

УПРАВЛЕНИЕ ЗАПАСАМИ УРАНА-233 В СОЕДИНЕННЫХ ШТАТАХ

Роберт Альварец

АННОТАЦИЯ

В Соединенных Штатах в рамках их военной и гражданской ядерных программ было произведено около 2 тонн урана-233, пригодного для оружия расщепляющегося материала. Было выделено 1,55 тонны урана-233 с оцениваемыми затратами от 5,5 до 11 миллиардов долларов. Примерно 96 кг из этих 1,55 тонны могут оказаться неучтенными. Меняющиеся и зависящие от площадки оценки позволяют предполагать, что контроль запасов урана-233 в США и их подотчетность должны стать более строгими. Около 428 кг урана-233 хранится в Ок-Риджской национальной лаборатории (ORNL) в штате Теннесси в здании 3019, построенном 69 лет назад, которое Министерство энергетики США считает «самым старым ядерным объектом в мире», и которое не удовлетворяет современным требованиям защиты и безопасности.

В настоящее время Министерство энергетики США назначило дату утилизации 428 кг материала на 2018 год, больше чем через 20 лет после того, как были официально признаны существенные уязвимости в охране окружающей среды, защите и безопасности. Для выполнения этой задачи Министерство энергетики планирует отказаться от своих собственных критериев приемлемости отходов, чтобы позволить прямое захоронение значительной части урана-233 в грунте на небольшой глубине в августе 2014 года. Предоставление разрешения на захоронение создаст плохой прецедент для международных мер безопасности и стандартов для утилизации переработанных отходов с высокой концентрацией расщепляющихся материалов.

Роберт Альварец работает в Институте политических исследований, Вашингтон, округ Колумбия, США.

Почтовый адрес для корреспонденций: Robert Alvarez, Institute for Policy Studies, 1112 16th St. NW, Suite 600, Washington DC 20036, USA.

Адрес электронной почты: kitbob@erols.com

Статья получена 5 августа 2011 года и принята к публикации 16 октября 2012 года.

ВВЕДЕНИЕ

Уран-233 был открыт в 1940 году в Калифорнийском университете в Беркли; подобно плутонию-239 и урану-235 он является расщепляющимся материалом и может быть использован в ядерном оружии и в ядерных реакторах.

Уран-233 производится в реакторе или с помощью ускорителя при бомбардировке тория-232 нейтронами. Поскольку торий-232 не расщепляется, то для производства урана-233 требуется уран-235 или другие расщепляющиеся материалы. После периода охлаждения в несколько лет уран-233 можно будет извлечь из облученного тория посредством химического разделения на установке для регенерации ядерного топлива.

По пригодности для изготовления ядерного оружия уран-233 сравним с плутонием. Раствор, содержащий всего лишь 0,5 кг урана-233, может достичь критичности благодаря присутствию воды. В форме металла минимальная критическая масса примерно равна 6 кг¹. Смесь урана-238 с 12 процентами урана-233 будет иметь такую же критическую массу, как уран, обогащенный ураном-235 до 20 процентов, что считается верхним допустимым пределом для низко обогащенного урана².

В этой статье представлены краткий обзор истории производства урана-233 в Соединенных Штатах и оценки текущих запасов. Здесь рассматривается также история усилий США в разработке использования урана-233 в топливе для реакторов атомных электростанций, а также делаются оценки опасений в отношении защиты и безопасности запасов урана-233. Статья завершается обсуждением наследия урана-233 и недостатков текущих планов Министерства энергетики по утилизации отходов.

ЗАПАСЫ УРАНА-233

С 1940-х годов до середины или конца 1950-х годов уран-233 производился в Соединенных Штатах в малых количествах для исследований и разработок ядерного оружия. В 1955 году на Невадском атомном испытательном полигоне было взорвано первое ядерное взрывное устройство с ураном-233 мощностью 22 килотонны³. По словам одного из официальных представителей американской лаборатории атомного оружия, «было показано, что уран-233 в высшей степени удовлетворителен как материал для оружия»⁴. Однако, в 1954 году предшественник Министерства энергетики, Комиссия по атомной энергии провела всестороннее исследование, но не рекомендовала производства урана-233 для изготовления ядерного оружия. Основным фактором была радиационная опасность от урана-232, который также образуется при облучении тория. Эксперт с предприятия Комиссии по атомной энергии в Хэнфорде заявил, что «Гамма-излучение, связанное с цепочкой урана-232, является серьезным осложнением в изготовлении и использовании урана-233»⁵.

В начале 1960-х годов возобновился интерес к использованию урана-233 в ядерном оружии после того, как «было обнаружено, что плутониевые компоненты в стратегических боеголовках в арсенале могут подвергаться опасности серьезного повреждения, поскольку нейтронное облучение в космосе при взрыве ракет-перехватчиков с ядерной боеголовкой на расстоянии меньше десяти миль вызовет деление ядер плутония». Уран-233 более стабилен при высоких температурах, чем плутоний, и поэтому боеголовки с ураном-233 могут оказаться более надежными⁶.

Это послужило причиной начала разработки на ядерных производственных площадках Комиссии по атомной энергии методов производства «чистого» урана-233 с содержанием урана-232 меньше 5 частей на миллион для уменьшения радиационной опасности. Для достижения этой цели на площадке в Хэнфорде были предложены мероприятия, в которых: (1) должен был облучаться торий, полученный из чистой монацитово-руды с низким содержанием изотопа тория-230; (2) материал должен был облучаться в потоке нейтронов, относительно свободном от нейтронов с энергией выше 6 МэВ, что требовало реактора со специальной схемой замедления; и (3) облучение тория должно было остановиться тогда, когда он еще содержал протактиний-233 (с периодом полураспада 27 суток), который мог быть отделен от урана-232 до того, как он распадется до урана-233⁷.

В 1966 году интерес к крупномасштабному производству урана-233 для использования в оружии уменьшился, но производство для исследований и разработок продолжалось. В обзоре истории завода Комиссии по атомной энергии в Роки Флэтс, штат Колорадо, на котором изготавливались компоненты ядерного оружия, отмечалось, что компоненты из урана-233 изготавливались с 1965 года до начала 1980-х годов⁸. В период с 1955 до 1968 годов было проведено несколько испытаний ядерного оружия с использованием урана-233⁹.

В 1965 – 1970 годах уран-233 производился в более заметных количествах из-за ожиданий возможного его использования в топливе реакторов атомных электростанций. Разработка урана-233 как потенциального топлива требовала строительства и эксплуатации исследовательских установок ториевого топливного цикла, исследовательских реакторов, установок для радиохимического разделения, «горячих» камер, предприятий по изготовлению топлива, и хранилищ отработавшего ториевого топлива коммерческих реакторов в Министерстве энергетики и предшествующих ему агентствах.

В период от 1954 до 1970 года уран-233 производился на промышленных реакторах для производства оружейного материала в Саванна-Ривер в штате Южная Каролина, на площадке в Хэнфорде, штат Вашингтон, и на нескольких коммерческих атомных электростанциях (Indian Point I, Dresden I, Peach Bottom I, и Fort St. Vrain). Было произведено приблизительно две тонны урана-233, из которых 1556 кг было отделено от 857 тонн тория на перерабатывающих предприятиях (смотрите таблицу 1), с оцениваемой общей стоимостью от 5,5 до 11 миллиардов долларов (в долларах 2012 года), включая связанные расходы на очистку окружающей среды¹⁰. Около 665 кг выделенного урана-233 впоследствии было использовано в топливе исследовательских реакторов Министерства энергетики и (или) было потеряно в отходах¹¹. Около 403 кг урана-233 было произведено в коммерческих реакторах атомных электростанциях и правительственных реакторах, но не было переработано¹².

