

**Затраты и риски от обедненного урана
на новом обогатительном заводе /
Риск для здоровья от урана**

Энергетика и Безопасность № 32

-
- [Затраты и риски от обедненного урана на новом обогатительном заводе](#)
Арджун Макхиджани и Брайс Смит
 - [Новые факторы риска для здоровья от урана](#)
Брайс Смит и Арджун Макхиджани

Затраты и риски от обедненного урана на новом обогатительном заводе

Арджун Макхиджани и Брайс Смит

В настоящее время около 740 000 тонн обедненного урана в нетвердой форме гексафторида хранится на трех заводах Министерства энергетики США - в городах Падьюка, штат Кентукки, Портсмут, штат Огайо и Ок-Ридж, штат Теннесси. Обедненный уран - это побочный продукт процесса обогащения урана, который за последние 60 лет осуществлялся на перечисленных объектах. Портсмутский завод находится в резерве, а Ок-Риджский окончательно закрыт. Сегодня завод в городе Падьюка остается единственным действующим предприятием по обогащению урана в США. Им руководит Американская корпорация по обогащению урана (USEC), завод является ее дочерней компанией.

Корпоративный консорциум LES, которым управляет европейская компания "Ugenco", собирается построить новый обогатительный завод. Предполагаемый объект, который в случае строительства будет расположен в округе Ли, штат Нью-Мексико, планирует обогащать уран для снабжения топливом американские АЭС. USEC пытается построить подобный завод в штате Огайо.

Заявка LES на разрешение строительства, направленная в Комиссию США по ядерному регулированию, - это четвертая попытка компании построить обогатительный завод в США. Первая попытка получить разрешение на строительство подобного объекта в штате Луизиана обошлась LES более чем в 30 миллионов долларов. Однако консорциум отозвал заявку по экологическим соображениям после того, как группе граждан удалось опровергнуть заключение Комиссии по ядерному регулированию о воздействии этого проекта ("Claiborne Enrichment Center") на окружающую среду. Были исследованы две другие территории под строительство, обе расположенные в штате Теннесси. Однако от них отказались благодаря протестам местного населения. Утилизация обедненного урана, который будет вырабатываться в процессе обогащения, остается основной проблемой для всего общества.

Эта статья основана на отчете IEER, оценивающем проблемы, связанные с контролем и утилизацией обедненного урана, который мог бы быть произведен на заводе компании LES. Отчет подготовлен для организаций, действующих в интересах общества - это "Информационная служба по ядерным вопросам и ресурсам" (NIRS) и "Гражданин" (Public Citizen), с последующим использованием этой информации в суде по рассмотрению дела о заявке компании LES на строительство. Отредактированный вариант отчета, куда не входит частная информация LES о ее финансовых данных, был опубликован в феврале 2005 года. Ссылки по данной статье опубликованы в отчете IEER

под названием [Затраты и риски, связанные с обращением и утилизацией обедненного урана от национального обогатительного завода, который корпорация LES планирует построить в округе Ли, штат Нью-Мексико](#)¹. В настоящей статье также обсуждаются постановление Комиссии по ядерному регулированию, которое вышло в ответ на отчет IEER, а также правовые вопросы, поднятые NIRS и "Public Citizen".

Обогащение урана

Обогащение - это процесс повышение в уране доли изотопа урана-235. Из природного урана, который поступает в обогатительную установку, получают два потока. Один из них называется обогащенным потоком, который применяют (после дальнейшей химической и физической обработки) в качестве топлива, а второй состоит из так называемого обедненного урана, поскольку обеднен ураном-235.

Существуют различные процессы обогащения урана. Для промышленных процессов уран необходимо предварительно преобразовать в химическую форму, которая называется гексафторид урана (UF_6). При нагревании до умеренной температуры UF_6 превращается в газ. Газ UF_6 , проходя через диффузионную преграду или центрифугу соответствующей конструкции, производит два потока - один с обогащенным, другой с обедненным ураном. Они и являются окончательной продукцией обогатительного завода².

Обедненный уран: ресурс или отходы?

Поскольку запасы ОУ продолжали увеличиваться, более серьезно встал вопрос об обращении с ним и о его утилизации. Министерство энергетики США так и не приняло окончательной стратегии по утилизации урана и не проанализировало ситуацию со своими запасами обедненного урана, упомянутыми выше. На самом деле, в мире нет ни одного действующего объекта по утилизации большого количества ОУ. Министерство энергетики США продолжает рассматривать возможные варианты использования своего ОУ, однако такая вероятность невысока.

До этого года федеральные регулирующие органы классифицировали обедненный уран как "сырье" (подобно урановой руде, которая встречается в природе), а не как ядерные отходы³. В январе 2005 года Комиссия по ядерному регулированию пересмотрела вопрос о том, к какой категории отходов следует отнести ОУ, полученный урановым обогатительным заводом, если его понадобится утилизировать. 18 января она установила, что ОУ, предназначенный для утилизации, следует считать низкоактивными отходами⁴. Постановление Комиссии вышло в ответ на отчет IEER, который лег в основу данной статьи.

