

**Изменение рисков радиации:
анализ системы обращения с радиоактивными отходами в комплексе по
производству ядерного оружия «Ферналд»
Энни Макхиджани и Арджун Макхиджани¹**

С конца 1990-х годов министерство энергетики США разработало несколько вариантов «ускоренных» очистительных программ для своих комплексов по производству ядерного оружия. Это привело к форсированному выведению из эксплуатации двух крупных оружейных заводов - «Роки Флэте» (Rocky Flats) в штате Колорадо, где было организовано массовое производство оружейных плутониевых пил, и завода «Ферналд» (Fernald), неподалеку от города Цинциннати, штат Огайо, на котором производился урановый металл, главным образом, предназначенный для ядерных реакторов по производству плутония. Эти предприятия считаются флагманами в усилиях федерального правительства «привести в порядок» и «закрыть» некоторые наиболее загрязненные территории страны.

Совсем не обязательно, что под «ускоренными» понимаются более совершенные проекты или программы с пониженным риском. Для того, чтобы проанализировать эффекты поспешно проведенных очистительных мероприятий, где премиальные зависели от выполнения плана и не имели отношения к дозам радиоактивного облучения для будущих поколений, мы провели анализ некоторых радиоактивных отходов на заводе Ферналд.

Особые виды отходов, которые мы изучали, образованы при добыче богатых урановых руд. Некоторые виды этих руд перерабатывали во времена Манхэттенского проекта во Вторую мировую войну и в первые послевоенные годы на химическом заводе «Малинкродт» в Сент-Луисе (Mallinckrodt Chemical Works). Переработка остальных руд проводилась на заводе «Ферналд». Помимо самого урана, в урановой руде содержится торий-230 и радий-226, которые являются продуктами радиоактивного распада урана-238, основного изотопа природного урана (см. цепочку распада урана ниже). Поскольку вышеупомянутые руды являлись высокосообогащенными, они также содержали радий-226 и торий-230, которые являются долгоживущими остеотропными радионуклидами. Богатейшие урановые руды, содержащие до двух третей оксида урана, были известны как «уранинит», который ввозили из «бельгийского Конго», названного так потому, что тогда это была бельгийская колония.

Отходы, образованные при переработке урановых руд и урановых концентратов (желтых кексов), хранились в трех больших железобетонных конструкциях, которые называются бункерами. В бункерах 1 и 2, которые в прошлом году были вычищены от отходов и разрушены, хранились радийсодержащие отходы, образованные при переработке уранинита «бельгийского Конго». В бункере 1 содержались только те отходы, которые были получены на заводе «Малинкродт». Бункер 2 хранил отходы от заводов «Малинкродт» и «Ферналд». Бункеры 1 и 2 также называли бункерами «К-65» по одноименному процессу, который применялся для извлечения урана из руды.

¹ Статья основана на отчете Энни и Арджуна Макхиджани (Annie and Arjun Makhijani) “Shifting Radioactivity Risks: A Case Study of the K-65 Silos and Silo 3 Remediation and Waste Management at the Fernald Nuclear Weapons Site” («Изменение рисков радиации: анализ очистительных мероприятий и обращения с отходами из бункеров К-65 и бункера 3, которые хранятся на ядерном оружейном заводе «Ферналд». IEER: Такома Парк, Мэриленд, август 2006 г.). Подробные ссылки можно найти в полном отчете на сайте: www.ieer.org/reports/fernalld/.

ЦЕПОЧКА РАСПАДА УРАНА – Основная группа Читайте слева направо. Стрелки указывают распад.		
Уран-238 ==> (полураспад 4,46 миллиарда лет) альфа-распад	Торий-234 ==> (полураспад 24,1 дня) бета-распад	Протактиний-234m ==> (полураспад 1,17 минуты) бета-распад
Уран-234 ==> (полураспад 245000 лет) альфа-распад	Торий-230 ==> (полураспад 75400 лет) альфа-распад	Радий-226 ==> (полураспад 1600 лет) альфа-распад
Радон-222 ==> (полураспад 3,82 дня) альфа-распад	Полоний-218 ==> (полураспад 3,11 минуты) альфа-распад	Свинец-214 ==> (полураспад 26,8 минуты) бета-распад
Висмут-214 ==> (полураспад – 19,9 минуты) бета-распад	Полоний-214 ==> (полураспад - 163 микросекунды) альфа-распад	Свинец-210 ==> (полураспад – 22,3 года) бета-распад
Висмут-210 ==> (полураспад – 5,01 дня) бета-распад	Полоний-210 ==> (полураспад - 138 дней) альфа-распад	Свинец-206 (устойчивый)

В бункере 3, который также очищен и разрушен, хранились радиоактивные отходы, которые были образованы при переработке урановых концентратов. Отходы в бункере 3 менее радиоактивны по сравнению с бункерными отходами в К-65 и содержат намного больше тория-230, чем радия-226.

В этой статье анализируются решения по очистке этих бункеров, принятые министерством энергетики США (МЭ), - каким образом они менялись со временем, как осуществлялись и каковы их долговременные радиологические последствия. В статье представлен обзор отчета *«Изменение рисков радиации: анализ очистительных мероприятий и обращения с ядерными отходами в бункерах К-65 и бункере 3»* за август 2006 года. Полный отчет, а также ссылки по данной статье, можно найти на сайте: www.ieer.org/reports/fernalld/.

Мы решили рассмотреть серьезные проблемы и недостатки в системе обращения с этими отходами, поскольку они демонстрируют сложные ситуации в очистке и долгосрочном контроле и являются примером для других комплексов.

Завод «Ферналд»

Центр по производству ядерных сырьевых материалов (Feed Materials Production Center или FMPC), который сегодня называется «Fernald Closure Project Site», занимал территорию в 1050 акров и функционировал с 1952 по 1989 годы. За это время завод произвел примерно 1,3 миллиарда фунтов уранового металла для выполнения американской программы по производству ядерного оружия. Основной функцией этого предприятия являлось обеспечение ядерных реакторов топливом и стержнями для производства плутония на заводах «Хэнфорд» в штате Вашингтон и «Саванна-Ривер» в Южной Каролине. Деятельность завода «Ферналд» привела к загрязнению воздуха, почвы и воды не только на территории завода, но и в прилегающих районах.

Отходы с содержанием радия и тория, которые хранились в трех бункерах, представляли для рабочих завода и местных жителей непосредственный риск радиоактивного облучения двумя способами: 1) выделениями радона, образованными при распаде радия-226 в радон-222 и 2) возможным обрушением крыш бункеров 1 и 2 и утечкой радиоактивных отходов в окружающую среду. Очистка этих бункеров и перевод отходов в такую форму, при которой они в скором времени не рассеялись бы

и оставались устойчивы в течение долгого времени, были признаны трудной и необходимой задачей, связанной с закрытием завода «Ферналд».

Бункерные отходы

В таблице 1 указаны концентрации различных радионуклидов в бункерных отходах завода «Ферналд». Таблица 2 показывает содержание радиоактивности в бункерных отходах некоторых радионуклидов. Содержимое бункеров 1 и 2 было идентичным, поскольку отходы были генерированы от богатых урановых руд. Необходимо отметить, что, несмотря на то, что содержание радия-226 намного превышает концентрацию тория-230, у последнего период полураспада намного выше и составляет для этих радионуклидов 1600 и около 75 000 лет соответственно.

Более того, торий-230 распадается в радий-226, и поэтому за несколько тысяч лет их концентрации становятся практически одинаковыми. Эти концентрации находятся почти в равновесии более длительные периоды, чем период полураспада у радия-226, но намного меньше, чем у тория-230. Отсюда следует, что полураспад тория-230 контролирует скорость распада отходов за очень длительный период времени. К тому же, при вдыхании, дозы облучения для большинства органов на единицу радиоактивности у тория-230 намного превышают радий-226.

Основным радионуклидом в отходах из бункера 3, который вызывает беспокойство, является торий-230. Однако за тысячу лет радий-226 постепенно накопится и к тому времени будет почти равен концентрации тория-230. В отходах из бункера 3 также содержатся мышьяк, кадмий, хром и селен. Как правило, в отходах, образованных при переработке руды, имеется большое содержание тяжелых металлов. Свинец-210 и полоний-210 являются продуктами распада радона-222, который в свою очередь есть продукт распада радия-226.

