

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРЕОТВРАЩЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Дж.П. Гилфойл и Дж.А. Парментола

Попыткам прекратить распространение ядерного оружия угрожает уязвимость материалов, которые могут использоваться в ядерном оружии, по отношению к контрабанде, что особенно справедливо для России. Добавление урана-232 к высокообогащенному урану (ВОУ) приводит к тому, что становится легко детектировать ВОУ и труднее украсть его. Добавление урана-233 в количествах, характерных для каждого хранилища, позволяет провести идентификацию похищенного и затем найденного ВОУ. Добавление плутония-244 к обычному плутонию позволяет сделать то же самое для этого материала. Американские программы по распоряжению избыточными радиоактивными веществами могли бы обеспечить источники для подобных меток. Текущие усилия США и России по распоряжению избыточными ядерными вооружениями открывают возможности установить метки в большом количестве материалов оружейного качества. Метка, при которой детектируется уран-232, обогащает текущие усилия США и России по обнаружению контрабанды материалов оружейного качества из России.

Авторы работают в Агентстве по сокращению угрозы для обороны (Даллес, Вирджиния). Кроме того д-р Гилфойл – член Американской ассоциации научного прогресса (Вашингтон, округ Колумбия) и сотрудник физического факультета Ричмондского университета (Ричмонд, Вирджиния).

Статья получена журналом 4 января 2001 г.

Хотя завершение холодной войны значительно уменьшило угрозу полномасштабной ядерной войны между Соединенными Штатами и Российской Федерацией, оно породило новый набор опасений для национальной безопасности. Политическое и экономическое непостоянство в России привели к растущим тревогам относительно недостаточной безопасности ядерных материалов в России и увеличило перечень таких материалов, попавших в руки стран-изгоев, террористов и прочих враждебно настроенных лиц^{1,2,3}. В данной статье будет рассмотрен способ значительного снижения подобной угрозы путем облегчения обнаружения контрабанды делящихся материалов на основе создания ядерных "отпечатков пальцев", чтобы помочь органам правопорядка отождествлять источники утечки. Будет рассмотрено также уникальное сочетание возможностей, делающее осуществимым подобные ядерные метки в настоящее время.

Мы предлагаем равномерно смешать с делящимися материалами конкретные вещества, которые будут действовать как реальные метки. Метки действуют двояко. Прежде всего, они делают заметными характерные радиоактивные особенности высокообогащенного урана (ВОУ), что облегчает его обнаружение. ВОУ испускает гораздо меньше излучения, чем плутоний, и его обычно гораздо сложнее обнаруживать. Метка для ВОУ – это источник проникающего гамма-излучения высокой энергии, для обнаружения которого подходят пассивные мониторы, расположенные на ядерных предприятиях, на пограничных станциях и в других местах, где возможен контроль. Нет необходимости усиливать характерные особенности плутония, поскольку он и так хорошо "светит" и его легко можно обнаружить при помощи детекторов упомянутых выше типов. Во-вторых, метки дают возможность провести отождеств-

¹ P. Doty, *Nature*, (1999):402, 583.

² National Research Council, *Protecting Nuclear Weapon Materials in Russia* (Washington, DC: National Academy Press, 1999).

³ M. Bunn, *The Next Wave: Urgently Needed New Steps To Control Warheads and Fissile Material* (Cambridge, MA: Carnegie Endowment for International Peace and the Harvard Project on Managing the Atom, 2000).

ление похищенного плутония или ВОУ. К делящемуся материалу при химической обработке добавляется метка в количестве, характерном для данного хранилища, - таким образом помеченный материал отождествляется с площадкой, то есть метки с разными концентрациями являются характеризуют разные площадки. Если материал похищен, а затем обнаружен, анализ концентраций при помощи непосредственно доступной методики позволит отождествить источник и дает возможность органам правопорядка прекратить утечки материала из этого источника.