На 1999 год на площадках Министерства энергетики хранилось приблизительно 805 кг выделенного урана-233¹³. Это создает расхождение с общим количеством выделенного на перерабатывающих предприятиях продукта примерно в 96 кг, или 6 процентов. Для сравнения, официальное расхождение запасов плутония в Министерстве энергетики, опубликованное в 1996 году, равнялось 2,1 процента¹⁴.

Уран-233 как топливо для энергетических реакторов

В 1960-х годах и в начале 1970-х годов Комиссия по атомной энергии предполагала, что к 2000 году общая электрическая мощность атомных электростанций в Соединенных Штатах достигнет 1000 ГВт (эл.), и примерно такая же мощность будет генерироваться зарубежными электростанциями. В результате Комиссия по атомной энергии предсказывала, что мировые запасы урана будут быстро истощаться. Эти предположения инициировали два направления исследований и разработок для нового поколения реакторов, которые могли бы производить больше расщепляющегося материала, чем они потребляли. Как выяснилось, предсказания Комиссии по атомной энергии по глобальной мощности атомных электростанций на 2000 год оказались на порядок величины больше реальных показателей.

Таблица 1. Сводка переработки тория и урана-233 в Соединенных Штатах.

Площадка	Годы	Переработанный торий (тонны)	Выделенный уран-233 (кг)	Содержание урана-232 (ppm ⁵)	Используемый процесс
Ок-Ридж ¹	1954 - 1958	35	55	10 - 40	Interim 23 Thorex
Саванна Ривер ²	1964 - 1969	240	580	3,9 - 228	Interim 23 Thorex
Хэнфорд ³	1965 - 1970	565	820	6 - 10	Interim 23 Acid Thorex
Индиан Пойнт I ⁴	1968 - 1969	17	101	125 - 144	Interim 23
Итого		807	1556		

¹Oak Ridge National Laboratory, R.E. Brooksbank, W.T. McDuffee, R.H. Rainey, A Review of Thorium Fuel Reprocessing Experience, Oak Ridge TN, Conf-780223-3, January 1978.
²Hanford Site, Atomic International Division, R.L. Wasler, Purex Process Operation and Performance 1970 Thoria Campaign, RHO-SA-37, Conference Proceedings, AIChE 84th Annual Meeting, Atlanta, GA, February, 1978.
³Savannah River Plant, E.I. du Pont de Nemours and Company, D.A. Orth, SRP Thorium Processing Experience, Aiken, SC, June 1978.
⁴Oak Ridge National Laboratory, Chemical Technology Division Progress Report for the Period April 1983, to March 21, 1985, ORNL-6153, Oak Ridge, TN, October 1985.
⁵ppm – частей на миллион

Первое направление предусматривало разработку реакторов на быстрых нейтронах. Деление «быстрыми» нейтронами высвобождало больше нейтронов в расчете на одно деление, чем деление тепловыми нейтронами в обычных реакторах. В частности, реакторы на быстрых нейтронах с плутониевым топливом обещали производить электроэнергию и на тридцать процентов больше топлива, чем они потребляли.

Вторым направлением была разработка реакторов на медленных нейтронах на базе тория. Это приводило к производству значительного количества урана-233 для реакторного топлива. Привлекательность ториевого топливного цикла состояла в изобильных запасах природного тория и в потенциале урана-233 для увеличения эффективности производства расщепляющегося материала в реакторах на медленных нейтронах по сравнению с ураном-235 и плутонием. Например, хотя в современных реакторах на легкой воде и образуется плутоний-239, в одном акте деления урана-235 или плутония-239 образуется только 0,6 ядра этого изотопа плутония (коэффициент конверсии около 0,6). Для тория коэффициент конверсии может превышать единицу, что позволяет ожидать, что такой реактор может производить больше расщепляющегося материала, чем в нем уничтожается.

Были начаты исследования и разработки нескольких типов реакторов для демонстрации того, что образующийся из тория уран-233 может стать безопасным и экономичным источником электроэнергии. Были инициированы проекты, демонстрирующие жизнеспособность использующих уран-233 реакторов-размножителей на медленных нейтронах, в частности, реактора Элк Ривер в штате Миннесота, реактора на расплавленных солях в Ок-Риджской национальной лаборатории, и реактора-размножителя на легкой воде в Шиппингпорте в штате Пенсильвания¹⁵. Однако, в 1977 году работы по ториевому топливному циклу были фактически остановлены в пользу реакторов на быстрых нейтронах с плутониевым топливом. В общей сложности Комиссия по атомной энергии и ее наследники потратили миллиарды долларов на исследования и разработки по ториевому топливному циклу.

Другим фактором, который мог повлиять на прекращение работ по ториевому топливному циклу, было то, что торий был более радиоактивным, чем уран, и это требовало дополнительных мер предосторожности. Мощность дозы на поверхности 55-галлонного (200-литрового) контейнера с окисью тория равнялась примерно 60 миллирентген в час, примерно в 13 раз больше, чем для аналогичного контейнера с окисью урана¹⁶. Рабочий, находящийся внутри хранилища ториевого материала, мог получать мощность дозы в 60 – 100 миллирентген

в час, достигая принятого в США предела экспозиции в 5 бэр всего за 6 суток.

После нескольких неудачных попыток организации ториевого топливного цикла коммерческая ядерная промышленность также отошла от тория. Первым использующим торий коммерческим ядерным реактором был первый блок электростанции Индиан Пойнт, начавший работу в 1962 году. Однако, расходы для извлечения урана-233 из этого реактора назвали «финансовой катастрофой»¹⁷. В уран-233 было преобразовано менее 1% облученного тория¹⁸, после чего установка была переведена на урановое топливо. Согласно мнению должностного лица, связанного с программой производства урана-233 в Комиссии по атомной энергии в 1968 году, «Материалу из Индиан Пойнт не нашлось ожидаемого применения, и поэтому он был помещен на длительное хранение в бак объемом 18 кубометров»¹⁹. По соображениям безопасности этот материал в 1979 – 1985 годах был преобразован в твердое состояние в Ок-Риджской национальной лаборатории²⁰. Этот материал, известный как материал из Проекта отверждения урана «Консолидейтед Эдисон», был обогащен примерно на 86 процентов²¹. В нем содержалось 796,3 кг урана-235 и 101,1 кг урана-233 при общем содержании урана в 1042 кг.

Реактор Пич Боттом Блок 1 – прототип высокотемпературного реактора с газовым охлаждением мощностью 40 Мвт, использующего ториевого топлива. Он работал с 1967 по 1974 год. Реактор был закрыт после многочисленных повреждений топливных элементов, которые привели к значительному увеличению времени простоя²². Его отработавшее топливо в настоящее время хранится в Национальной инженерной лаборатории Айдахо²³.