Таблица 1: Расчетное содержание радионуклидов в отходах из бункеров 1,2 и 3

Радионуклид	Средняя концентрация, в пикокюри на 1 грамм		
	Бункер 1 (V=3240 m ³)	Бункер 2 (V=2845 m ³)	Бункер 3 (V=3890 m ³)
Актиний-227	5960	5100	618
Свинец-210	165 000	145 000	2620
Полоний-210	242 000	139 000	Нет данных
Протактиний-231	Нет данных	2350	487
Радий-226	391 000	195 000	2970
Торий-230	60 000	48 400	51 200
Уран-234	800	961	1480
Уран-238	642	912	1500

Источник: адаптировано из отчета IEER от 1997 года «*Containing the Cold War Mess*», сайт: www.ieer.org/reports/cleanup/, ссылка Д. Пэйн (D. Paine), руководитель Проекта по управлению бункерами с ядерными отходами, «*Operable Unit 4: Project History and Status Presentation*», завод «Ферналд», штат Огайо. Сопровождение независимой группы наблюдателей, 14 ноября 1996 года, стр. 8 и 11.

Примечания: в объемы (V) по бункерам 1 и 2 не входят 357 и 314 кубических метров (m³) соответственно бентонитовой глины, которую добавили в 90-х годах для сокращения радоновых выделений. Бентонитовую глину не добавляли в бункер 3. Существует незначительное расхождение в объемах, указанных Пэйном, по бункерам 1 и 2 (3240 + 2845 = 6085 кубических метров) и общем объеме, указанном в Протоколе решения (6120 кубических метров).

Таблица 2: Радиоактивность отходов в бункерах 1,2 и 3

Радионуклид	Бункеры 1 и 2 вместе	Бункер 3
Свинец-210	1800 кюри	4 кюри
Радий-226	3700 кюри	26 кюри
Торий-230	600 кюри	450 кюри
Уран	28 метрических тонн (см. примечание)	около 20 кюри

Источник: протокол решения для «OU4» от 1994 года и «*Safety of the High-Level Uranium Ore Residues at the Niagara Falls Storage Site*» Льюистон, Нью-Йорк (Вашингтон, округ Колумбия: Нэшнл Академи Пресс, 1995 г.). Примечание: 28 метрических тонн природного урана соответствуют менее 20 кюри.

Классификация и захоронение бункерных отходов

В Законе об атомной энергии все ядерные отходы из трех бункеров классифицируются как побочные материалы, образованные при обработке урановых или ториевых руд. Как правило, здесь подразумеваются хвосты или отходы, полученные при извлечении урана или тория из этих руд. Отходы побочных продуктов не прописаны в Законе об охране и восстановлении ресурсов США (Resource Conservation and Recovery Act или RCRA), даже несмотря на то, что все три бункера содержат такие концентрации токсичных металлов, которые превышают предельные уровни, установленные законом RCRA. Однако тот факт, что проблема хвостов не регулируется Законом, не означает, что эти ядовитые металлы не будут оказывать негативного воздействия на здоровье будущих поколений. Наоборот, это наверняка произойдет, поскольку обращение с ними не прописано в Законе, и это может привести к захоронению этих отходов на усмотрение менеджеров производства.

В хвостах от американских руд обычно содержатся относительно низкие концентрации радиоактивности по сравнению с другими радиоактивными отходами, однако хвосты составляют самый большой объем таких отходов (возможным исключением являются отходы при добыче урановой руды). Это происходит потому, что, как правило, в урановых рудах США содержание урана достаточно низкое – менее одного процента. Напротив, богатые ураном руды, в том числе уранинит, из которого образованы отходы в бункерах 1 и 2, содержат примерно до 65 процентов оксида урана, что приводит к относительно небольшим объемам отходов с высокой концентрацией тория-230, радия-226 и твердых продуктов распада радия-226. В таблице 3 сравнивается концентрация радиоактивности в хвостах с остатками руды от 0,2% и отходах из трех бункеров.

Таблица 3: Радиоактивность бункерных отходов в сравнении с обычными урановыми хвостами в США

Вещество	Концентрация в нанокюри на 1 грамм	Соотношение бункерных отходов/хвостов
Хвосты, образованные от 0,2% урановой руды	от 2 до 3,4	--
Отходы бункера 1	452	133
Отходы бункера 2	245	72
Отходы бункера 3	54	16

Примечание: хвосты, образованные от 0,2% урановой руды являются типичными в США. Объемы по бункерным отходам включают лишь долгоживущие альфаизлучающие радионуклиды - U-238, U-234, Th-230, Ra-226 и Ra-231. Данные по объему для бункера 1 были недоступны, поэтому здесь был использован объем в отходах из бункера 2. U-235 не был включен, поскольку он не играет в данном случае серьезной радиологической роли.

Из всех радиоактивных отходов, процедуры по захоронению хвостов являются наиболее непроработанными, во многом из-за их типично большой объемности и низкой удельной активности (радиоактивность на единицу массы). Их необходимо поместить в укрепленные пруды-хвостохранилища с водной защитой для того, чтобы сократить выделения радона в воздух.

Контроль над типичными хвостами не обеспечивает защиту здоровья людей на долгосрочную перспективу в силу очень длительного периода полураспада тория-230. Однако он (торий-230) свободно подпадает под категорию радиоактивных отходов, которая называется низкоактивными отходами класса А, поскольку суммарная концентрация урана, тория-230 и радия-226 (долгоживущие альфаизлучающие вещества в хвостах) остается ниже 10 нанокури на 1 грамм.

Как видно из таблицы 3, концентрация радиоактивности в типичных хвостах в США сопоставима с концентрацией в отходах класса А, который ограничивает содержание плутония и других трансурановых радионуклидов до 10 нанокури на один грамм. Этого не скажешь об отходах в трех бункерах на заводе «Ферналд». Содержание долгоживущих альфаизлучающих радионуклидов в бункерах 1 и 2 превышает даже 100 нанокури на 1 грамм, несмотря на то, что они не являются трансурановыми радионуклидами. Точнее, они являются продуктами распада урана-238 и урана-235. Сто нанокури на один грамм – это максимальный уровень содержания долгоживущих альфаизлучающих трансурановых радионуклидов для низкоактивных отходов класса С. Отходы, в которых содержание долгоживущих альфаизлучающих трансурановых радионуклидов превышает 100 нанокури на 1 грамм, называются отходами «выше класса С», где обычный способ утилизации, поверхностное захоронение, не подходит. То есть, эти отходы необходимо поместить в глубокое геологическое хранилище, если только Комиссия по ядерному регулированию США (Nuclear Regulatory Commission) не даст особого распоряжения, освобождающего их от подобного захоронения. (Дополнительная информация о классификации радиоактивных отходов предоставлена в рамке ниже).

Национальная академия наук в целом согласна с нашим анализом. В отношении отходов в бункерах 1 и 2 она утверждает:

«Хотя радий не является трансурановым элементом, отходы К-65 выделяют существенную дозу внешнего облучения из-за гамма-излучения и риски, которые они собой представляют, могут даже превышать риски от некоторых трансурановых отходов и, как минимум, идентичны, судя по внутренней токсичности входящих изотопов».²

Согласно законам США, трансурановые отходы, чья удельная активность превышает 100 нанокури на 1 грамм, а периоды полураспада больше 20 лет, подлежат захоронению в глубоком геологическом хранилище.³ Концентрации радия-226 в отходах из бункеров 1 и 2 намного превышают эту цифру. Кроме того, радиологические свойства радия-226 (а также тория-230) совпадают со свойствами

² Национальный научно-исследовательский совет США, стр. 64 «Риск и решения об утилизации трансурановых и высокоактивных отходов» (*Risk and Decisions About Disposition of Transuranic and High-Level Radioactive Waste*), Комитет по методам оценки рисков утилизации трансурановых и высокоактивных отходов (Committee on Risk-Based Approaches for Disposition of Transuranic and High-Level Radioactive Waste), Совет по контролю над радиоактивными отходами (Board on Radioactive Waste Management), Отдел по изучению земли и жизни (Division on Earth and Life Studies), Национальный научно-исследовательский совет Национальных академий (National Research Council of the National Academies). Вашингтон, округ Колумбия: Нэшнл Академис Пресс (National Academies Press), 2005 г., сайт: www.nap.edu/books/0309095492/html.

³ Свод федеральных постановлений США (CFR), глава 40, пункт 191.02 (i).

трансурановых элементов. Таким образом, поверхностное захоронение этих отходов идет вразрез с формулировками действующих положений, даже несмотря на то, что по отходам в бункерах 1 и 2 нет четкой классификации, которая бы требовала для них глубокого геологического захоронения.

В отходах из бункера 3 концентрация тория-230 намного превышает предельный уровень для низкоактивных отходов класса А, который составляет 10 нанокури на 1 грамм, и поэтому их захоронение не должно осуществляться без особых мер предосторожности, которые принимают для низкоактивных отходов класса В, либо на предприятии, у которого нет лицензии на утилизацию отходов класса В.

