weapons Plutonium," *The Nonproliferation Review*, 9: (2002).
3. Fetter 1993 (ссылка 1); Drell, S, JASON Program Office, *Verification of Dismantlement of Nuclear Warheads and Controls on Nuclear Materials* (McLean, VA: MITRE Corporation, 1993) 57–58.+
4. A. De La Garza, G. A. Garrett, and J. E. Murphy, "Multicomponent Isotope Separation in Cascades," *Chemical Engineering Science*, 15 (1961): 188.
5. H. Wood, "Effects of Separation Processes on Minor Uranium Isotopes in Enrichment Cascades," *Science and Global Security*, 16 (2008): 1–2, 26.
6. Смотрите, например, E. Von Halle, "Multicomponent Isotope Separation in Matched Abundance Ratio Cascades Composed of Stages with Large Separation Factors," in *Proceedings of the 1st Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases*, ed. K. G. Roesner, 325–356.
7. M. Ford, "Uranium in South Africa," *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, Vol. 93, No. 2 (1993), 37–58.
8. K. Rosman and P. Taylor, "Isotopic Compositions of the Elements 1997," *International Union of Pure and Applied Chemistry Technical Report* (1997).
9. S. Richter, A. Alonso, W. De Bolle, R. Wellum, and P. Taylor, "Isotopic 'Fingerprints' for Natural Uranium Ore Samples," *International Journal of Mass Spectrometry*, 193 (1999), 9.
10. David Albright, Frans Berkhout, and William Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996; World Inventories, Capabilities and Policies*, SIPRI (1997), 387.