Предлагается добавить к ВОУ небольшое количество (около одной миллиардной – 1 ppb) урана-232, чтобы ВОУ можно было легче обнаружить. Образец с ураном-232 испускает проникающие гамма-лучи высокой энергии (2.6 МэВ), которые фактически излучаются дочерним ядром таллий-208 с периодом полураспада 3 миллиона лет, образующимся в цепочке радиоактивных распадов, которая оканчивается стабильным ядром (в данном случае это свинец-208). Эти характерные гамма-лучи можно детектировать радиационными мониторами на российских ядерных площадках и в местах проверки (пересечение границы, аэропорты и т.п.). Доля урана-232 (1 ppb) вполне достаточна для обнаружения теми радиационными детекторами, которые установлены для контроля на проходных в России по программе второй линии защиты Министерства энергетики США (МЭ). Подобные мониторы срабатывают при превышении скорости отсчетов (с вычетом фона) примерно на 180 имп/с (при наиболее консервативных предположениях о фоне⁴). Как только наблюдается такое превышение, включается сигнал тревоги и материал конфискуется. Большинство образцов ВОУ содержит некоторое количество урана-232, но оно недостаточно для стандартного обнаружения такими детекторами (см. ссылку⁵ и Приложение). Метка с ураном-232 радиоактивна, но весь материал все еще будет безопасным для обращения. При 1 ppb урана-232 в сфере из U-235 весом 8 кг максимум излучения на расстоянии 30 см составит около 0.5 бэр/час, что ниже верхнего предела в 200 бэр/час для работы сотрудников с таким материалом. Количество 8 кг было выбрано по той причине, что оно предложено для хранения ВОУ на установке предприятия "Маяк" в Сибири, которое входит в программу Министерства обороны США по совместному уменьшению угрозы. Выбранное количество урана-232 (1 ppb) лежит также в рамках, установленных американским обществом по испытаниям и материалам для коммерческого урана (0.002 мкг/г или 2 ppb). Для более детальной информации смотрите ссылку⁶ и Приложение.

Параллельно с меткой из урана-232 мы предлагаем добавить к ВОУ около 20-100 ppm урана-233 в качестве идентифицирующей метки (ИМ). Наличие этого материала позволит наблюдателям определить источник утечки после того, как похищенный материал будет возвращен. К ВОУ будет добавляться и тщательно перемешиваться фиксированное количество урана-233. Точное содержание связано с конкретными хранилищами или районами и оно останется неизменным на длительный срок, поскольку период полураспада урана-233 велик (159 000 лет). Доля урана-233 в найденном ВОУ может быть измерена на основе стандартных методов масс-спектропии и это позволяет обнаружить, откуда был похищен материал. Доля урана-233 в ИМ значительно превышает чувствительность на уровне 20 ppb, которая типична для имеющихся в продаже магнитных спектрометров. Отметим также, что подобные количества выше, чем стандартные уровни содержания урана-233 в ВОУ^{6,7}.

Наконец, предлагается добавлять плутоний-244 к плутонию на уровне 200 ppb в качестве ИМ. Доля плутония-244 в десять раз выше чувствительности масс-спектрометров (20 ppb), так что ее нетрудно определить. Этот изотоп плутония мало распространен, он получается в результате последовательных захватов нейтронов все более тяжелыми изотопами плутония, начиная с плутония-239. Соединенные Штаты обладают запасом такого материала (около 20 г), накопленного на площадке Саванна Ривер в течение десятилетнего облучения. Этот изотоп трудно получать (и он дорог) и поэтому в плутонии оружейного качества

⁴ R. York, Los Alamos National Laboratory, частное сообщение.

⁵ J. Lemlet, W. Kane, P. Vanier, L. Forman, "High-Resolution Gamma-Ray Measurements of Sapphire Material", *Nucl.Mater.Manage.*, 29 Proc. Issue-CD-ROM (2000).

⁶ C.W. Forsberg and L.C. Lewis, "Uses of Uranium-233: What Should Be Kept for Future Needs?", *Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-6952*, (1999).

⁷ A.J. Peurrund, "Predicting Uranium-232 Content in Uranium", *Pacific Northwest National Laboratory Report PNNL-12075*, (1998).

практически отсутствует соответствующий фон, который мог бы смутить наблюдателей. Если противник смог бы произвести такой изотоп или имел бы запас его, у него было бы мало стимулов для хищения материала оружейного качества. Ядро плутония-244 играет такую же роль, как ядро урана-233 в случае с ураном: доля плутония-244 укажет конкретное расположение места хранения. Как упоминалось выше, радиоактивные характеристики плутония сами по себе достаточно заметны и не требуют специальной метки для детектирования (ДМ).