Если принять все вышесказанное в расчет, контроль над бункерными отходами на заводе «Ферналд» может быть обречен на провал. Этот вывод подтверждает тщательная радиологическая оценка, выполненная нашим Институтом, о чем подробно описано ниже (читайте «Расчетные дозы для будущих поколений»). Но прежде мы кратко упомянем историю и опишем текущее состояние очистительной программы по бункерным отходам.

Классификации радиоактивных отходов

Трансурановые отходы, которые также известны, как ТУО, содержат элементы, число атомов которых превышает 92, т.е. атомное число урана. В ТУО содержатся альфаизлучающие трансурановые радионуклиды, чей период полураспада превышает 20 лет и общая концентрация составляет больше 100 нанокури на 1 грамм. Это определение составлено Управлением по защите окружающей среды. Определение, составленное Комиссией по ядерному регулированию США (Nuclear Regulatory Commission) несколько отличается от первого и относится к более широкой категории, которая называется Отходами выше класса С.

Низкоактивные отходы (НАО) определены неверно. Согласно положениям Комиссии по ядерному регулированию США (NRC), низкоактивными отходами считаются "радиоактивные отходы, не попавшие в категорию высокоактивных отходов, трансурановых отходов, отработанного ядерного топлива или побочных веществ (т.е. хвостов урана или тория)..."

Таким образом, получается, что в категорию низкоактивных радиоактивных отходов входит весь низкоактивный мусор (например, швабры, перчатки и ботинки) и высокорadioактивные активированные металлы из ядерных реакторов. Сюда входят короткоживущие и долгоживущие радионуклиды.

В положениях Комиссии коммерческие низкоактивные отходы подразделены на четыре класса, которые определяются типами радионуклидов и их концентрацией, из которых и состоят отходы. Эти классы обозначены буквами А, В, С, а также отходы выше класса С.

Класс А - в среднем это отходы низкой радиоактивности, которые содержат в основном загрязняющие вещества, которые Комиссия определила как "короткоживущие" радионуклиды.

Классы В и С - это более радиоактивные отходы. К классу В относятся загрязняющие вещества с более высоким содержанием "короткоживущих" радионуклидов, по сравнению с классом А, а класс С содержит большее количество долгоживущих и короткоживущих радионуклидов, нежели классы А и В.

Отходы **выше класса С**, как правило, намного радиоактивнее отходов других классов, и их захоронение на малой глубине, на которую обычно утилизируют отходы классов А, В и С, в США запрещено. Поверхностное захоронение радиоактивных отходов в основном означало обычную утилизацию, однако согласно сегодняшней концепции эта утилизация более усложняется.

Источники: Макхиджани и Салеска, «*High-Level Dollars, Low-Level Sense*» ("Высокоактивные доллары, низкоактивный смысл"), IEER (Нью-Йорк, Апекс Пресс, 1992 г.), а также «*Classifications of Radioactive Waste*» («Классификации радиоактивных отходов»), IEER On-Line Classroom, последнее обновление от 29 апреля 1996 г., сайт: www.ieer.org/clssroom/r-waste.html

Программа очистки бункерных отходов: обещания и реальность

В 1994 году МЭ издало протокол решения (Record of Decision или ROD), где было указано, что наилучшим способом обращения с отходами из бункеров стало бы помещение отходов в плавильный аппарат, аналог стеклоплавильной печи, накаливание, и затем остекловывание (или витрификация, то есть превращение отходов в стекловидное вещество). Стекловидные блоки бункерных отходов можно было бы захоронить на ядерном испытательном полигоне Невада (Nevada Test Site). Еще один способ, который рассматривался, но был отклонен, предлагал смешать бункерные отходы с цементом.

В этом протоколе сравнение методов остекловывания и цементирования для отходов из бункеров 1 и 2 обсуждалось отдельно от способов обращения с отходами из бункера 3 из-за разницы в их химическом составе. Наилучшим способом для отходов из всех бункеров было признано остекловывание, поскольку лабораторные эксперименты показали, что данный метод мог бы эффективнее всего предотвратить перемещение радионуклидов в окружающую среду. Другими преимуществами этого метода, также упомянутыми в протоколе, были сокращение объемов ядерных отходов и тот факт, что цементирование (то есть соединение отходов с цементом) не приводит к такому же эффективному сокращению радоновых выделений, как витрификация.

В то время стоимость цементирования отходов из бункеров 1 и 2 оценивалась в 73,1 миллиона долларов США в отличие от остекловывания, которое стоило 43,7 миллиона. Для отходов из бункера 3 эта стоимость составляла 36,8 и 28 миллионов долларов соответственно. Остекловывание получалось дешевле, в основном, за счет предполагаемой экономии на транспортировке отходов, в результате сокращения их объемов, которое бы достигалось с помощью витрификации.

Однако эту программу не удалось реализовать из-за ряда ошибок, допущенных в управлении и производственном процессе, а также неудачных решений. Та программа, которую на самом деле удалось выполнить, была намного хуже остекловывания.

Несмотря на то, что остекловывание продуктов деления, полученных при переработке отработанного ядерного топлива, выполняется на стандартной основе, остекловывание тех видов ядерных отходов, которые хранятся в бункерах, оказалось более трудной задачей, поскольку этот метод еще никогда так широко не применялся. Флер Ферналд (Fluor Fernald), подрядчик МЭ, принял решение провести лабораторные эксперименты, а затем построить пилотный завод для проверки этого метода до начала крупномасштабного строительства. Однако неудачный проект пилотного завода и неспособность учесть специфику отходов из бункера 3, несмотря на то, что о возникновении возможных проблем предупреждалось заранее, привели к повреждению стеклоплавильной печи еще до того, как туда поместили радиоактивные отходы.⁴

После провала в работе пилотного завода Флер Ферналд продолжил работать над проектом по остекловыванию, однако решил, что, так как начинать все нужно заново, витрификацию отходов из бункеров 1 и 2 необходимо выполнить отдельно от остекловывания отходов из бункера 3. Однако впоследствии качество программы по очистке бункеров лишь неизменно ухудшалось.

Это ухудшение качества было непосредственно связано с программой по «ускоренной очистке», проведенной МЭ в 90-х годах, после которой в 2002 году

⁴ Подробный обзор повреждения стеклоплавильной печи описан в главе 4 отчета IEER «*Containing the Cold War Mess*» («Ужасы Холодной войны»), который размещен на сайте: www.ieer.org/reports/cleanup/ccwm.pdf.

последовала всесторонняя проверка (Top-to-Bottom Review), из-за которой дату закрытия завода «Ферналд» перенесли на 2006 год с прежнего, менее амбициозного срока - 2006 - 2010 годы. Причинами ускорения министерством этого процесса служили необходимость решить вопрос о росте издержек и своевременно ликвидировать загрязняющие радиоактивные вещества для защиты здоровья и окружающей среды. Еще одна предположительная причина этого – экономия денежных средств.

Однако в то время как программа быстро набирала темпы, задача по долгосрочным техническим характеристикам очистительных мероприятий практически не выполнялась. Флеру пообещали премию только за вовремя выполненную работу. Опоздание грозило денежным штрафом, однако не было предусмотрено никаких поощрений за обеспечение более надежной защиты окружающей среды или штрафа за плохие технические показатели долгосрочного захоронения отходов.

Результат был предсказуем. На разных этапах программу по витрификации отходов из трех бункеров отклонили. Отходы из бункеров 1 и 2 были зацементированы. Программу по цементированию отходов из бункера 3 отклонили, а отходы упаковали – с минимальными мерами по сокращению их потенциальной утечки – в большие пластиковые пакеты (см. фото).

Мнение властей штата Невада не совпало с точкой зрения МЭ по поводу того, безопасным ли будет захоронение отходов из бункера 3 на испытательном полигоне Невада (Nevada Test Site), и штат пригрозил министерству подать в суд, если эти отходы доставят сюда. Не имея других вариантов, МЭ отправило отходы из бункера 3 на завод по утилизации низкоактивных отходов «Envirocare» («Экопомощь»), расположенный в штате Юта⁵, у которого есть лицензия на прием низкоактивных отходов класса А и побочных материалов. «Envirocare» разрешено принимать побочные материалы при условии, что средняя концентрация радиоактивности в отходах, поступающих в грузовиках, для радия-226 ниже 4000 пикокюри на один грамм, а для тория-230 - ниже 60 000 пикокюри на грамм.

На сегодняшний день отходы из бункера 3 отвечают критериям по утилизации на заводе «Envirocare» в отношении двух упомянутых радионуклидов. Однако заводская лицензия на утилизацию не учитывает тот факт, что торий-230 распадается в радий-226. Примерно через 50 лет предельная концентрация радия-226 в отходах, которая составляет 4000 пикокюри на один грамм, будет превышена.⁶ Если бы эти отходы были отправлены на завод тогда, то они уже не отвечали бы данным критериям по утилизации.