Формально постановление NRC изменило статус ОУ, однако оставило некоторую неясность в отношении способов его утилизации. Сотрудники Комиссии считают ОУ, предназначенный для утилизации, низкоактивными отходами класса "А", поскольку он не подпадает под формулировку положений, характеризующих отходы классов "В", "С" или выше класса "С". (См. [врезку](#), касающуюся определений различных типов низкоактивных отходов.) Однако сама Комиссия представила более широкую трактовку: поскольку ОУ не

относится к высокорadioактивным, трансурановым отходам, отработанному ядерному топливу или побочным веществам, его следует занести в общую категорию "низкоактивных отходов". Однако Комиссия не указала, каким образом он подпадает под конкретную классификацию этого положения.

С точки зрения радиологических свойств обедненный уран нельзя отнести к низкоактивным отходам класса А или природной урановой руде. ОУ больше всего подходит к отходам выше класса С или трансурановым. Федеральные положения определяют трансурановые отходы в качестве таковых, когда их удельная радиоактивность превышает 100 нКи/г долгоживущих трансурановых радионуклидов, которые выделяют альфа-излучение (например, плутоний). ОУ также обладает удельной радиоактивностью, которая примерно равна 300-400 нКи/г, если учесть радиоактивность всех трех изотопов урана.

Трансурановые отходы подходят к категории отходов выше класса С по обращению с долгоживущими альфа-излучателями⁵. Важным элементом этой классификации при обсуждении данного вопроса является норма, составляющая 100 нКи/г трансурановых элементов. На сегодняшний день трансурановые отходы с заводов Министерства энергетики США помещаются в глубокое геологическое хранилище в штате Нью-Мексико, которое называется Экспериментальный завод по изоляции отходов (Waste Isolation Pilot Plant), это федеральный проект на сумму в несколько миллиардов долларов.

Сходство ОУ с трансурановыми отходами было отмечено в отчете Национального научно-исследовательского совета США, как по радиологическим характеристикам, так и по трудностям при захоронении:

"В случае необходимого захоронения (оксида обедненного урана) сделать это будет не так просто. Альфа-активность ОУ составляет 200-300 наноКюри на один грамм. В геологические хранилища должны помещаться те трансурановые отходы, чья альфа-активность выше 100 наноКюри на один грамм. Если бы уран являлся трансурановым элементом, то в силу его радиоактивности его нужно было бы утилизировать на Экспериментальном заводе по изоляции отходов. Химическая токсичность этого вещества при его огромном объеме естественно также являлась бы проблемой"⁶.

В Таблице 1 показано, что обедненный уран в своих химических формах, пригодный для утилизации, имеет более высокие степени радиоактивности по сравнению с предельными уровнями трансурановых отходов. Удельная радиоактивность и общее количество ОУ, которое консорциум LES собирался выработать на своем заводе по обогащению урана, одни из самых серьезных факторов влияния на здоровье людей и окружающую среду, то же касается и максимальных затрат.

Таблица 1: Удельная радиоактивность различных химических форм обедненного урана, трансурановых отходов и обычной урановой руды с весом природного урана в 0,2%

Химическая форма	Удельная радиоактивность, нКи/г
------------------	---------------------------------

Урановый металл (DU)	400
Диоксид урана (DUO ₂)	350
Оксид урана (DU ₃ O ₈)	340
Трансурановая активность в трансурановых отходах или отходах выше класса С (см. примечание)	>100
0,2% урановая руда	4 (см. примечание)

Примечание: В удельную активность для 0,2% урановой руды входят все продукты распада урана-238 и все продукты распада радия-226 включительно, если они находятся в вековом равновесии с ураном-238. Радон-222 и его продукты распада не входят в это число. Все значения в таблице округлены. Существуют незначительные различия в определении типов трансурановых отходов, используемом Управлением по защите окружающей среды, и отходов выше класса С, используемом Комиссией по ядерному регулированию. Дело в том, что обедненный уран относят к трансурановым радионуклидам, который не является предметом дискуссии в данном случае, поскольку ОУ можно отнести и к тем и к другим.

Изучая проблему длительных воздействий утилизации обедненного урана, также необходимо учитывать побочные урановые "дочерние" продукты. Помимо увеличения количества урана-234, которое присутствует в ОУ, необходимо учесть два других серьезных "дочерних" продукта урана-238 - это торий-230 и радий-226. Побочные дополнительные долгоживущие альфаизлучающие радионуклиды прибавляют оснований считать ОУ трансурановыми отходами.

На самом деле риски смертности от ОУ на один беккерель поглощения, включая продукты распада, примерно в четыре раза опаснее рисков от плутония-239, как показано в Таблице 2. В таблице показано, что при увеличении удельной радиоактивности DU₃O₈ до 100 нанокюри на один грамм порога трансурановых отходов опасность каждого изотопа в обедненном уране (уран-238, уран-234, торий-230 и радий-226) превышает угрозу от плутония-239. ОУ и его первичные продукты распада в совокупности примерно на порядок опаснее трансурановых отходов, составляющих 100 нанокюри на один грамм плутония-239 (по уровню смертности от рака на единицу массы поглощенного вещества).