Подобные метки эффективны только в том случае, если нельзя легко разрушить соответствующие планы даже технически опытному сотруднику, имеющему доступ к материалу оружейного качества. Такой "внутренний агент" рассматривается в качестве наиболее вероятного кандидата на похищение материала оружейного качества из хранилища⁸. Рассмотрим сейчас несколько возможных методов, которые может попытаться применить потенциальный контрабандист. В каждом случае наличие меток значительно затрудняет кражу. Контрабандист мог бы поместить ВОУ в экран и тем самым уменьшить интенсивность гамма-лучей от ДМ, которые должны были бы зафиксироваться любым радиационным детектором на участке контроля. Для этого потребуется свинцовый экран толщиной около 5 см. При 8 кг ВОУ (это предпочтительный размер для хранения) ящик для экранирования гамма-излучения от ДМ будет весить около 40 кг – он окажется слишком громоздким для переноса и легко будет замечен на рентгеновском мониторе того типа, который уже применяется при пересечении российской границы. Таким образом контрабандист сможет только попытаться скрыть ДМ за счет того, что ВОУ (в контейнере) окажется легче обнаружить рентгеном.

Другая стратегия подавления эффекта ДМ состоит в том, чтобы разрезать ВОУ на много кусков, каждый из которых будет обладать меньшими радиоактивными особенностями. Но наличие метки делает такой путь более сложным, поскольку контрабандисту придется скрытно обрабатывать (резать) ВОУ, экранировать его (но все же меньшим количеством свинца) и повторять этот процесс несколько раз, чтобы пронести то же самое количество материала через любую проходную с мониторами. Технически подкованный контрабандист мог бы попытаться удалить метку из урана-233, внесенную в ВОУ. Мы намеренно выбрали материалы для меток с использованием тех же химических элементов, которые характерны для меченого материала (ВОУ или плутоний). Различные изотопы одного и того же элемента практически почти идентичны при большинстве химических процессов. Значит, потребуется очень дорогое оборудование (например, газовые центрифуги) для разделения изотопов одного и того же элемента. Эти методики лежат за пределами возможностей для большинства контрабандистов. Такая особенность является общим свойством всех предлагаемых нами меток – ни одну из них нельзя легко удалить при помощи методов, доступных контрабандистам.

Контрабандист мог бы попытаться удалить дочерние ядра урана-232, испускающие гамма-лучи высокой энергии. Эти гамма-лучи фактически испускаются одним из членов цепочки распада урана-232 – таллием-208, а не самим ураном-232. Таллий – это отличный от урана элемент, так что технически подкованный контрабандист имеет возможность удалить таллий химическим путем и тем самым преодолеть эффект от метки. Но он должен действовать быстро после удаления таллия, чтобы успеть пронести материал мимо мониторов на проходной и передать его покупателю. Поспешность необходима в связи с тем, что продолжающийся распад урана-232 (который все еще находится в материале) будет производить все больше и больше ядер таллия-208, испускающих гамма-лучи, а это приведет к новому появлению радиоактивной особенности. Мы выбрали количество добавляемого урана-232 так, чтобы детектируемая метка снова стала заметной примерно через месяц.

Наконец, рассмотрим попытку замаскировать ИМ (уран-233 для ВОУ или плутоний-244 для плутония) путем добавления большего количества данного материала. Каждая ИМ содержит уникальный материал, который имеется лишь в небольших количествах (и не существует в природе). Это значит, что подобная попытка затруднена, поскольку контрабандист просто не сможет достать уран-233 или плутоний-244, чтобы добавить их к похищенному ядерному материалу. Уникальность материала для ИМ означает, что загрязнение естественного фона таким материалом будет слишком малым, чтобы запутать наблюдателей – это

⁸ S.A. Erickson, W.D. Smith, and L. Cantuti, "Understanding the Nuclear Smuggler", *Nucl. Mater. Manage.*, 28 Proc. Issue-CD-ROM (1999).

еще одно из преимуществ.

Ни одна из меток не увеличивает значительно радиационную опасность от ВОУ или плутония или не мешает будущему применению возможного топлива.

ДМ из урана-232 для ВОУ добавляется в малых количествах – в два раза меньше максимальной доли 2 ppb, разрешаемой в промышленности. Точно так же, количество урана-233 в ИМ остается малым, чтобы избежать радиационную опасность от альфа-излучателей. ИМ из плутония-244 достаточно стабильна и не испускает много излучения. Все материалы для меток добавляются в очень малых количествах, так что они не нарушают качество материалов, если эти материалы в дальнейшем вводятся в реакторное топливо (это потенциальное применение таких материалов на будущее).