Кроме того, для большинства органов в организме человека доза в один пикокюри тория-230, переданная органам при поглощении или вдыхании, намного опаснее такой же дозы радия-226. Например, доза в один пикокюри при вдыхании тория-230 примерно в 300 раз опаснее дозы радия-226 для костной поверхности или печени.

Отдел радиационного контроля (Division of Radiation Control или DRC) в штате Юта, который предоставил заводу «Envirocare» лицензию, плохо справился с задачей по созданию регулятивной основы для низкоактивных отходов класса А, которая призвана защищать здоровье будущих поколений. DRC пытался уйти от этих проблем, просто-напросто предполагая, что никто никогда не окажется на этом заводе, даже через много тысяч лет.

⁵ Сегодня эта компания называется «Energy Solutions».

⁶ Примерно через 8000 лет она достигнет 50 000 пикокюри на один грамм.

Расчетные дозы для будущих поколений

С помощью компьютерной системы «RESRAD» мы провели вычисления, чтобы подтвердить, будет ли поверхностное захоронение бункерных отходов отвечать критериям, установленным федеральными нормами, которые ограничивают радиационное облучение в общей совокупности до 25 милибэр в год на человека.⁷ «RESRAD» - это компьютерная программа, одобренная правительством, которая позволяет оценивать длительные воздействия почвы, зараженной радиацией, на здоровье людей.

Бункеры 1 и 2

На сегодняшний день не принято окончательного решения о способе захоронения отходов из бункеров 1 и 2. Поскольку концентрация радия-226 в отходах намного превышает предельный уровень, составляющий 4000 пикокюри на один грамм, который установлен для завода «Envirocare», эти отходы не могут быть отправлены в штат Юта. Зацементированные (забетонированные) отходы отправляются для временного хранения на завод, расположенный в штате Техас, которым владеет и управляет Организация специалистов по контролю над отходами (Waste Control Specialists или WCS), у которой пока нет лицензии на захоронение радиоактивных отходов.

На самом деле, возможность этой организации перерабатывать ядерные отходы вызывает сомнения из-за грубых ошибок, допущенных в заявке на получение этой лицензии.⁸ Например, используя данные МЭ, WCS утверждает, что Ок-Риджский завод отправит ей для захоронения свыше 12 000 метрических тонн отходов урана-235. Этот объем превышает общие запасы U-235, которые когда-либо добывались в мире. Если WCS не способна обнаружить очевидных ошибок в своих данных по ядерным отходам (а это не единственная нелепая ошибка в цифрах, допущенная организацией в заявке на лицензию), то каким образом от нее можно ожидать, скажем, предотвращения нелегального захоронения запрещенных к утилизации радиоактивных материалов в ходе эксплуатации хранилища?

Наш Институт провел оценку доз облучения в отдаленном будущем в том случае, если бы хранилище WCS было бы нечаянно кем-то занято или же при случае даже использовалось под пастбище или для охоты. Эти примеры относятся к прошлому использованию этого места. В таблице 4 указаны расчетные предельные дозы и время их наступления, исходя из интенсивности эрозии контейнера для отходов. Эта оценка подготовлена по «сценарию хозяина ранчо», где предполагается, что в будущем один человек будет проводить ограниченный отрезок времени на этой территории, и не будет заниматься строительством или садоводством.

В зависимости от интенсивности эрозии проектная доза внешнего облучения для максимально облученного человека в будущем в 346-800 раз превышает действующий сегодня предельный уровень, составляющий 25 милибэр в год. Необходимо отметить, что такие пиковые дозы возникают из-за радия-226, который является продуктом распада тория-230. Радий-226, который присутствует в отходах,

⁷ Свод федеральных постановлений, глава 10, пункт 61, подпункт С.

⁸ Эти ошибки задокументированы в отчете IEER «Затраты и риски, связанные с контролем и утилизацией обедненного урана от национального обогатительного завода, который корпорация «LES» планирует построить в округе Ли, штат Нью-Мексико» («Costs and Risks of Management and Disposal of Depleted Uranium from the National Enrichment Facility Proposed to be Built in Lea County New Mexico by LES»), сайт: [at www.ieer.org/reports/du/LESrptfeb05.pdf](http://www.ieer.org/reports/du/LESrptfeb05.pdf).

почти полностью исчезнет спустя примерно 9150 лет, а примерно через 91 500 лет он исчезнет совсем.

Таблица 4: Предельные дозы при захоронении забетонированных отходов из К-65 – «сценарий хозяина ранчо»

Интенсивность эрозии (см в год)	Предельная доза внешнего облучения (бэр в год)	Предельная доза при вдыхании (бэр в год)	Кол-во лет до наступления предельной дозы
0,1	20,1	0,078	9150
0,01	8,7	0,037	91 500

Бункер 3

Отходы из бункера 3 планируется захоронить на заводе «Envirocare» в штате Юта. В таблице 5 указаны дозы, рассчитанные программой RESRAD по модели этих отходов. Kd – это коэффициент распределения, который показывает, насколько тесно загрязняющее вещество связано с почвой. Как описано в статье Брайса Смита (Brice Smith), значение Kd может сильно варьироваться на разных территориях или даже в пределах одной.

Таблица 5: Предельные дозы по захоронению отходов из бункера 3 – «сценарий хозяина ранчо»

Kd	Предельная доза внешнего облучения (бэр в год)	Предельная доза при вдыхании (бэр в год)	Кол-во лет до наступления предельной дозы
Низкий Kd, HIR, HC	245	0,698	6800
Высокий Kd, LIR, LC	273	0,756	9000

Примечания: HIR – высокая интенсивность инфильтрации, HC – высокая проводимость, LIR низкая интенсивность инфильтрации, а LC – низкая проводимость. Мы решили совместить низкий Kd с высокой интенсивностью инфильтрации и высокой проводимостью, а также высокий Kd с низкой интенсивностью инфильтрации и низкой проводимостью с тем, чтобы получить самую низкую и высокую степени утечки радионуклидов из траншеи. Результаты оказались одинаковыми как для высокой, так и для низкой интенсивности эрозии.

Более быстрое наступление предельных доз из-за отходов из бункера 3 происходит из-за меньшей толщины заслона отходов, нежели на заводе WCS. Доза внешнего облучения радием-226 в данном случае также преобладает.

Расчетные дозы внешнего облучения из-за отходов из бункера 3, которые варьируются в пределах 250 бэр, в 10 000 превышают предельный уровень дозы, составляющий 25 милибэр. Поэтому, если в далеком будущем некий охотник или автомобилист-любитель, либо иной гость заглянут туда хотя бы на час, то они получат такую дозу облучения, которая намного превысит допустимую норму.

Эти две системы расчетов доз наглядно объясняют, почему бункерные отходы завода «Ферналд» необходимо утилизировать в глубокое геологическое хранилище. Хотя некоторые риски, связанные с захоронением в глубокое геологическое хранилище, все же остаются, риски значительного превышения доз облучения от поверхностного захоронения исключены.

Предложение IEER по захоронению отходов из бункеров 1 и 2

Проведенные нами расчеты с помощью системы RESRAD показывают, что завод организации WCS - неподходящее место для захоронения отходов из бункеров 1 и 2. Весьма сомнительно, чтобы хоть какой-нибудь комплекс для поверхностного захоронения ядерных отходов мог бы соответствовать предельным уровням доз облучения, которые установлены действующими положениями. «Мокрые» хранилища могут выделять высокие дозы облучения, в основном, за счет путей водного потока, на «сухих» хранилищах высокие дозы радиации возникают, главным образом, из-за появления эрозии, которая обнажает ядерные отходы. В последнем случае основным компонентом радиации служит доза внешнего облучения от радия-226.

Проблема захоронения бункерных отходов из К-65 во многом схожа с проблемой захоронения обедненного урана, которую IEER широко изучал.⁹ Именно Институт сделал научный вывод о том, что и те, и другие отходы необходимо утилизировать в глубокое геологическое хранилище, так как поверхностное захоронение наверняка не будет отвечать критериям на соответствие дозам.

На то время, пока разрабатывается метод репозиторного захоронения, зацементированные отходы из К-65 следует поместить на промежуточное мониторинговое хранение. После этого отходы необходимо утилизировать в глубокое геологическое хранилище вместе с обедненным ураном, который был образован прежде при обогащении урана в США. В настоящее время нет ни одного глубокого геологического хранилища, подходящего для больших объемов ОУ, образованных на урановых обогатительных заводах.