На электростанции Форт Сент Врейн был установлен высокотемпературный реактор с газовым охлаждением мощностью 330 МВт, использовавший топливо с торием и ураном-235, и работавший с 1979 по 1989 год. Сотни неисправностей, включавших отказы оборудования, утечки газа, повреждения топлива, трещины в трубопроводах и графите, и человеческие ошибки, привели к его закрытию²⁴. Министерство энергетики несет ответственность за его отработавшее топливо, хранящееся в сухих контейнерах на площадке реактора²⁵.

В июне 2000 года по предложению Ок-Риджской национальной лаборатории Министр энергетики дал указание Управлению ядерной энергетики использовать запасы избыточного урана-233 для увеличения производства медицинских изотопов. Этот процесс, включающий несколько этапов в различных местоположениях, требовал новых установок для извлечения тория-229 с периодом полураспада 8 000 лет, продукта распада урана-233 с периодом полураспада 160 000 лет, который затем распадался с образованием актиния-225 (период полураспада 10 суток) и последующих распадов через короткоживущие промежуточные продукты до висмута-213 (период полураспада 46 минут), радиоизотопа, представляющего потенциальный интерес для медицинской терапии²⁶. Однако, в январе 2001 года Министерство энергетики решило, что, помимо медицинских целей, уран-233, хранящийся в Ок-Риджской национальной лаборатории, не имеет никакого программного назначения²⁷. В 2005 году Конгресс США прекратил производство медицинских изотопов из запасов Ок-Риджской национальной лаборатории и возложил ответственность за их утилизацию на Бюро управления окружающей средой²⁸. В том же году Конгресс также поручил Министерству обороны США распорядиться 3 222 тоннами тория в американских запасах стратегических материалов²⁹.

МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Правительство США классифицирует выделенный уран-233 как стратегический специальный ядерный материал первой категории, то есть материал, который «в указанных формах и количествах может быть использован для создания импровизированного ядерного устройства, способного осуществить ядерный взрыв»³⁰. Соединенные Штаты и Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) требуют гарантий для урана-233 в количествах, превышающих 2 кг³¹. Количество первой категории для высокообогащенного урана (ВОУ) равно 5 кг. Согласно Министерству энергетики, для запасов урана-233 требуется строгая физическая безопасность, для того, чтобы предотвратить «несанкционированную возможность инициировать или достоверно угрожать инициированием ядерного рассредоточения или детонации ... для сборки импровизированного ядерного устройства на площадке»³².

Интерес к использованию урана-233 в ядерном оружии уменьшался из-за его радиологической опасности и связанных с ним расходов на защиту материала и обеспечения безопасности сотрудников. Особое опасение вызывала экспозиция к урану-232, который образуется вместе с ураном-233, и в 60 миллионов раз более радиоактивен, чем уран-238. Так происходит из-за короткого времени жизни урана-232 и гамма-излучения высокой энергии, рождающегося в схеме распада дочерних продуктов урана-232, прежде всего таллия-208, излучающего при своем распаде гамма-лучи с энергией 2,6 МэВ. От такого гамма-излучения трудно защититься. С периодом полураспада в 72 года распад урана-232 увеличивает внешние уровни проникающей радиации (гамма-лучей), которые достигают максимума после 10 лет (смотрите рисунок 1).

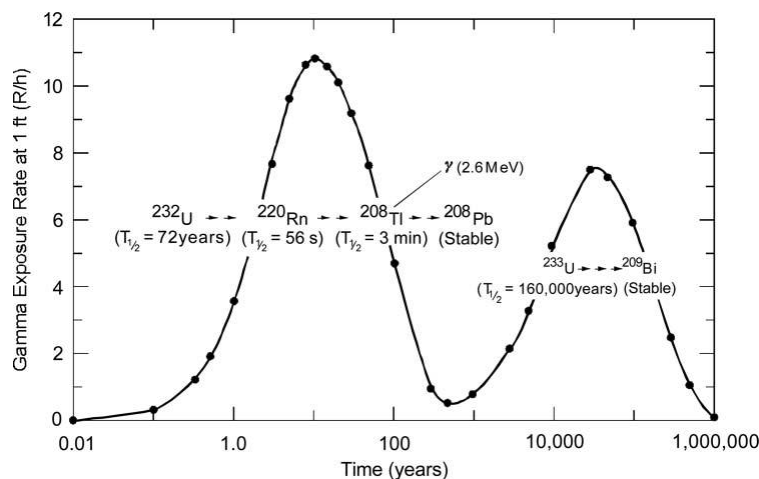


Рисунок 1. Мощность дозы гамма-излучения урана-233 (ORNL/TM-13553). По горизонтальной оси в логарифмическом масштабе отложено время в годах, по вертикальной – мощность дозы гамма-излучения на расстоянии в один фут (30,4 см) в рентгенах в час.

Материал из Проекта отверждения урана «Консолидейтед Эдисон» (CEUSP) в здании 3019 Ок-Риджской национальной лаборатории был упакован более 25 лет назад и содержит наивысшую концентрацию расщепляющегося материала (урана-233 и урана-235) на предприятии – приблизительно 86 процентов от общего содержания урана.

Тем не менее, уровень загрязнения ураном-232 не считается адекватным барьером для того, чтобы остановить террориста при изготовлении импровизированного ядерного устройства. Научные работники Ок-Риджской национальной лаборатории говорят, что «... если похититель мотивирован иностранными националистическими помыслами, то мощность дозы облучения не будет важна, поскольку даже при таких уровнях экспозиция не приведет к немедленной смерти»³³. Уран-233, хранящийся в настоящее время на площадках Министерства энергетики обычно содержит от 6 до 162 частей урана-232 на миллион, что делает его уязвимым при захвате террористами³⁴. Это подтверждается опытом Министерства энергетики при работе с уровнями загрязнения ураном-232, сравнимым с уровнями загрязнения в материале, хранящемся в здании 3019 Ок-Риджской национальной лаборатории, при изготовлении компонентов оружия. Например, в 1960-х и 1970-х годах завод Министерства энергетики в Роки Флэтс перерабатывал уран-233 в форме уранилнитрата и затем изготавливал компоненты оружия из металлического урана-233 в килограммовых количествах. В отчете Министерства энергетики по обращению с ураном-233 в Роки Флэтс сообщается:

В материале содержалось также приблизительно 50 частей на миллион (ppm) загрязнения Содержание урана-232 в 50 ppm соответствует мощности дозы приблизительно в 13 рентген/час на расстоянии в 1 фут, и, согласно экстраполяции, содержание в 5 – 10 ppm будет соответствовать мощности дозы около 5 рентген/час³⁵.

При таких обстоятельствах для накопления потенциально смертельной дозы потребуется от одной до двух недель экспозиции при 12-часовом рабочем дне.

УПРАВЛЕНИЕ НАСЛЕДИЕМ УРАНА-233

Отсутствие точной инвентаризации урана-233 вызывало опасения. В 1996 году генеральный инспектор Министерства энергетики выпустил аудиторский отчет с такими выводами: «руководство трех площадок [Ок-Риджской национальной лаборатории, завода Роки Флэтс и Национальной лаборатории Айдахо] не исполняло всех требуемых физических инвентаризаций, а на одной площадке не проводились измерения из-за соображений безопасности и операционных перерывов ... чем больше задерживались полные физические инвентаризации, тем больше был риск того, что может произойти и остаться незамеченным несанкционированное перемещение специальных ядерных материалов»³⁶.