Американо-российская программа по повышению безопасности материалов оружейного качества при помощи подобных меток могла бы использовать своевременное сочетание ряда возможностей, которые позволят пометить значительное количество материала. Для создания программы необходимо осуществить три этапа: (1) изготовить метки, (2) ввести их в материал оружейного качества и (3) создать сеть мониторов для обнаружения похищенных материалов оружейного качества. В каждом случае существуют или планируются программы в США и России, которые легко можно расширить для включения в них меток за небольшие расходы.

Первый этап состоит в изготовлении меток путем перевода существующего материала в форму, удобную для перемешивания. Адекватные количества метящих материалов (уран-232, уран-233 и плутоний-244) уже имеются в американских арсеналах и ожидают долгосрочного распоряжения⁹. Партии изотопов урана в трех национальных лабораториях США содержат смеси урана-232 и урана-233, которые можно использовать для пометки ВОУ⁶. Адекватный запас плутония-244 имеется в США на площадке Саванна Ривер¹⁰. В табл.1 приведены количества материалов в арсеналах США и потребности для осуществления меток. В первом столбце указаны изотопы для меток, а во втором – их запасы в США (в кг). В самом последнем столбце приведено количество материала (в кг), необходимое для того, чтобы пометить все российские избыточные материалы оружейного качества. Эти значения получены умножением доли материала метки (третий столбец) на количество российского избыточного материала оружейного качества (в тоннах; четвертый столбец).

Табл. 1: Запасы и потребности для ядерных меток

Ядро	Запасы меток	Доля метки	Материал	Потребности
²³² U	0.3 ^a	1 ppb	500(ВОУ)	0.0005
²³³ U	351 ^a	20–100 ppm	500(ВОУ)	10–50
²⁴⁴ Pu	0.02 ^b	200 ppb	34 (Pu)	0.007

a – Окриджская национальная лаборатория⁶
b – Площадка Саванна-Ривер¹⁰

Имеющийся материал, содержащий материал-метку, следует перемешать с каким-нибудь другим, чтобы получить небольшие гранулы размером около 3 мм. Например, ДМ и ИМ для ВОУ можно смешать с низкообогащенным ураном (НОУ). Затем такие гранулы добавляются к материалу оружейного качества в процессе обработки и перемешиваются для достижения равномерного распределения метки. Ниже обсуждаются вопросы использования существующих программ для этого этапа обработки.

Затраты на обработку для создания меток составляют лишь часть средств, необходимых для конечного распоряжения (или хранения) избыточным оружейным материалом. В рамках программы директората по распоряжению материалами МЭ начата обработка и упаковка урана (на программу выделено 100 млн. долларов). Долгосрочное хранение или распоряжение будут стоить еще больше. Мы грубо оценили, что дополнительные расходы в объеме 20-25 млн. долларов покроют производство ДМ и ИМ для ВОУ¹⁰.

Что касается плутония, то МЭ рассматривает планы долгосрочного распоряжения

⁹ E. Moniz, "Nuclear Materials Stewardship", talk presented to the Seventh Annual International Nuclear Materials Policy Forum, Alexandria, VA, 2000.

¹⁰ F. Graham, Actinide Chemistry Group, Savannah River Site, частное сообщение.

плутонием-244, который сейчас хранится на площадке Саванна Ривер. Мы приблизительно оценили, что потребуются дополнительные 15-20 млн. долларов для преобразования плутония-244 в ИМ¹⁰. И для ВОУ, и для плутония значительная доля этих средств будет потрачена при любых обстоятельствах на обработку материалов для долгосрочного распоряжения или хранения. Следует также отметить возможность того, что и у России имеются запасы таких материалов. Использование российских арсеналов или предприятий могло бы стать стимулом, чтобы побудить их поддержать предлагаемую инициативу с метками.