Объем ОУ может составить несколько сотен тысяч кубических метров. Это намного больше, чем сегодняшний объем забетонированных отходов из бункеров 1 и 2. Даже дополнительно упаковав цементные блоки для соответствия будущим критериям приема ядерных отходов на репозиторное хранение, объемы отходов из бункеров 1 и 2 останутся небольшими по сравнению с отходами ОУ. В результате, предельные издержки не будут высокими, хотя средняя стоимость глубокого захоронения, скорее всего, во много раз превысит стоимость поверхностного.

Другие проблемы завода «Ферналд»

Мы обсудим два последних вопроса, которые очень важны, поскольку некоторые территории комплекса «Ферналд» еще с десятков тысяч лет будут заражены радиацией. Эти вопросы касаются а) остаточной радиоактивности в хранилище для отходов на месте производства (On-Site Disposal Facility) и б) постоянного мониторинга и образования местного населения.

Хранилище для отходов на месте производства (On-Site Disposal Facility или OSDF) или «могильник» - это вытянутая вдоль земляная структура, постоянно расположенная на территории комплекса «Ферналд» (см. фото). Там содержится около 2,5 миллиона кубических ярдов земли и различного мусора, загрязненных низкоактивными отходами. Основная проблема заключается в том, что при расчете допустимых уровней остаточной радиации в могильнике МЭ использовало компьютерную программу, где, похоже, имеется серьезная систематическая ошибка. В частности, мы обнаружили, что по расчетам МЭ в качестве остаточной радиоактивности *на один грамм* почвы можно оставить *четыре грамма* нептуния (общая масса). Безусловно, это физически невозможно. Эти расчеты необходимо

⁹ там же, раздел II.A.

проверить и переделать после того, как компьютерная программа будет налажена. Опубликование абсурдного значения радиоактивности говорит об отсутствии контроля качества, откуда возникают вопросы об остальных расчетах.

Далее. МЭ отказалось от данного ранее обещания в обязательном порядке профинансировать образовательную программу, которая помогала бы информировать людей об этом хранилище для отходов и остаточной радиоактивности на далекую перспективу. Штат Огайо по закону осуществляет опеку над своими природными ресурсами. При подобных обстоятельствах по закону США (Superfund law) необходимо проводить финансирование этого завода для оценки ущерба, однако никаких средств МЭ не предоставляет. Ведущий адвокат штата Огайо опротестовал это, и на момент выхода этого номера журнала в печать, данный вопрос был на стадии обсуждения.

Вот наши основные выводы и рекомендации по обращению с бункерными отходами на заводе «Ферналд», по проблемам могильника ядерных отходов, а также по вопросам финансирования мониторинга и образования.

Основные выводы

1. Плохое управление и ошибки в проекте привели к провалу программы по остеклованию бункерных отходов, хранящихся на заводе «Ферналд». Вместо того чтобы исправить ошибки в управлении и техническом исполнении проекта, министерство энергетики США (МЭ) приняло решение изменить формы хранения отходов, что привело лишь к серьезному ухудшению ожидаемых долговременных технических характеристик.
2. Изменение форм хранения отходов и ожидаемых технических характеристик привели к тому, что в будущем трудно будет определить состояние переработанных ядерных отходов из бункеров 1 и 2. Если зацементированные отходы будут утилизированы с помощью поверхностного захоронения, то расчетные долгосрочные дозы радиации во много раз превысят допустимый законом предельный уровень, составляющий 25 милибер в год.
3. Предполагается, что отходы из бункера 3 будут очень долго выделять дозы радиационного облучения, которые могут значительно превышать допустимые законом предельные уровни, даже несмотря на то, что эти отходы значительно менее радиоактивны, чем отходы из бункеров 1 и 2. Многолетнее накопление радия-226 до высоких уровней (намного превышающие допустимые уровни концентрации в отходах на момент их утилизации на заводе «Envirocare») – это очень серьезная часть проблемы.
4. Большое увеличение стоимости утилизации отходов, несмотря на серьезное постепенное ухудшение технических показателей, похоже, не имеет явной инженерной основы. Изменение стоимости, внесенное МЭ и его подрядчиком, не было очевидно с точки зрения их технических обоснований.
5. Процессом принятия решения об изменении формы хранения отходов руководили выгода и краткосрочная прибыль, отчего пострадало качество долгосрочных технических характеристик. Причем МЭ – оно не включило в свое решение о поощрениях премию за создание долгосрочных характеристик формы хранения отходов - создал неправильный стимул быстрого окончания работ ценой долгосрочной защиты здоровья и окружающей среды.

6. МЭ изменило задачу и не проконтролировало, как следует, очищение подземных вод от уранового загрязнения на заводе «Ферналд» сразу после начала очистительных мероприятий, поскольку в 2000 году Управление по защите окружающей среды США (EPA) провозгласило о смягчении стандарта по сравнению с ранее установленной нормой по очистительным мерам.
7. Министерство энергетики отказалось выполнить свои обязательства перед местным населением в отношении гарантированного финансирования на образовательную программу для населения в рамках реализации Плана по восстановлению природных ресурсов (National Resource Restoration Plan). Это очень важная задача, поскольку местное население смирилось с тем, что большие объемы низкоактивных отходов могут быть утилизированы в хранилище для отходов на территории завода. Этот отказ от многолетнего контроля идет параллельно с постепенным ухудшением формы хранения отходов, которая выбрана для бункерных отходов.
8. Критерии приема отходов в хранилище по его утилизации, которое расположено на территории завода «Ферналд», не рассматривались на соответствие качеству.

Основные рекомендации

1. Материальные поощрения не должны зависеть только от выполнения плана. Последствия долговременных доз облучения для всех сообществ, подвергаемых воздействиям ядерных отходов, в том числе районов, куда отвозятся эти отходы, должны быть основной задачей договорного процесса.
2. Необходимо, чтобы у властей штата, местных властей и общины была более жесткая система законов, способная помешать министерству энергетики США постепенно снизить показатели или ухудшить качество очистительных мер после выхода протокола решения (ROD).
3. Нельзя допускать поверхностного захоронения отходов из бункеров 1 и 2, хранящихся на заводе «Ферналд». Эти отходы необходимо утилизировать в глубокое геологическое хранилище. Их можно захоронить вместе с отходами обедненного урана (ОУ), который был образован за все время обогащения урана и также требуют репозиторного захоронения. Эти отходы ОУ, которые сегодня составляют 740 000 тонн в неустойчивой форме гексафторида, хранятся на трех комплексах министерства энергетики, расположенных в штатах Кентукки, Огайо и Теннесси, и ожидают утилизации. Подробную информацию читайте в журнале SDA, выпуск 13, номер 2, за июнь 2005. Поскольку объем отходов из бункеров 1 и 2 намного меньше, чем запасы отходов обедненного урана, и поскольку удельная активность каждого вида этих отходов схожа, бункерные отходы, скорее всего, не прибавят в значительной мере доз радиоактивного излучения, возникающих от их совместной утилизации.
4. МЭ необходимо учредить постоянный фонд для мониторинга и образования населения с довольно большим долевым участием, чтобы покрывать ежегодные затраты на эти программы. Федеральное правительство должно авансировать основные выплаты властям штата и местным властям, на условиях открытого доступа к информации и общественного участия.
5. Федеральное правительство должно нести ответственность за процессуальные издержки, в том числе судебные издержки, возникающие вследствие

демонстративного отказа МЭ придерживаться своих обязательств по выполнению очистительных работ или по долговременному контролю.

6. Необходима независимая программа на соответствие очистительных проектов качеству для компьютерных программ и проведенных с их помощью расчетов, включая входные параметры и программную логику, которая бы подтвердила техническую обоснованность решений по очистительным мероприятиям. К ним относятся программы, которые были использованы для расчета окончательных нагрузок и максимальных концентраций остаточной радиоактивности отходов, которые можно поместить в могильники. В особенности, тщательной проверки требуют компьютерная программа и заданные параметры. Наверняка в этой компьютерной программе существует как минимум одна серьезная ошибка, которую необходимо исправить. Сразу после независимой оценки качества программы необходимо заново провести оценку технических характеристик для хранилища отходов на месте производства, расположенном на территории завода «Ферналд».
7. Властям штата Юта необходимо ужесточить правила приема отходов для того, чтобы общий объем радия, отправленного на поверхностное захоронение, в любой момент времени оставался ниже 4000 пикокюри на один грамм с учетом его накопления из тория-230.

Перемещение радия и плутония в окружающей среде

Брайс Смит

Очень важной задачей является понимание подвижности радия и плутония в окружающей среде, в особенности их перемещение в почве и подземных водах. Радий – это один из основных загрязняющих радионуклидов, который связан с добычей и измельчением урановой руды и который поражает огромное количество различных урановых месторождений. Радием также поражены тысячи нефтяных месторождений среднего размера, и их радиевое загрязнение уже стало общим местом. Плутоний – один из наиболее долгоживущих и опаснейших радионуклидов в процессе производства ядерного оружия. Отходы с содержанием плутония сбрасываются в необорудованные надлежащим образом хранилища, расположенные в нескольких местах на территории США, критически близко от основных водных источников.