В годы, последовавшие за аудиторским отчетом генерального инспектора, Министерство энергетики сообщало различающиеся оценки запасов в Ок-Ридже и Айдахо. Например, в опубликованных источниках количества урана-233, хранящегося в здании 3019 Ок-Риджской национальной лаборатории находились в пределах от 359 кг³⁷ до 450 кг³⁸ с неопределенностью в 91 кг. В Национальной лаборатории Айдахо Министерства энергетики данные инвентаризации необлученного урана-233 находились в пределах от 352 кг³⁹ до 411,36 кг⁴⁰ с неопределенностью в 59,36 кг.

Возможно, что больше урана-233 было потеряно в отходах, или в разбавленных формах, чем это сообщалось в опубликованных источниках. Кроме того, количество урана-233 в Лос-Аламосской национальной лаборатории в 1997 году и количество урана, использованного в испытаниях ядерного оружия, все еще остается засекреченным. Согласно Министерству энергетики, до 1970-х годов, когда был произведен весь уран-233, технологии измерения количества материала «были менее точными, чем сейчас»⁴¹.

В здании 3019 хранится 1100 контейнеров с ураном-233⁴². Это заслуживает включения в перечень Национального регистра исторических мест⁴³. Министерство энергетики обнаружило, что это сооружение «повреждено так, что затраты на его ремонт не могут быть оправданы. Для того, чтобы удовлетворить текущим стандартам Министерства энергетики по хранению, и чтобы предоставить непрерывную защиту от потенциальных аварий с ядерной критичностью и от кражи материала, потребуются значительные ежегодные затраты».

Мощности дозы на поверхности контейнеров из здания 3019 лежат в пределах от 1 до 300 рентген/час⁴⁴. Примерно в 500 контейнерах находится то, что считают материалом «высокой чистоты» (примерно 197 кг), в котором содержится менее 50 частей урана-232 на миллион⁴⁵. Здание 3019, в котором находится приблизительно 1 000 килограммов урана-233 и урана-235, не удовлетворяет текущим требованиям безопасности первой категории. Например, партия материала, которая пришла с реактора Индиан Пойнт Блок 1, перемешана с примерно в восемь раз большим количеством урана-235 (796 кг) в ВОУ, другого расщепляющегося материала первой категории⁴⁶. Оно также не удовлетворяет требованиям МАГАТЭ по физической безопасности, которые включают наблюдение за проникновением и обнаружение перемещения⁴⁷.

В 1976 году, после того, как Министерство энергетики прекратило разработку ториевого ядерного топливного цикла, были предприняты усилия для стабилизации некоторой части избыточного урана-233 в Ок-Риджской национальной лаборатории. За исключением этого, на американские запасы избыточного урана-233 десятилетиями не обращали внимания. В декабре 1996 года Отдел окружающей среды, безопасности и охраны здоровья Министерства энергетики провел оценку уязвимости хранения высокообогащенного урана на своих площадках. Было обнаружено, что запасы выделенного урана-233 на нескольких площадках хранились в условиях, которые увеличивали риски для окружающей среды, безопасности и охраны здоровья. Согласно этой оценке:

Некоторые из существенных уязвимостей для окружающей среды, безопасности и охраны здоровья включают уран-233. ... Были отождествлены четырнадцать уязвимостей, относящихся к урану-233. Четыре из них входят в наиболее существенные, обнаруженные в данной оценке. Уран-233 хранился в металлических контейнерах, на подкладках в открытом пространстве, в бочках, закопанных в насыпных холмах, или десятилетиями хранился без проверок⁴⁸.

Особенные опасения вызывали запасы в здании 3019 Ок-Риджской национальной лаборатории, построенном в 1943 году, и вмещающем 1 100 «канистр» с ураном-233 (смотрите рисунок 2). Это сооружение первоначально предназначалось для установки радиохимической переработки, а не для долгосрочного хранения примерно 1 000 кг расщепляющихся материалов первой категории (урана-233 и урана-235). В начале 1990-х годов оно было обозначено как «национальное хранилище для урана-233» и в нем содержался материал в форме оксидов и металлов с площадки Саванна-Ривер, Ок-Риджской национальной лаборатории, завода Роки Флэтс, Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса и Лос-Аламосской национальной лаборатории.

Тремя годами ранее в 1993 году проверка здания 3019 Министерством энергетики показала, что документация по безопасности «удовлетворительна»⁴⁹. Оценка степени защищенности Министерством энергетики в 1996 году показала, что, вопреки документам по ядерной безопасности сооружения, выброса из контейнеров в окружающую среду «следует ожидать в следующие пять лет в тех некоторых упаковках, возраст которых приближается к 30 годам, и которые не проходят регулярной проверки»⁵⁰.

Одновременно Совет Министерства энергетики по безопасности оборонных ядерных предприятий (DNFSB) выпустил критический отчет по безопасности запасов урана-233 в Министерстве энергетики, выделив проблемы в здании 3019⁵¹. В результате в 1997 году Совет подготовил рекомендацию, требующую от Министерства энергетики реализовать общеминистерский проект для исправления недостатков в хранении⁵². Здание 3019 в Ок-Риджской национальной лаборатории вошло в перечень наиболее существенных уязвимостей.

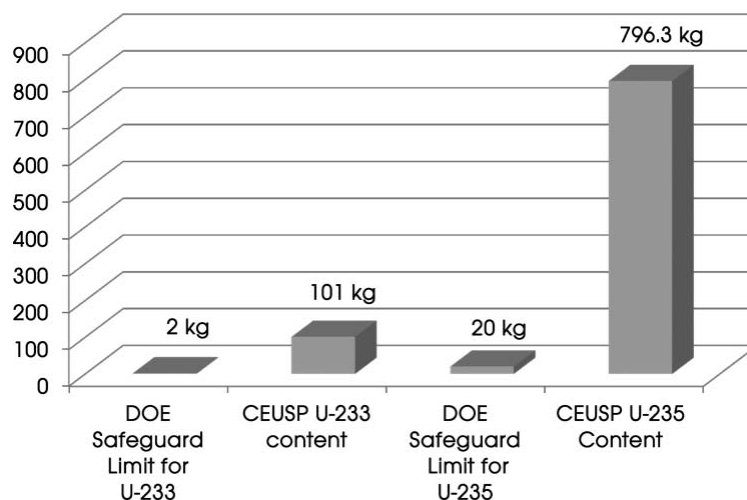


Рисунок 2. Захоронение материала из Проекта отверждения урана «Консолидейтед Эдисон» (CEUSP) нарушает нормы безопасности утилизации Министерства энергетики. По вертикальной оси отложены массы материала в килограммах. Надписи на горизонтальной оси (слева направо): 1 – предел применения мер безопасности для урана-233 в Министерстве энергетики; 2 – содержание урана-233 в материале CEUSP; 3 – предел применения мер безопасности для урана-235 в Министерстве энергетики; 4 – содержание урана-235 в материале CEUSP.