Второй этап разработки программы мечения материалов оружейного качества состоит в смешивании меток с ВОУ и плутонием. Существующие американско-российские программы делают этот этап осуществимым для части избыточного российского материала¹¹. Соединенные Штаты обещали потратить к 2013 г. 20 миллиардов долларов для закупки 500 тонн российского ВОУ в рамках соглашения о закупках ВОУ¹². Это количество составляет около 40% всего российского арсенала². ВОУ сначала преобразуется в оксид, а затем перерабатывается дальше, чтобы получить НОУ для реакторного топлива¹². В идеальном случае оксид урана быстро перерабатывался бы в реакторное топливо, но накопленный опыт показал, что ВОУ в виде оксида иногда хранится в течение заметного срока (от недель до нескольких месяцев), что увеличивает его уязвимость. Для мечения ВОУ во время этапа обработки оксида надо смешивать до однородности небольшие гранулы, содержащие ДМ и ИМ. Поскольку метки представляют собой тот же самый химический элемент, что и ВОУ, подобный шаг мало добавляет к стоимости и сложности обработки ВОУ. В другом случае у России и США имеется совместная программа стоимостью около 1.3 миллиарда долларов по демонтажу российского ядерного оружия и хранения его в несекретной форме на предприятии "Маяк" в Сибири.

Как ожидается, эта программа будет утверждена к использованию до августа 2002 г.

Методика демонтажа оружия обсуждается на переговорах, причем рассматриваются два варианта: плавка и разлив плутония или ВОУ в несекретные формы или перевод материала оружейного качества в оксид. В любом случае при обработке будет добавлен этап однородного смешивания метки с ураном или плутонием. Этот дополнительный этап мало что добавит к сложности предполагаемой обработки и к затратам на нее.

Данное предложение по мечению усилит также другие виды американско-российской деятельности по ядерной безопасности. Существуют программы с полным финансированием свыше 265 миллионов долларов (на 2000 ф.г.) с определенной целью – повышением физической безопасности материалов оружейного качества в России (например, программа МЭ "Вторая линия защиты")¹¹. В качестве части подобных усилий, устанавливаются радиационные детекторы на российских площадках для хранения, в местах пересечения границы и в аэропортах, У этих программ были некоторые успехи в обнаружении контрабанды радиоактивных материалов, но они все еще сталкиваются с тяжелой проблемой обнаружения ВОУ, так как его радиоактивные особенности выражены слабо¹³. Представленный нами метод мечения направлен на решение этой проблемы с другой стороны и он уменьшает трудности, делая помеченный ВОУ заметным для существующих систем контроля. Он предоставляет возможность, которая в другом случае окажется очень дорогой.

Следует отметить другие приложения меток. Следовало бы пометить ВОУ, не охваченный соглашением по продаже ВОУ. Ведь 500 тонн ВОУ, которые будут закуплены США в рамках этого соглашения, представляют собой менее половины материала из российского арсенала. Дальнейшее распоряжение остающимся материалом еще не определено и часть этого дополнительного ВОУ уязвима к краже^{2,3}. Этот материал можно было бы пометить в ходе срочной переработки в оксид и поместить на надежное хранение. Если позволяют время, финансирование и установки, его можно затем довести до степени НОУ, который не представляет опасности для распространения и в дальнейшем сгорит в виде топлива. Аналогично, следовало бы пометить избыточный плутоний, который формально не был заявлен

¹¹ O. Bukharin and K. Luongo, "US-Russian Warhead Dismantlement Transparency: The Status, Problems, and Proposals", *Princeton University Center for Energy and Environmental Studies Report* 314 (1999).

¹² A.J. Bieniawski and Y.N. Busurin, "Transparency Measures Associated with the US/Russian Intergovernmental HEU-to LEU Agreement", *Nucl. Mater. Manage.*, 28 Proc Issue-CD-ROM (1999).

¹³ T. Weiner, "Uzbeks Are Said to Seize Radioactive Cargo", *New York Times*, April 5, 2000.

в таком качестве. Те 34 тонны, которые формально были заявлены как избыточные для хранения на "Маяке", составляют всего около четверти российского арсенала¹⁴. Остающийся материал следовало бы обработать таким же образом, как нынешний декларированный избыток, пометить и поместить на долгосрочное хранение в новом предприятии на "Маяке".