Подвижность радия и плутония серьезно варьируется в зависимости от обстоятельств. Расчеты дозы радиоактивного облучения для будущих поколений во многом зависят от предположений о том, каким образом радиоактивное загрязнение почвы в действительности воздействует на подземные воды. Институт по вопросам энергетики и окружающей среды (далее IEER) решил провести анализ перемещения радия и плутония в окружающей среде в связи с научной сложностью данного вопроса, а также необходимостью в повсеместной очистке от этих двух радионуклидов, накопленных повсюду после нескольких десятилетий переработки урана и плутония. Эта статья резюмирует проведенный анализ.¹

Арджун Макхиджани

Учитывая сочетание химических, биологических и физических свойств почвы, очень сложно предсказать подвижность радионуклидов. Существует ряд примеров, когда, используя модели, которые вызвали доверие у Комиссии по атомной энергии и у министерства энергетики США, невозможно было точно спрогнозировать перемещение загрязняющих веществ. После того, как было обнаружено, что радионуклиды способны распространяться в окружающей среде дальше и намного быстрее, эти модели пришлось в корне изменить. Эти недостатки во многом стали результатом неправильной характеристики природных систем.

В настоящих системах могут существовать различные химические или биологические процессы, воздействующие на подвижность загрязняющих веществ, которые способны меняться в пространстве и с течением времени. Траекторий движения радионуклидов также может быть больше, чем принято считать. Наконец, сама модель перемещения может быть достоверной, однако информация о том, какие параметры стоит использовать, может быть недоступна.

Эта статья предлагает краткий анализ перемещения двух особых радионуклидов – радия и плутония. Радий – это природный радионуклид, который составляет радиоактивный ряд урана и тория ([см. цепочку распада урана](#)). В организме радий является аналогом кальция и сразу же направляется в кости. Плутоний – это искусственный радионуклид, который получают в ядерных реакторах. В организме плутоний также в основном поступает в кости.

Целый ряд специфических особенностей изучаемого места может как увеличить, так и замедлить подвижность радия и плутония. В результате, необходимо

¹ Брайс Смит (Brice Smith) и Александра Амонетте (Alexandra Amonette) «The Environmental Transport of Radium and Plutonium: A Review» («Перемещение радия и плутония в окружающей среде: анализ»), Такома Парк, Мэриленд, Институт по вопросам энергетики и окружающей среды (IEER), от 23 июня 2006 г., размещено на сайте: www.ieer.org/reports/envtransport/.

провести детальные и специфические анализы изучаемой территории. Оценки технических характеристик, которые основаны на упрощенных моделях или ложных ценностях, не должны восприниматься, как оценки, отвечающие нормам закона. Разработчики моделей перемещения должны учиться на неожиданных примерах прошлого. Это особенно касается радия, плутония и многих других трансурановых элементов (это элементы, атомное число которых превышает число урана), учитывая долгий период полураспада многих радионуклидов и их материнских радионуклидов.

Метод Kd

Многие загрязняющие вещества, в том числе радий и плутоний, могут задерживаться на почве с помощью ионообмена. Интенсивность этого взаимодействия можно измерить с помощью коэффициента распределения (или Kd). Коэффициент распределения определяет соотношение концентрации загрязняющего вещества, адсорбированного на почве и концентрации загрязняющего вещества, растворенного в воде после того, как система достигла равновесия.

$$Kd = \frac{\text{концентрация загрязняющего вещества в почве (пКи/кг)}}{\text{концентрация загрязняющего вещества в воде (пКи/л)}}$$

Таким образом, коэффициент распределения выражен в несколько необычных единицах литров на один килограмм (л/кг) или равен миллилитрам на один грамм (мл/г). Большое значение коэффициента распределения означает, что загрязняющее вещество тесно связано с почвой и поэтому его миграция будет медленной. Небольшое значение подразумевает обратное. За свою относительную простоту константа распределения Kd является на сегодняшний день наиболее распространенной моделью для оценки перемещения загрязняющих веществ. Метод называют константой Kd, поскольку в модели предполагается, что изучаемое место целиком можно охарактеризовать с помощью одного значения Kd, которое со временем остается неизменным.

Оговорки в модели константы Kd

Несмотря на широкое применение, в методе константы Kd существует ряд серьезных оговорок. Наиболее важным ограничением является то, что значение Kd строго зависит от местных физико-химических условий и, таким образом, может сильно варьироваться не только на разных территориях, но даже в пределах одной. Например, значения Kd по плутонию, измеренные в комплексе «Хэнфорд», варьируются более чем в 1000 раз.

Это различие происходит потому, что адсорбция таких загрязняющих веществ, как радий и плутоний, меняется в зависимости от различных факторов. К этим факторам относятся: жизнедеятельность растений и бактерий; состояние окисления радионуклидов, которое со временем может меняться (особенно это касается плутония, который может существовать в четырех различных состояниях); объем глинозема, песка и органических веществ в почве. В особенности, адсорбция загрязняющих веществ снижается при повышении кислотности почвы, а также при повышении в почвенной системе концентрации ионов с одинаковым химическим составом.

Даже Управление по защите окружающей среды США (EPA) откровенно признает, что неверное определение K_d или использование его типовых значений могут привести к «серьезной ошибке в прогнозировании миграции загрязняющих веществ».²

Дополнительной оговоркой является тот факт, что существует пять различных способов измерения K_d . Как отмечает EPA, «это не только известный, но и вполне предсказуемый факт, что значения K_d , измеренные с помощью разных методов, дадут различные величины».³ Что касается радия, здесь возникают дополнительные неопределенности, когда в ходе измерения присутствуют другие щелочноземельные металлы, поскольку совместное осаждение может привести к ошибочно большим расчетам K_d .

Разрабатываются более сложные модели, которые способны преодолевать некоторые ограничения константы K_d . Эти модели более эффективно охарактеризовали миграцию загрязняющих веществ, в том числе свинцовые и сульфатные загрязнения на урановых рудниках. Проблема этих более современных моделей заключается в том, что они требуют больше информации по изучаемой территории.

Другие пути перемещения

В некоторых случаях, важную роль могут сыграть другие пути перемещения радионуклидов и различные явления природы. Бактерии, которые снижают уровни сульфатов, могут вызвать растворение осадков радия, и тем самым увеличить их подвижность. При этом обнаружено воздействие бактерий типа *Bacillus subtilis* на подвижность плутония. К тому же, животные перемешивают почву, что может увеличить приповерхностную миграцию загрязняющих веществ. Наконец, сходство радия с кальцием способно привести к его бионакоплению, поскольку радий перемещается вверх по пищевой цепи.

Одним из серьезных процессов, способных повлиять на перемещение плутония и других трансурановых элементов, является адсорбция на коллоидных частицах. Коллоидные частицы – это небольшие природные частицы, которые легко откладываются в грунтовых и поверхностных водах. Потенциальная возможность коллоидного перемещения воздействовать на подвижность загрязняющих веществ, например, плутония, была известна более 50 лет назад, однако интерес к этому природному явлению возрос в конце 90-х годов после открытия быстрого коллоидного перемещения плутония на испытательном полигоне Невада. Воздействие коллоидного перемещения сильно зависит от особенностей изучаемой территории. Существуют различные доказательства, которые подтверждают, и в то же время ставят под

² «Понимание разницы коэффициента распределения K_d и значений. Том. Модель измерения K_d и применение кодов химической реакции» (“*Understanding Variation in Partition Coefficient, K_d , Values: Volume 1: The K_d Model of Measurement, and Application of Chemical Reaction Codes*”). Управление по вопросам радиации и воздуха в закрытых помещениях (Office of Radiation and Indoor Air), Управление по твердым отходам и чрезвычайным ситуациям (Office of Solid Waste and Emergency Response), Управление по защите окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency) [и] Управление по оздоровлению окружающей среды (Office of Environmental Restoration), Министерство энергетики США (U.S. Department of Energy), Вашингтон, округ Колумбия, август 1999 г. (EPA402-R-99-004A), стр. 1.1.

³ там же, стр. 3.1.

сомнение, значимость опосредованного коллоидного перемещения на различных ядерных комплексах МЭ.

К тому же, плутоний, который удерживается на осадочной породе, может быть приведен в движение суспензией. Более того, загрязняющее вещество, связанное с поверхностью почвы, может прийти в движение посредством эрозии почвы. Известно, что особенную роль в Национальной лаборатории Лос-Аламоса играет перемещение плутония в поверхностных водах и посредством эрозии почв. Важность этого пути возросла после пожара в мае 2000 года на Серо Гранде (Cerro Grande), который охватил примерно 43 000 акров земли на территории лаборатории и прилегающей зоны. Потеря зеленых насаждений привела к повышению эрозии почвы, в особенности во время наводнения, которое случается при штормах.