Риски в здании 3019 связаны с природными явлениями (землетрясения, торнадо), пожарами, взрывами и ядерными критическими авариями. По оценкам, последствия от возможных пожаров, взрывов и других неисправностей контейнеров, содержащих уран-233 и уран-235, выделенных из топлива реактора Индиан Пойнт Блок 1 (материал CEUSP) могут привести к потенциальным дозам за пределами площадки в 45 бэр на расстоянии приблизительно в 6 миль⁵³, что в 450 раз превышает годовой предел экспозиции для населения вблизи площадок Министерства энергетики⁵⁴. Понадобилось одиннадцать лет для того, чтобы Совет Министерства энергетики по безопасности оборонных ядерных предприятий (DNFSB) закрыл свои рекомендации⁵⁵. Но все еще состояние здания ухудшается, а расходы подрядчика на управление продолжают расти⁵⁶.

Основная причина того, что приоритет проекта был невысоким, состоит в том, что Министерство энергетики самостоятельно регулировало процесс и рассматривало усилия для переработки и утилизации этого материала как «нефинансируемый мандат», не связанный с установленными программными действиями, включающими соглашения, соответствующими требованиям по охране окружающей среды. Хотя Совет Министерства энергетики по безопасности оборонных ядерных предприятий (DNFSB) и мог выпускать рекомендации, он не обладал регулятивными полномочиями для установления предельных сроков и наложения штрафов или взысканий.

В ноябре 2005 года после некоторых рывков и остановок, Бюро управления окружающей средой приняло на себя контроль за проектом разбавления и захоронения урана-233. Примерно через пять лет генеральный инспектор Министерства энергетики сообщил, что «проект Министерства по захоронению урана-233 столкнулся с несколькими проектными задержками, возможными превышениями первоначальных оценок стоимости, и, вероятно, планируемые сроки завершения этапов не будут выполнены». С тех пор, как Бюро управления окружающей средой приняло на себя руководство проектом, менее, чем за два года в нем сменилось четыре различных менеджера из Министерства энергетики, а оцениваемая полная стоимость проекта увеличилась с 384 до 473 миллионов долларов⁵⁷.

В 2009 году в попытке сократить расходы Министерство энергетики разработало план утилизации урана-233⁵⁸, в котором:

- Материал из Проекта отверждения урана «Консолидейтед Эдисон» (CEUSP) (403 канистры и 73 процента запасов расщепляющихся материалов в здании 3019) будет непосредственно утилизировано закапыванием в грунт на Невадском полигоне национальной безопасности (NNSS)⁵⁹.
- Национальное агентство ядерной безопасности Министерства энергетики примет на себя ответственность

за примерно 245 кг оксида урана-233, содержащегося в топливных пластинах реактора нулевой мощности, оставшихся от эксперимента на реакторе с расплавленными солями, и перенесет их в сильно защищенное здание сборки устройств (DAF) на Невадском полигоне национальной безопасности (NNSS).

- Оставшиеся оксиды урана-233 с оксидами урана-238 будут разбавлены в имеющихся горячих камерах Ок-Риджской национальной лаборатории, или будут разбавлены в водном растворе с последующей совместной переработкой с илом радиоактивных отходов, хранящихся на площадке Ок-Риджской национальной лаборатории.

В январе 2012 года Министерство энергетики объявило, что оно перевезло шесть канистр с топливными пластинами реактора нулевой мощности в здание сборки устройств (DAF) на Невадском полигоне национальной безопасности (NNSS) для использования в экспериментах⁶⁰. Перевозка оставшихся 122 пластин должна завершиться в конце июня 2012 года⁶¹. Цель окончательного удаления и утилизации остатков материала в здании 3019 должна быть достигнута в 2018 году⁶².

Представляется, что Министерство энергетики нацелилось на вариант непосредственной утилизации материала из Проекта отверждения урана «Консолидейтед Эдисон» (CEUSP) захоронением в грунте, несмотря на то, что в нем будут существенно нарушены его собственные требования по безопасности и защите⁶³ и критерии приема отходов (WAC)⁶⁴ Невадского полигона национальной безопасности (NNSS) (смотрите рисунки 2 и 3). Министерство энергетики аргументировало свое решение тем, что материал CEUSP будет размещен на дне узких траншей глубиной 40 футов (12 метров), и покрыт слоем низкоактивных отходов, служащим дополнительным барьером для предотвращения несанкционированного проникновения⁶⁵. Однако, периоды полураспада урана-233 и урана-235 довольно велики (160 000 лет и 713 000 000 лет соответственно). Национальный исследовательский совет заявил в 2001 году, что «предпочитаемые Министерством энергетики решения – надежда на искусственный барьер и ведомственный контроль – по своему существу предрасположены к неудаче»⁶⁶. Еще большей проблемой может стать то, что пригодный для оружия уран-235, которым разбавлен уран-233, останется на наземной площадке утилизации без защиты⁶⁷. В настоящее время Министерство энергетики рассматривает потенциал получения нарушителем материала CEUSP после его утилизации⁶⁸.

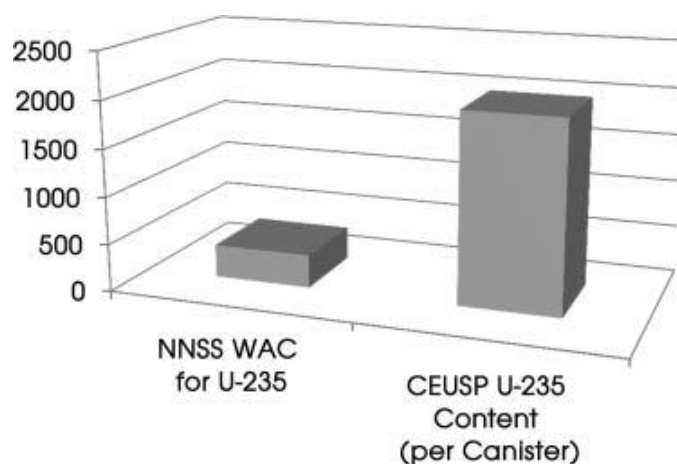


Рисунок 3. Утилизация материала CEUSP нарушает критерии приема отходов Невадского полигона национальной безопасности (NNSS). На вертикальной оси отложен вес урана-235 в граммах. Надписи под рисунком (слева направо): 1 – критерии приема отходов для урана-235; 2 – количество урана-235 в одной канистре с материалом CEUSP.

Содержимое канистр с материалом CEUSP – это материал первой категории, удовлетворяющий критериям для «материала высокого сорта». Для материала высокого сорта Министерство энергетики требует гарантий безопасности для количества урана-233 более 2 кг, и количества урана-235 более 20 кг. Для того, чтобы утилизировать этот материал, Министерство энергетики должно будет предоставить беспрецедентный отказ от требований безопасности.

Запасы урана-233 в 323 кг в Национальной инженерной лаборатории Айдахо были разбавлены в 31 тонне необлученного тория (разбавление до 1 процента), и они перевозились на Невадский полигон национальной безопасности (NNSS), начиная с 2010 года, где они утилизировались как низкоактивные отходы^{69,70}.