Другим расширением концепции мечения служит ее приложение в гражданской плутониевой промышленности. Переработка отработанного реакторного топлива для выделения плутония представляет угрозу для безопасности США и остального мира, поскольку даже плутоний реакторного качества может использоваться для создания ядерного оружия. Англия, Франция и Россия тратят миллиарды долларов ежегодно для обработки тонн плутония. Мировой запас выделенного гражданского плутония составляет около 170 тонн - он по размеру конкурирует с военным плутонием^{2,15}. Если добавлять ИМ из плутония-244 к гражданскому плутонию в процессе переработки отработанного топлива, достигается та же самая цель, дающая наблюдателям возможность отождествить источник утечки плутония после того, как украденный материал будет возвращен. Важным замечанием к этой идее служит тот факт, что мечение 34 тонн избыточного российского военного плутония использует значительную часть американского арсенала ИМ из плутония-244. Чтобы можно было иметь дело с остающимися российскими источниками, у них должен быть запас плутония-244. Другая возможность – использование существующего реактора с большим потоком нейтронов для производства дополнительных количеств ИМ из плутония-244 за необходимое время.

Подведем итоги. Мы предлагаем придать характерные метки материалам оружейного качества, Добавление урана-232 в качестве ДМ в ВОУ сильно усложняет похищение этого материала. Добавление урана-233 к ВОУ и плутония-244 к плутонию создает ИМ, или "ядерный отпечаток", который можно использовать, чтобы помочь наблюдателям отождествить исходную площадку для хранения материала, если он был украден, а затем найден. Метки защищены от мер противодействия и безопасны как при обращении, так и для любых применений в будущем. Момент для этого предложения благоприятен. США имеют сейчас адекватные запасы материалов для меток и рассматривают долгосрочное распоряжение ими. США и Россия начали обработку больших количеств ВОУ и плутония в рамках других программ по нераспространению. Эти программы создали возможность добавления меток в материалы оружейного качества за небольшую цену. Наконец, США поддерживают создание системы радиационного контроля в России, чтобы препятствовать контрабанде материалов оружейного качества. Наше предложение обогащает существующую программу.

Остается провести много работы. Мы предлагаем провести совместное предварительное исследование для проверки изложенных здесь идей, возможно, на основе межлабораторной программы МЭ, чтобы получить ответы на любые вопросы по технике и безопасности и заручиться начальным российским участием. Если метод будет одобрен, США должны рассмотреть пути осуществления программы. США и Россия должны определить, будет ли лучше проводить такую программу как двустороннюю или же следует предусмотреть участие других организаций (достойно внимания участие МАГАТЭ).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Скорость счета от ДМ из урана-233 для ВОУ

Чтобы рассчитать количество материала, необходимое для прояснения радиоактивных особенностей ВОУ, следует рассмотреть два предельных случая.

1. При низком уровне излучения существует минимальная доля ДМ из урана-232, при которой можно обнаружить гамма-излучение на уровне выше фона при помощи мониторов на проходных.
2. При высоком уровне излучения нам придется избежать превращения помеченного ВОУ в объект радиационной опасности.

¹⁴ United States – Russian Federation Plutonium Disposition Agreement-Fact Sheet, The White House, 04 June 2000.

¹⁵ F.N. von Hippel, *Nature*, (1998):394, 415.

Прежде всего, рассмотрим нижний предел для доли урана-232. Начнем с того, какая скорость счета нужна для включения сигнала тревоги монитором на проходной, а затем определим, сколько урана-232 надо перемешать с ВОУ, чтобы достичь такой порог. Рассмотрим минимальную радиоактивность помеченного ВОУ, которую заметят радиационные детекторы, применяемые на российских ядерных площадках и на проходных. Мониторы программы МЭ по второй линии защиты (ВЛЗ) требуют скорости счета около 180 имп/с для включения сигнала тревоги⁴. Назовем эту минимальную скорость счета R_{min} . Нам надо подсчитать, при какой скорости выхода гамма-лучей из материала будут создаваться 180 имп/с в детекторах ВЛЗ. Пусть $e_1 = 0.3$ - эффективность ВЛЗ-детектора для регистрации гамма-лучей, а $e_2 = 0.1$ - телесный угол, охваченный ВЛЗ-детекторами⁴. Тогда минимальная скорость испускания гамма-лучей из ВОУ T_{min} , требуемая для включения сигнала тревоги, равна

$$T_{min} = \frac{R_{min}}{e_1 e_2} = 6300 \text{ c}^{-1}$$

Затем нам надо ввести в ВОУ столько ДМ из урана-232, чтобы ВОУ испускал по всем направлениям 6300 гамма-квантов в секунду. Основным источником излучения из урана-232 является не само урановое ядро, а один из дочерних продуктов - ядро таллия-208, испускающее сильно проникающие гамма-лучи с энергией 2.6 МэВ. Период полураспада таллия-208 составляет три миллиона лет. Схема распада урана-232 приведена ниже на рис.1.