Наконец, на территориях, зараженных трансурановыми элементами, необходимо принимать во внимание распад и накопление элементов, у которых может быть совершенно другая подвижность или периоды полураспада по сравнению с их родительскими элементами.

Выводы и рекомендации

Одна из важнейших рекомендаций, которую предоставило Управление по защите окружающей среды в 2004 году в своем анализе подвижности радия, заключалась в том, что «для расчетов с учетом особенностей изучаемого места, совершенно необходимо измерять значения коэффициента распространения с учетом особых условий исследуемой территории»⁴ (подчеркнуто в оригинале). Подобные выводы справедливы и для плутония. Оценки, которые основаны на ошибочных значениях коэффициента распределения, не должны приниматься во внимание для регулятивных целей. Необходимо как минимум постараться определить обоснованное значение K_d с учетом специфики исследуемого места.

Несмотря на то что во многих случаях можно определить подходящее значение K_d , особое внимание необходимо уделять использованию более сложных моделей перемещения в свете общеизвестных ограничений метода K_d , особенно на территориях, где хранятся высокорadioактивные и химически активные отходы. В тех случаях, где потенциально важными факторами являются перемещение загрязняющих веществ посредством эрозии почв и в поверхностных водах, либо опосредованное коллоидное перемещение, необходимо применить такую модель, которая могла бы учитывать эти пути перемещения, в особенности учитывая относительно быструю миграцию плутония, которая уже наблюдалась в некоторых местах.

⁴ «Понимание разницы коэффициента распределения K_d , его значений. Том 3. Анализ геохимии и доступных значений K_d для америция, мышьяка, кюрия, йода, нептуния, радия и технеция. («*Understanding Variation in Partition Coefficient, K_d , Values. Volume III: Review of Geochemistry and Available K_d Values for Americium, Arsenic, Curium, Iodine, Neptunium, Radium, and Technetium*»). Office of Air and Radiation, июль 2004 г. (EPA402-R-04-002C), стр. 5.67.

Принципы защиты ядерных отходов в реакторах

Институт по вопросам энергетики и окружающей среды совместно с рядом других национальных и общественных групп одобрил свод основных принципов обращения с отработанным ядерным топливом на ближайшую перспективу. Работу над этим документом координировала Мишель Бойд (Michele Boyd) из организации «Гражданин» (Public Citizen) в сотрудничестве со многими группами и частными лицами. Для того чтобы подписать под ним свою организацию, орган местного управления или власти штата, обращайтесь к ней по электронной почте mboyd@citizen.org. Полный список подписавшихся доступен на сайте: www.citizen.org/documents/PrinciplesSafeguardingIrradiatedFuel.pdf

Указанные ниже принципы отражают крайнюю необходимость в защите общества от опасностей, которые представляет уязвимое на сегодняшний день хранение коммерческого облученного ядерного топлива. У США нет решения на ближайшую перспективу по вопросу постоянного хранения высокоактивных ядерных отходов. Предложенный ядерный комплекс «Юкка Маунтин» (Yucca Mountain site) небезопасен для геологического хранения ядерных отходов, а программа хранения увязла в научных ошибках, плохом управлении и очередной доработке проекта. Даже в случае выдачи лицензии, Юкка Маунтин не сможет законно хранить все ядерные отходы, которые образуют действующие сегодня реакторы. По необычайно оптимистичному сценарию министерства энергетики США планируется, что отходы не будут поступать в Юкка Маунтин как минимум до 2017 года, а перемещение отходов до хранилища может занять более 30 лет. А между тем, облученное ядерное топливо на реакторных заводах остается уязвимым как для чрезвычайных ситуаций, так и для террористических атак.

Поддержка подписавшихся под документом организаций, которые выступают за улучшение защиты радиоактивных отходов, хранящихся на приреакторных территориях, является вопросом безопасности. Из этого никоим образом не следует, что мы выступаем в поддержку атомной энергии или большего генерирования ядерных отходов.

- ◆ **Необходимы открытые, низкой плотности заполнения бассейны выдержки отработанного ядерного топлива.** Открытые бассейны с низкой плотностью заполнения для выдержки отработанного ядерного топлива первоначально были разработаны для временного хранения ограниченных объемов облученных тепловыделяющих сборок ядерных реакторов. Поскольку объемы генерированных отходов увеличились, превысив проектную емкость бассейнов, они (бассейны) переделываются таким образом, что концентрация топлива в них практически аналогична его количеству в активных зонах реакторов. Так что если в результате террористической атаки или аварийной ситуации вода вытечет из плотно заполненного бассейна, то охлаждение потоком атмосферного воздуха может быть недостаточным для предотвращения пожара, который способен привести к большой утечке радиации в окружающую среду. Открытая конструкция бассейна выдержки низкой плотности заполнения способна обеспечить достаточно хорошую циркуляцию воздуха, которая предотвратит возгорание топлива. Для того чтобы достигнуть и сохранить эти условия в бассейнах, облученное ядерное топливо должно быть перемещено из бассейнов в так называемое «сухое» хранилище в течение пяти лет с момента его выгрузки из реактора.
- ◆ **Создать укрепленное приреакторное хранилище (HOSS).** Облученное ядерное топливо должно храниться в максимально безопасных условиях и максимально близко от места его образования. Отходы, перемещенные из бассейнов выдержки, необходимо охранять в укрепленных приреакторных хранилищах (HOSS). Транспортировка ядерных отходов из приреакторного на промежуточное хранение в другом месте необходима только в том случае, если реакторная территория не

подходит для HOSS-хранилища, а также, если перемещение отходов повышает их надежность и безопасность. HOSS-хранилища не должны рассматриваться как вариант для постоянного хранения отходов, и поэтому их не следует сооружать глубоко под землей. Эти отходы должны быть доступны для извлечения, а дозиметрический контроль и мониторинг уровня тепла в HOSS-хранилищах необходимо проводить в режиме реального времени для обнаружения на ранней стадии радиоактивной утечки и перегрева. Основная цель такого хранилища должна заключаться в том, чтобы объемы таких утечек, предполагаемые даже при серьезных террористических атаках, были достаточно низкими, и чтобы при этом сама система хранения ядерных отходов была непривлекательной в качестве цели для террористов. Критерии конструкции, которые бы отвечали основной цели, таковы:

- противостояние таким серьезным террористическим угрозам, как прямое попадание высокоэффективным взрывчатым веществом или глубоко проникающим оружием и другими боеприпасами, либо прямое попадание большого самолета, загруженного топливом, либо небольшого - с горючим и / или взрывчатыми веществами, в результате чего можно было бы обойтись без больших утечек радиации.
 - Размещение отдельных металлических контейнеров, обнаружить которые из-за пределов приреакторной территории будет крайне сложно.
- ◆ **Защита бассейнов выдержки ОЯТ.** Облученное ядерное топливо необходимо несколько лет хранить в бассейнах выдержки до того момента, как его направят на «сухое» хранение. Бассейны необходимо охранять так, чтобы они могли выдержать воздушную, наземную или водную атаку вооруженных сил противника, как минимум, аналогичных по своему масштабу и хорошо координированным действиям террористическим атакам 9 сентября 2001 года. План усовершенствования системы безопасности должен утверждать состав независимых экспертов, не имеющих отношения к ядерной индустрии и Комиссии США по ядерному регулированию.
 - ◆ **Необходима периодическая проверка HOSS-хранилищ и бассейнов выдержки ОЯТ.** Необходим ежегодный отчет, включающий проверку каждого HOSS-хранилища и бассейна выдержки, подготовка которого велась бы при непосредственном влиятельном участии на каждом хранилище государственных заинтересованных сторон, инспекторов, а также руководителей общественных организаций. Этот отчет должен быть доступен для общества и может включать рекомендации по принятию необходимых мер.
 - ◆ **Выделить денежные средства местным властям и властям штата на проведение независимого мониторинга хранилищ.** Финансирование мониторинга HOSS-хранилищ на каждом заводе должны получать местные власти и власти штата, в чьей компетенции они находятся. Местное общество должно иметь право полного участия в данном вопросе.
 - ◆ **Запретить переработку.** Ни в одной стране мира процесс переработки облученного ядерного топлива пока не решил проблему ядерных отходов, и на деле лишь усугубляет ее, создавая много дополнительных отходов, которые необходимо контролировать. Помимо своей дороговизны и загрязняющей функции, процесс переработки также повышает опасность ядерного распространения.