Согласно критериям приема отходов Невадского полигона национальной безопасности (NNSS), утилизация урана-235 ограничивается 350 граммами материала в одной упаковке. Одна упаковка материала CEUSP в здании 3019 в среднем содержит 2 000 граммов урана-235 и около 250 граммов урана-233. В критериях приема отходов NNSS уран-233 не упоминается, но критическая масса урана-233 намного меньше, чем у урана-235. Министерство энергетики не говорит о том, как оно будет справляться с этой проблемой. Между тем, в течение последних пятнадцати лет Министерство энергетики потратило приблизительно 84 миллиона долларов на надзор за упаковками с ураном-233 в Ок-Риджской национальной лаборатории⁷¹. Ожидается, что по мере ухудшения состояния здания 3019 эти расходы будут расти. Поскольку материал CEUSP сильно радиоактивен и был получен из отработавшего топлива, вполне возможно, что он будет рассматриваться как высокоактивные отходы (требующие геологического захоронения), как это определено в Законе о политике ядерных отходов 1982 года⁷². За исключением расщепляющегося материала в здании 3019 Ок-Риджской национальной лаборатории, Министерство энергетики придерживается политики окончательного геологического захоронения избыточных пригодных для оружия расщепляющихся материалов, разбавляя высокообогащенный уран, и разрабатывая топливо из смеси оксидов, или непосредственно утилизируя разбавленный плутоний на площадке геологического захоронения Экспериментального проекта изоляции отходов (WIPP) в штате Нью-Мексико. В 1998 году Министерство энергетики утвердило отмену мероприятий по безопасности для содержащих плутоний отходов при захоронении на площадке WIPP. Отмена предоставлялась при условии, что отходы должны быть разбавлены «до менее, чем 10 весовых процентов плутония и помещения разбавленных отходов в наружные трубчатые контейнеры до удаления отходов из защищаемой площадки»⁷³.

Министерство энергетики планирует завершить переброску материала CEUSP для грунтового захоронения в августе 2014 года⁷⁴. Если будет реализовано изменение окончательных мер безопасности для материала CEUSP, то концентрация расщепляющихся материалов в нем более чем в восемь раз превысит ту, которая была допустима для материала из Роки Флэтс. Кроме того, радиационный барьер, создаваемый загрязнением ураном-232, менее чем за 50 лет уменьшится на 50 процентов, что значительно упростит доступ к материалу для использования в оружии.

ВЫВОДЫ

Хранение американских запасов урана-233 представляет серьезный риск по гарантиям, защите и безопасности, и производство этого материала оставило за собой бремя захоронения. Основные опасения таковы: проблемы инвентаризации урана-233 (с возможными неучтенными 123 кг в комплексе Министерства энергетики); неадекватная защита материала оружейного качества; риски для окружающей среды, безопасности и охраны здоровья; обязательства по управлению и утилизации отработавшего ториевого топлива с нескольких коммерческих реакторов; и утилизация урана-233, в том числе и захоронением в грунте. Иначе говоря, для того, чтобы сэкономить несколько баксов, Соединенные Штаты решили убрать охрану, оружие и загрязнение от количества расщепляющегося материала, достаточного для изготовления многих бомб⁷⁵.

Контроль и учет ядерного материала уран-233 – это ключевой элемент обеспечения адекватной защиты и безопасности этого ядерного материала. Министерство энергетики должно обеспечить более точную инвентаризацию. Утилизация больших количеств отходов с высокой концентрацией урана-233 захоронением в грунте существенно нарушит требования Министерства энергетики по защите и безопасности и критерии приема отходов (WAC) Невадского полигона национальной безопасности (NNSS). Для того, чтобы утилизировать этот материал, Министерство энергетики должно будет предоставить беспрецедентное приостановление требований по мерам безопасности, что будет неразумно, потому что оно создаст плохой прецедент для охраны и утилизации других отходов, содержащих значительные количества расщепляющихся материалов. Политика, разрешающая перманентную утилизацию 897,3 кг концентрированного пригодного для создания оружия материала захоронением в неглубоком грунте, поставит Соединенные Штаты в положение, в котором критика безопасности ядерных материалов в других странах станет невозможной.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа была поддержана Проектом по правительственному надзору, Вашингтон, округ Колумбия.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. U.S. Department of Energy, *Highly Enriched Uranium Working Group Report on Environmental, Safety and Health Vulnerabilities Associated with the Department's Storage of Highly Enriched Uranium*, DOE/EH-0525, Washington,

- DC, December 1996, 12.
2. Jungmin Kang and Frank von Hippel, "U-232 and the Proliferation-Resistance of U-233 in Spent Fuel," *Science and Global Security* 9, (2001): 1, 1–32.
 3. U.S. Department of Energy, Operation Teapot, 1955-Nevada Proving Ground, U.S. Nuclear Weapons Archive, <http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Tests/Teapot.html>; Atomic Energy Commission, Minutes of the Forty-first Meeting of the General Advisory Committee to the U.S. Atomic Energy Commission, July 12, 13, 14, and 15, 1954, Albuquerque, NM and Los Alamos, NM. Papers 326 of the U.S. Atomic Energy Commission, Secretariat Collection, Box 4932, Folder D&M, GAC Minutes, Vol. IV, 52 <http://www.hss.energy.gov/healthsafety/ihs/marshall/collection/data/ihp1d/73403e.pdf>.
 4. U.S. Department of Energy, Douglas United Nuclear Inc., W. K. Woods, LRL *Interest in Uranium-233*, DUN-677, Richland, WA, February 10, 1966.
 5. U.S. Department of Energy, *General Electric Hanford Atomic Products Operation*, R. E. Smith, CPD *Activities in the Uranium-233 Program*, HW-79836, Richland, WA, December 6, 1963.
 6. Там же.
 7. U.S. Department of Energy, General Electric Hanford Atomic Products Operation L.W. Lang, *Report of Invention of Production of Clean Uranium-233*, General HW79916, Richland, WA, December 10, 1963.
 8. U.S. Department of Energy, I CF Kaiser, R. L. Moment, F. E. Gibbs, C. J. Freiboth, *History of Uranium-233 Processing at the Rocky Flats Plant*, RS-090-056, Los Alamos, NM, April 1, 1999. <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/769018Q4YgPy/webviewable/>
 9. Chuck Hansen, *Swords of Armageddon*, Vol. 2 (Sunnyvale, CA: Chukelea Publications, 1995) 121–140.
 10. Oak Ridge National Laboratory, Charles W. Forsberg, L. C. Lewis, *Uses for Uranium-233: What Should Be Kept for Future Needs?* ORNL-6952, Oak Ridge, TN, September 24, 1999. «Оценивается, что расходы на первоначальное производство высококачественного урана-233 составляли от 2 до 4 миллионов долларов за килограмм (в долларах 1999 года)». Учитывая, что было произведено около двух тонн, эквивалентные расходы в долларах 2012 года лежали в пределах от 5,5 до 11 миллиардов долларов. Это основано на оцениваемой стоимости очистки в 300 миллиардов долларов 1999 года для производства в Министерстве энергетики 100 тонн плутония.
 11. Oak Ridge National Laboratory, W. Forsberg, E. C. Beahm, L. R. Dole, A. S. Icenhour, S. N. Storch, L. C. Lewis, and E. L. Youngblood, *Disposition Options for Uranium 233*, ORNL/TM-13553, Oak Ridge, TN, June 1, 1999 (Table 2.3); Oak Ridge National Laboratory, G.D. Del Cul et al., *Overview of the Recovery and Processing of 233U from the Oak Ridge Molten Salt Experiment (MSRE) Remediation Activities*, Oak Ridge, TN, Presented at the Global 2001 Conference, September 9–13, 2001, Paris, France. September 2001.
 12. Forsberg, *Uses for Uranium-233*, Table 2.3 (ссылка 10).
 13. Oak Ridge National Laboratory, Charles W. Forsberg and John Trabalka, *Disposal of Uranium-233 in the Waste Isolation Pilot Plant*, Presented at the Waste Management Conference, February 25, Tucson AZ. <http://www.wmsym.org/archives/2001/53/534.pdf>
 14. U.S. Department of Energy, *The United States Plutonium Balance, 1944–2009: an update of Plutonium: the First 50 Years*, DOE/DP-0317, June 2012.
 15. U.S. Department of Energy, Naval Reactors Office, Belle, J., and R. M. Berman, *Thorium Dioxide: Properties and Nuclear Applications*, DOE/NE-0060, DE85 006670, Washington, D.C., 1984.
 16. Oak Ridge National Laboratory, W. T. Hermes, T. D. Hylton, C. H. Mattus, S. N. Storch, P. Singley, J. Terry, *Thorium Nitrate Stockpile—From Here to Eternity*, Waste Management Conference, Tucson, AZ, February 2003. See also U.S. National Institute for Occupational Safety and Health, Division of Compensation Analysis, *Technical Basis Document for the DuPont Deepwater Works*, Rev. 0, DCAS-TKBS-0006, Deepwater N.J., 10.
 17. Oak Ridge National Laboratory, R. E. Brooksbank, W. T. McDuffee, R. H. Rainey, *A Review of Thorium Fuel Reprocessing Experience*, Conf-780223-3, Oak Ridge, TN, January 1978.
 18. U.S. Atomic Energy Commission, *Uranium-233 Production*, Memo October 10, 1968. <http://www5.hanford.gov/ddrs/common/findpage.cfm?AKey=D198117028>
 19. Там же.
 20. Oak Ridge National Laboratory, R. Hall et al., *Development and Operation of the Conversion/Solidification Process for the CEUSP Project*, *Nuclear Technology*, 77 (1987): 2, 210–219, http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?query_id=1&page=0&osti_id=5421892.
 21. Oak Ridge National Laboratory, *Chemical Division Progress Report for the Period April 1, 1983 to March 31, 1985*, ORNL-6153, Oak Ridge, TN, October 1985.
 22. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, K. I. Kingrey, *Fuel Summary for Peach Bottom Unit 1 High-Temperature Gas-Cooled Reactor Cores 1 and 2*, INEEL/EXT-03-00103. Idaho Falls, Idaho, April 2003,