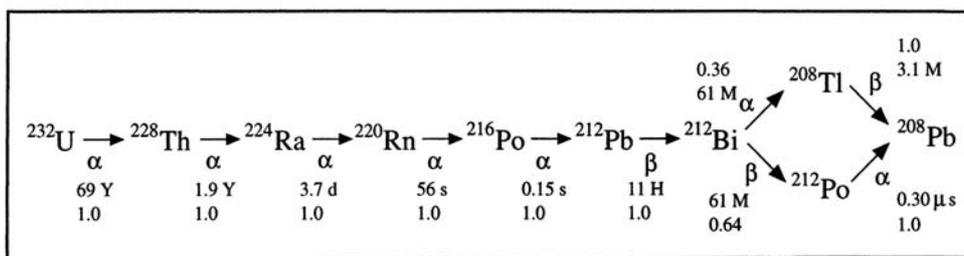


Рис.1: Основные пути распада урана-232. Обозначения в каждой колонке сверху вниз соответствуют типу распада, периоду полураспада и коэффициенту ветвления. Бета-распад таллия-208 в свинец-208 сопровождается испусканием гамма-лучей с энергией 2.6 МэВ с возбужденного на основной уровень.

Теперь надо определить равновесную долю урана-232, требуемую для получения нужной скорости счета гамма-лучей (испускаемых таллием-208) от ВОУ в виде сферы массой 8 кг (предпочитаемый размер для хранения). Удельная активность таллия-208 равна $S_{Tl} = 2.97 \cdot 10^{11}$ квант/с·г¹⁶. Большая часть гамма-квантов, испускаемых ядрами таллия-208 в действительности будет блокироваться металлическим ВОУ (самопоглощение). Только часть их, равная примерно $e_3 = 0.15$, выйдет за пределы урановой сферы. Таким образом, масса изотопа уран-232 m_{232} в сфере ВОУ массой 8 кг, приводящая к минимально необходимой скорости счета в мониторах ВЛЗ, составит

$$m_{232} = \frac{T_{min}}{S_{Tl} e_3} = 1.3 \cdot 10^{-7} \text{ г}.$$

Поэтому доля f_{232} урана-232 в сфере из ВОУ массой 8 кг составит $1.5 \cdot 10^{-11}$. Это минимальная доля урана-232, требуемая для запуска сигнала тревоги монитором ВЛЗ на проходной.

Распад ядер в материале является динамическим процессом. Доли разных образцов изменяются со временем по мере того, как некоторые изотопы образуются в результате распада более тяжелых членов цепочки, а другие исчезают в результате собственного распада.

¹⁶ R. Sigg, Savannah River Site, частное сообщение.

Рассмотрим теперь временную зависимость излучения образца, состоящего из урана-233 и урана-232⁶. На рис.2 приведена интенсивность гамма-облучения от смеси урана-232 и урана-233 в зависимости от времени. Видно, что доза достигает максимума 11 рад/ч на расстоянии 30 см от образца весом 1 кг примерно через 10 лет. Мы потребуем нарастание содержания таллия-208 до уровня, который может быть обнаружен мониторами ВЛЗ на проходных, примерно через месяц (на графике это 0.1 года). Доза через 0.1 года примерно в 40 раз меньше максимального значения, которое достигается через 10 лет. При проведенной выше оценке величины f_{232} мы использовали максимальную удельную активность. Чтобы ВЛЗ-детекторы заметили помеченный ВОУ через 0.1 года, содержание таллия в ВОУ должно быть в 40 раз больше той величины f_{232} , которую мы подсчитали ранее и которая соответствовала выдержке таллия-208 в течение 10 лет. Иными словами, нам придется в 40 раз увеличить долю урана-232 в сферах ВОУ весом по 8 кг, так что новое значение этой доли составит $6 \cdot 10^{-10}$. Оно все еще мало и является основой для расчета потребностей в материале для мечения, приведенных в табл.1, где мы округлили это значение до 10^{-9} , или 1 ppb. Обратите внимание, что при добавление ДМ из урана-232 с такой долей гамма-сигнал будет сохраняться на уровне выше порога детектирования в течение почти миллиона лет, как следует из рис.2.