Атомная головоломка

Расчет выбросов CO₂ от электростанции, работающей на угле

Гамма, собака доктора Эггхэда, недавно вернулась после долгой разлуки, ведь она обучалась в школе собаководства. В школе Гамма много слышала о проблеме глобального потепления, и очень ею обеспокоена. Гамме нужна ваша помощь для того, чтобы выяснить, сколько углекислого газа, основного виновника глобального потепления, выделяют атомные электростанции по сравнению с электростанциями на ископаемом топливе.

Разгадав несколько атомных головоломок, вы с Гаммой решите этот вопрос. В этом тесте вы попробуете рассчитать выбросы углекислого газа (CO₂) от электростанции, работающей на пылевидном угле. В следующей головоломке вы вычислите выбросы CO₂ от электростанции, работающей на природном газе. После этого вы наконец сможете подсчитать выбросы CO₂ от АЭС, а именно от обогащения уранового топлива, который используется в этой электростанции. *(Ну и ну! Это глобальное потепление заставит вспотеть!)*

В данной задаче мы вычислим CO₂, который напрямую выделяет электростанция, работающая на угле, то есть, будем рассчитывать объем CO₂, выделяемый в результате сжигания угля. Существуют дополнительные косвенные выбросы, связанные с добычей и транспортировкой этого вида топлива, а также с возведением электростанции. Что касается ископаемого топлива, основную роль здесь играют прямые выбросы CO₂.

- (1) Полное сгорание одной метрической тонны угля выделяет 22,88 миллиона британских тепловых единиц (ммБте) энергии. Одна Бте равна 1055 джоулей. Сколько энергии в джоулях выделится при полном сжигании одного килограмма угля? (Подсказка: одна метрическая тонна равна 1000 килограмм).
- (2) Ватт определяется одним джоулем в секунду. Сколько джоулей в одном киловатт-часе? (Подсказка: в одном киловатте - 1000 ватт).
- (3) Сколько киловатт-час (тепловых) будет выделено при полном сжигании одного килограмма угля? (Подсказка: используйте ответы к вопросам 1 и 2).
- (4) Производительность одной современной электростанции на пылевидном угле обычно составляет 34%. То есть, 34% энергии, выделенной при сжигании угля, в итоге преобразуется в электричество, при этом остальные 66% тратятся на отопление и другие виды потери энергии. Сколько килограмм угля потребуется сжечь в такой электростанции для получения одного киловатт-часа электричества? (Подсказка: для электростанции с такой производительностью, сколько киловатт-час тепловой энергии потребуется выделить за счет сжигания угля для того, чтобы генерировать один киловатт-час электричества?)
- (5) В Соединенных штатах уголь в среднем на 61% состоит из углерода (по массе). Сколько килограмм углерода выделит такая электростанция при производстве одного киловатт-часа электричества?
- (6) При сжигании угля дополнительная масса кислорода означает, что каждый килограмм выделяемого углерода равен 3,67 килограмма углекислого газа (CO₂). Сколько грамм CO₂ выбрасывает электростанция на угле за один киловатт-час генерирования электричества?

ОТВЕТЫ К АТОМНОЙ ГОЛОВОЛОМКЕ
Журнал SDA, выпуск 14, № 3, «Энергетика и безопасность», № 37

Расчет выбросов CO₂ от электростанции, работающей на угле

(1) 22 880 000 (миллиона) Бте на одну метрическую тонну x 1055 джоулей на 1 Бте = 24 140 000 джоулей на 1 килограмм = $2,414 \times 10^7$ джоулей на килограмм.

(2) 1 киловатт-час = 1000 джоулей в секунду на 1 киловатт x 3600 секунд в час = 3 600 000 джоулей в киловатт-часе = $3,6 \times 10^6$ джоулей в одном киловатт-часе.

(3) $2,414 \times 10^7$ джоулей тепловой энергии на килограмм / $3,6 \times 10^6$ джоулей в киловатт-час = 6,704 (тепловых) киловатт-часа на один килограмм.

(4) 6,70 (тепловых) киловатт-часа x 0,34 = 2,28 (электрических) киловатт-часа на 1 килограмм угля → $1 / 2,28 = 0,439$ килограмма угля на один киловатт-час электричества.

(5) 0,439 килограмма угля на один киловатт-час электроэнергии x 0,61 килограмма углерода на килограмм угля = 0,268 килограмма угля за один киловатт-час электроэнергии.

(6) 0,268 килограмма угля на один киловатт-час электроэнергии x 3,67 килограмма CO₂ на один килограмм угля = 0,982 килограмма CO₂ за один киловатт-час электричества.

Доктор Эггхэд

Актиниды:

- а) также известны, как «Акт Иниды», во времена римлян особый круг поверенных лиц, которые 15-го числа каждого месяца должны были разыгрывать перед императором одну театральную сценку;
- б) дети, которые часто выходят из себя, иными словами, выкидывают номера;
- в) элементы с атомными числами от 89 до 103, т.е. уран, торий и плутоний, нептуний, америций и т.д.

Радиоактивный распад

- а) также известен, как «Активный распад по радио», активное использование ненормативной лексики некоторыми ди-джеями;
- б) старение мировых светил – физиков-ядерщиков;
- в) спонтанная трансформация нестабильного атома в один или более различных нуклидов, сопровождаемая выделением энергии и / или частиц из атомного ядра, ядерным поглощением, а также выбросом внешних электронов и ядерным делением. Нестабильные атомы распадаются и превращаются в более стабильное состояние, в конечном счете, достигая формы, которая более не распадается или имеет очень длительный период полураспада.*

Продукты распада

- а) в средневековье - остатки с барского стола, которые господин отдавал своему холопу;
- б) вещества, которые находятся на дне компостной кучи;
- в) ряд радионуклидов, образованных при ядерной трансформации другого радионуклида, который, в данном случае, является материнским радионуклидом.*

Цепочка распада

- а) ожерелье, сделанное из перезревших ягод;
- б) оковы, сделанные из биологически разлагающихся материалов, которые использовались давным-давно в тюрьмах. После распада цепей преступник освобождался. Время начала распада совпадало с окончанием тюремного срока.
- в) последовательная связь распада, при которой родительский радионуклид распадается на один или более радиоактивных дочерних частиц, которые в свою очередь распадаются и формируют третье, четвертое или еще больше поколений радиоактивных дочерних частиц. Окончательный продукт распада в этой последовательности будет стабильным элементом либо элементом с крайне длительным периодом полураспада.*

Выпадение осадка

- а) интенсивное потоотделение;
- б) осадок, выпадающий из цепочки распада;
- в) производство нерастворимого твердого тела из раствора в процессе химической реакции.

Стержни-мишени

- а) В мире животных - самцы **ПОД ЦЕНЗУРОЙ**.
- б) спортивные автомобили с форсированными двигателями, в которые часто врезаются другие машины;
- в) специальные стержни для бомбардировки нейтронами. Например, уран-238 преобразуют в плутоний для производства ядерного оружия. Стержни-мишени урана-238 использовались для этой цели в некоторых военно-промышленных реакторах, например, в ядерном комплексе Саванна-Ривер-Сайт, штат Южная Каролина.

Ответы: в, в, в, в, в, в.

* Источник трех определений: Аргонская национальная лаборатория (Argonne National Laboratory), «MARSSIM» словарь / акронимы, сайт: <http://web.ead.anl.gov/marssim/acrogloss/>

Статьи на темы радиоактивной очистки в предыдущих SDA номерах:

Очистка грунта в Лос-Аламосской национальной лаборатории

Выпуск 14, № 1 (апрель 2006)

www.ieer.org/sdfiles/14-1.pdf

Риск для здоровья от урана

Выпуск 13, № 2 (июнь 2005)

www.ieer.org/sdfiles/13-2.pdf

Ядерная свалка на реке. Угрозы реке Саванна от радиоактивного загрязнения ее берегов

Выпуск 12, № 2 (март 2004)

<http://www.ieer.org/sdfiles/12-2.pdf>

Установление очистительных стандартов для защиты будущих поколений.

Фермерский сценарий и очистка грунта в Роки Флэтс

Выпуск 10, № 3 (май 2002)

www.ieer.org/sdfiles/10-3.pdf

Яд в Vadose Zone. Угрозы равнинным водам реки Снэйк от миграции радиоактивных отходов

Выпуск 10, № 1 (ноябрь 2001)

www.ieer.org/sdfiles/vol_10/10-1/

Очистка после ужасов Холодной войны

Выпуск 7, № 2 (январь 1999)

www.ieer.org/sdfiles/vol_7/7-2/

Радиоактивность у соседей завода «Ферналд»

Выпуск 5, № 3 (октябрь 1996)

www.ieer.org/sdfiles/vol_5/v5n3_1.html