23. Там же.
24. Oak Ridge National Laboratory, D. A. Copinger, D. L. Moses, *Fort St. Vrain Gas Cooled Reactor Operating Experience*, prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission, ORNL/TM-2003/223, NUREG/CR-6839, January 2004.
25. Idaho National Laboratory, Thomas J. Hill, Denzel L. Fillmore, *Managing Spent Nuclear Fuel at the Idaho National Laboratory, NATO Advanced Research Workshop, Safety-Related Issues of Spent Nuclear Fuel Storage*, INL/CON-06-11165, Idaho Falls, September 2005.
26. Oak Ridge National Laboratory, C. W. Forsberg, L. C. Kewis, *Uses for Uranium-233: What Should be Kept for Future Needs?* ORNL-6952, Oak Ridge, TN, September 1999, 19 (ссылка 10).
27. U.S. Department of Energy, *Office of Nuclear Energy, Report to Congress on the Extraction of Medical Isotopes From Uranium-233*, Washington, DC, March 2001.
28. U.S. Department of Energy, *Finding of No Significant Impact: Uranium-233 Material Downblending and Disposition Project at the Oak Ridge National Laboratory*, Oak Ridge Tennessee, January 2010, http://energy.gov/sites/prod/files/nepapub/nepa_documents/RedDont/EA-1651-FONSI-2010.pdf.
29. U.S. Geological Survey, James B. Hedrick, *Thorium*, 2004, prepared for the 2004 Minerals Yearbook, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/thorium/thorimyb04.pdf>
30. U.S. Government Accountability Office, *Nuclear Security: DOE and NRC Have Different Security Requirements for Protecting Weapons-Grade Material from Terrorist Attacks*, GAO-07-1197R, Washington, D.C., September 2007, 1, <http://www.gao.gov/new.items/d071197r.pdf>.
31. Oak Ridge National Laboratory, C. W. Forsberg, C. M. Hopper, J. L. Richter, H. C. Vantine, *Definition of Weapons Usable Uranium-233*, ORNL/TM-13517, Oak Ridge, TN, March 1998, Fig. 3.1, 18.
32. U.S. Department of Energy, *Office of Security Affairs, Office of Safeguards and Security, Manual For Protection and Control of Safeguards and Security Interests*, DOE M 5632.1C-1, Washington, D.C., April 10, 1996, I-1.
33. Там же.
34. Oak Ridge National Laboratory, C. W. Forsberg, E. C. Beahm, L. R. Dole, A. S. Icenhour, S. N. Storch, L. C. Lewis, and E. L. Youngblood, *Disposition Options for Uranium-233*, ORNL/TM-13553, Oak Ridge, TN, June 1, 1999, Table 2.2.
35. U.S. Department of Energy, *Disposition of Uranium-233 (URANIUM-233) in Plutonium Metal and Oxide at the Rocky Flats Environmental Technology Site*, RFP-5332, Washington, D.C., March 2000, Revision 1, 3-4.
36. U.S. Department of Energy, *Office of Inspector General, Audit of Internal Controls Over Special Nuclear Materials*, DOE/IG-0388, Washington, D.C., April 1996.
37. Oak Ridge National Laboratory, C. W. Forsberg, A. S. Icenhour and A. M. Krinchinsky, *Disposition Options for 233U*, ORNL/CP-97933, Oak Ridge, TN, September 1998, Table 1.
38. U.S. Department of Energy, *Environmental Assessment for URANIUM-233 Material Downblending and Disposition Project at the Oak Ridge National Laboratory*, DOE/EA-1651, Washington, D.C., January 2010, 1-3.
39. Oak Ridge National Laboratory, L. K. Yong, A. M. Krinchinsky, D. O. Campbell, S. S. Laighlin, D. C. Van Essen, *Technical Competencies for the Safe Interim Storage and Management of uranium-233 at U.S. Department of Energy Facilities*, ONRL/TM13579/R1, Oak Ridge, TN, March 16, 1999, Table 1.2, 8.
40. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Leroy C. Lewis and Dennis R. Wilkinson, *The INEEL Initial Site Assessment Report the Storage of URANIUM-233*, OPE 98-010, Idaho Falls, March 1998, 2.
41. U.S. Department of Energy, *Plutonium: The First 50 Years: United States Plutonium Production, Acquisition and Utilization from 1944 Through 1994*, DOE/DP-0137, Washington, D.C., 1996.
42. U.S. Department of Energy, *Uranium-233 Disposition Project Update*, Presented to the Oak Ridge Site-Specific Advisory Board by John W. Krueger, Federal Project Director, March 9, 2011 <http://www.oa-kridge.doe.gov/em/ssab/Minutes/FY2011/Presentations/URANIUM-233ProjectUpdate.pdf>.
43. U.S. Department of Energy, *Environmental Assessment for Uranium-233*, 5.
44. U.S. Department of Energy, *Uranium-233 Disposition Project Update* (ссылка 42).
45. Oak Ridge National Laboratory, J. E. Rushton, D. W. Neiswander, J. L. Raines, A. M. Krinchinsky, and L. C. Lewis, *Uranium-233 Storage Alternative Trade Study, Final Report*, ORNL/M-6066, Oak Ridge, TN, September 1998, 17.
46. Oak Ridge National Laboratory, *Chemical Division Progress Report*, 92.
47. Sandia National Laboratories, *International Security News*, "Focus: International Safeguards and Nuclear Material Protection," Vol 2, No. 2, May 2002 <http://www.cmc.sandia.gov/isn/may02isn.pdf>.
48. DOE HEU Vulnerability Assessment (1996)
49. Oak Ridge National Laboratory, R. T. Prim, III, *Fissile Material Storage in the Oak Ridge Radiochemical Development Facility*, Conf-9307-9. Oak Ridge, TN, Paper presented at the American Nuclear Society topical meeting, Charleston, SC, September 1993.