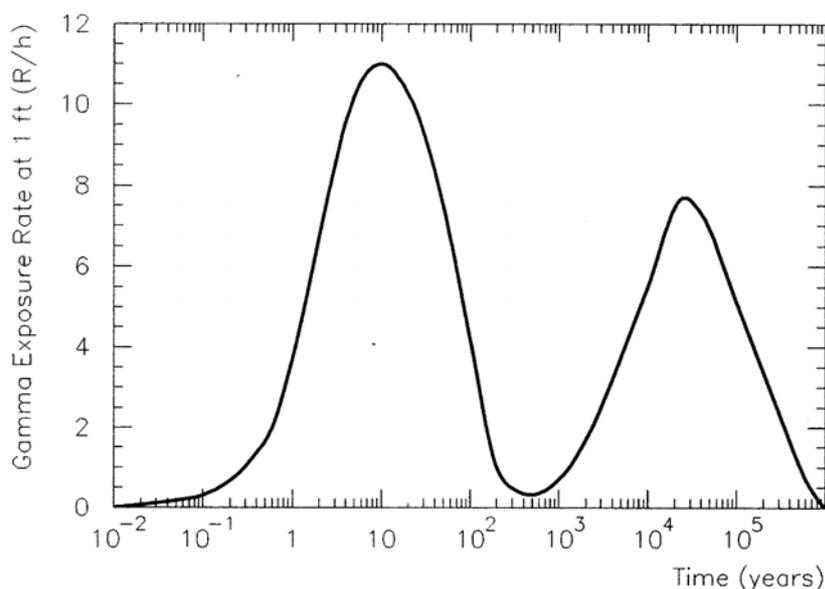


Рис. 2: Доза гамма-облучения от 1 кг урана-233 с 100 ppm урана-232 на расстоянии 30 см. В начальный момент смесь содержит только изотопы урана, а остальные элементы появляются позднее по мере развития процессов распада. Оба пика в основном определяются испусканием гамма-лучей с энергией 2.6 МэВ от таллия-208. Временная зависимость оказывается непростой, что связано со сложностью распадной цепочки. По оси абсцисс отложено время в годах (шкала логарифмическая), а по оси ординат – доза на расстоянии 30 см в единицах рад/ч (шкала линейная).

Следующее требование к ДМ из урана-232 заключается в том, чтобы она не создавала радиационную опасность после введения в материал оружейного качества. Рассмотрим верхний предел на количество урана-232, которое может быть добавлено. Такой верхний предел для активности меченого ВОУ составляет 200 мбэр/час. При более высоких дозах потребуются роботы для обращения с материалом, так что мы не должны превосходить этот порог⁴. Ранее мы нашли нижний предел для содержания урана-232, когда его еще могут обнаружить ВЛЗ-мониторы на проходных. Покажем теперь, что этот нижний предел лежит также ниже верхнего предела, определяемого из соображений безопасности (уровень 200 мбэр/ч). Как указано в работе⁶, максимальный уровень дозы составляет 11 рад/ч на расстоянии 1 м от образца урана-233 весом 1 кг при 100 ppm урана-232 (то есть, доля урана-232 составляла 10^{-4}). Теперь можно подсчитать дозу для ВОУ-сферы массой 8 кг при доле урана-232, равной $6 \cdot 10^{-10}$. Эта величина составляет около 0.5 мбэр/ч, что примерно в 400 раз меньше предела радиационной безопасности, обсуждавшегося ранее. Отметим также, что

доля урана-232, равная 1 ppb, лежит в пределах, установленных коммерческими техническими требованиями на уран-232 (0.002 мкг/г).

Если подвести итог, то можно добавить достаточно урана-232 к ВОУ так, чтобы его можно было легко детектировать мониторами на проходных. Количество ядер таллия-208, испускающих проникающие гамма-лучи с энергией 2.6 МэВ, нарастает до обнаруживаемого уровня примерно в течение месяца в том случае, если в начальном образце содержатся только изотопы урана. Радиационная опасность, вызываемая материалом для мечения, примерно в 400 раз ниже уровня, который считается приемлемым для людей, и не выходит за пределы коммерческих технических требований.

Благодарности

Мы хотели бы поблагодарить за полезные беседы д-ра Фрэнка Грэхема и других членов группы химии актинидов на площадке Саванна Ривер, а также д-ра Чарльза Форсберга из Окриджской национальной лаборатории.