50. U.S. Department of Energy, *Highly Enriched Uranium Working Group Report*.
51. U.S. Department of Energy, *Defense Nuclear Facility Safety Board, Uranium-233 Storage Safety and Department of Energy Facilities*, DNFSB/TECH-13, Washington, D.C., February 1997.
52. U.S. Department of Energy, *Defense Nuclear Facility Safety Board, Recommendation 97-1, Safe Storage of Uranium-233*, Washington, D.C., 1997 <http://www.dnfsb.gov/board-activities/recommendations/safe-storage-uranium-233>.
53. Westinghouse Savannah River Company, M.D. Lowman, *Safety Evaluation of Receipt of ORNL URANIUM-233 at SRS Tank Farm*, WSRC-TC-2000-00031, Aiken, SC, January 2000, <http://sti.srs.gov/fulltext/WSRC-TR-2000-00031.pdf>.
54. U.S. Department of Energy, *Radiation Protection of the Public and the Environment*, DOE Order 5400.5, January 1993, <http://www.doeal.gov/SWEIS/DOEDocuments/001%20DOE%2054005.pdf>.
55. U.S. Department of Energy, Defense Nuclear Facility Safety Board, *Letter to The Honorable Samuel W. Bodman, Secretary of Energy*, from A.J. Eggenberger, Chairman, April 29, 2008.
56. Говорилось, что здание 3019 остается прочным из-за того, что строительство в период второй мировой войны, когда проектировалось и возводилось здание, было излишне консервативным, и это было аргументом при выборе подходящего места хранения запасов урана-233. Когда Министерство энергетики в 1996 году проводило оценку уязвимости своего высокообогащенного урана, сооружение находилось в состоянии серьезного повреждения и ветхости. Автор помогал в надзоре за проведением этой оценки. Хотя защита могла быть толще, чем в современных проектных нормах, это не компенсировало повреждений электропроводки, упаковки материала, крыши, трубопроводов и систем вентиляции, нанесенных десятилетиями недостаточного обслуживания. Здание 3019 было выбрано для площадки хранения не из-за его прочной конструкции, а из-за того, что оно было центром исследований и разработок ториевого цикла, в частности, по программе реакторов-размножителей на тепловых нейтронах.
57. U.S. Department of Energy, *Office of Inspector General, Audit Report, the Disposition of Uranium-233 at Oak Ridge National Laboratory*, DOE/IG-0834, Washington, D.C., February 2010.
58. U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, Oak Ridge Site Specific Advisory Board, Meeting Minutes Approved, April 11, 2012. <http://www.oakridge.doe.gov/em/ssab/Minutes/FY2012/7-April.htm>.
59. U.S. Department of Energy, *Uranium-233 Disposition Program Update*, Presented to the Oak Ridge Site Specific Advisory Board, April 11, 2012. <http://www.oakridge.doe.gov/em/ssab/Minutes/FY2012/Presentations/SSABPresentation4-11-12.pdf>.
60. Frank Munger, "First Shipments of Uranium-233 to Nevada," *Knoxville News*, January 6, 2012. <http://blogs.knoxnews.com/munger/2012/01/first-shipments-ofuranium-233-to-ne.html>.
61. U.S. Department of Energy, *Uranium-233 Disposition Project Update*, 2012 (ссылка 42).
62. Там же.
63. U.S. Department of Energy, DOE Order 5633.B, *Control and Accountability of Nuclear Materials*, September 1994. <https://www.directives.doe.gov/directives/archivedirectives/5633.3-BOrder-b/view>
64. U.S. Department of Energy, National Nuclear Security Administration, *Nevada National Security Site Waste Acceptance Criteria*, DOE/NV-325-Rev. 8.01, Washington, D.C., January 2011 <http://www.nv.energy.gov/library/publications/Environmental/DOENV325.pdf>.
65. Mathew Wald, "Uranium Substitute Is No Longer Needed, but Its Disposal May Pose Security Risk," *New York Times*, September 23, 2012.
66. Committee on the Remediation of Buried and Tank Wastes, National Research Council, Board on Radioactive Waste Management, *Long-Term Institutional Management of U.S. Department of Energy Legacy Waste Sites* (Washington, D.C: National Academies Press, 2000) 4.
67. Я признателен рецензенту за такую перспективу.
68. Scott Wade, Assistant Director, Nevada National Security Site, June 18, 2012, personal communication.
69. Idaho National Laboratory, Ivan R. Thomas, Ernest L. Laible, *Termination of Safeguards on ULWBR Material*, IN/CON-08-13279, Idaho Falls, July 2008.
70. U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, *Nevada Test Site, Nevada Site Specific Advisory Board, Full Board Meeting, February 15, 2012* <http://www.nv.energy.gov/nssab/documents/minutes/fy%202012/FB/02-1512%20FB%20Mtq%20MinutesFINAL.pdf>.
71. U.S. Department of Energy, *Uranium-233 Disposition Project Update* (ссылка 42).
72. *Nuclear Waste Policy Amendments Act of 1987*, P.L. 100-203, title V, subtitle A, Sec. 5001-5065, Dec. 22, 1987, 101 Stat. 1330-227 to 1330-255. Закон о политике ядерных отходов определяет высокоактивные отходы как: А) Высокоактивные отходы, образующиеся при переработке отработавшего ядерного топлива, вклю-

чая жидкие отходы, непосредственно образующиеся при переработке, и любой твердый материал, произведенный из таких жидких отходов, который содержит продукты деления в значительных концентрациях; и В) Другой высокоактивный материал, который Комиссия, в соответствии с действующим законодательством, определяет по установленным правилам, требующим перманентной изоляции.

73. U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, Memorandum for David G. Huizenga, Deputy Assistant Secretary, Nuclear Material and Facility Stabilization, from Edward J. McCallum, Director, Office of Safeguards and Security, subject: Residue Shipping Plan and Safeguards Termination Limit Variance" (RFPKDOE-5633.B-VR-062), May 15, 1998. <http://rockyflats.apps.em.doe.gov/references/085VR%20for%20STLs-CTRL98-01497-1.pdf>
74. U.S. Department of Energy, *Uranium-233 Disposition Project Update 2012* (ссылка 42).
75. Я признателен анонимному рецензенту за столь лаконичное представление ситуации.