Таблица 2: Сравнение показателей смертности на один беккерель (Бк) и один грамм оксида обедненного урана при вековом равновесии при 100 нКи плутония-239 (т.е. количество, которое содержится в трансурановых отходах при 100 нанокюри на один грамм)

Радионуклид	Смертность на Бк при поглощении с питьевой водой	Смертность на Бк при поглощении с приемом пищи	Кэф. смертности на Бк по сравнению с Pu - питьевая вода	Кэф. смертности на Бк по сравнению с Pu - пища	Кэф. смертности, 1 грамм ОУ по сравнению с 1 граммом трансурановых отходов с Pu-239 при 100 нКи/г - питьевая вода	Кэф. смертности, 1 грамм ОУ по сравнению с 1 граммом трансурановых отходов с Pu-239 при 100 нКи/г - пища
Уран-238	1,13E-09	1,51E-09	0,40	0,42	1,34	1,41
Уран-234	1,24E-09	1,66E-09	0,44	0,46	1,48	1,55
Торий-230	1,67E-09	2,16E-09	0,59	0,60	1,99	2,05
Радий-226	7,17E-09	9,56E-09	2,52	2,63	8,53	8,93

Обедненный уран - общий коэф. смертности при вековом равновесии			3,93	4,11	13,34	13,94
Плутоний-239	2,85E-09	3,63E-09				

Примечание: "E-09" - это вариант написания " $\times 10^{-9}$ ". Источником информации о коэффициентах смертности при потреблении доз с питьевой водой и пищей является Отчет № 13 по федеральным нормативам Управления охраны окружающей среды. Две крайние правые колонки показывают уровень смертности для урановых и дочерних продуктов распада в сравнении с плутонием-239 после увеличения удельной радиоактивности массы DU_3O_8 по отношению к удельной радиоактивности трансурановых элементов при пороговой норме трансурановых отходов.

Уран и продукты его распада (за возможным исключением тория-230) в целом обладают либо аналогичным, либо более мощным влиянием на окружающую среду, чем плутоний.

Поэтому со стороны регулирования, а также с научной точки зрения, риски, которые могут возникнуть при утилизации ОУ, нельзя рассматривать ниже рисков при утилизации трансурановых отходов. Отнесение ОУ к категории низкоактивных отходов или отходов класса А не умаляет его опасность. Постановление Комиссии, касающееся утилизации отходов ОУ по классу низкоактивных, нельзя интерпретировать таким образом, что ОУ подходит для такого же поверхностного захоронения согласно пункту 10 CFR глава 60.55 (а), как и некоторые низкоактивные отходы.

Постановление Комиссии не является объективным, как и позиция его сотрудников относительно того, что утилизацию ОУ следует отнести к отходам класса А. Утилизация отходов класса А, которые, как правило, менее радиоактивны или содержат короткоживущие изотопы по сравнению с отходами других классов, регламентируются менее жестко, нежели низкоактивные отходы других классов. Законодательно закреплено, что расчетная доза воздействия на людей при утилизации низкоактивных отходов не должна превышать 25 миллбэр в год (млбэр/год)⁷.

Для трансурановых отходов или долгоживущих отходов выше класса С поверхностное захоронение не подходит. Подобные отходы требуют глубокого геологического захоронения. В случае с центром по обогащению "Claiborne Enrichment Center" сотрудники Комиссии сделали заключение, что обедненный уран в форме порошка U_3O_8 относится к низкоактивным отходам класса А. Однако собственный анализ, проведенный сотрудниками NRC и описанный в Заключительном отчете о воздействии на окружающую среду (СЕС FEIS) показал, что поверхностное захоронение приведет к более высоким дозам воздействия, нежели 25 млбэр/год, которые являются предельной нормой воздействия ядерного топливного цикла на людей.

Вопрос классификации отходов усложняется возможностью того, что признанная химическая токсичность урана и последние исследования, поднявшие другие проблемы влияния ОУ на организм (эти эффекты описаны ниже, а также более подробно в сопроводительной [статье](#)), позволят считать обедненный уран смешанными отходами, на

которые частично будут распространяться положения Закона о консервации и восстановлении ресурсов (Resource Conservation and Recovery Act) .

Дозы воздействия утилизированного ОУ

Корпорация LES описала два варианта деконверсии⁸ и утилизации хвостов DUF₆, которые мог бы вырабатывать обогатительный завод:

1. использование заводов Министерства энергетики США после деконверсии государственных запасов DUF₆,⁹ и
2. возведение частного завода по деконверсии исключительно для переработки объемов DUF₆, которые планировались производить на новом обогатительном заводе компании LES.

IEER пришел к выводу, что ни один из этих вариантов, предложенных Комиссией по ядерному регулированию в Проекте отчета о воздействии на окружающую среду (DEIS) в отношении завода компании LES¹⁰ нельзя считать подходящим способом размещения хвостов обедненного урана, которые станут результатом работы обогатительного завода. Учитывая плохую репутацию Министерства энергетики США и его пренебрежение своими обязательствами, особенно в случае с Юкка Маунтин¹¹, а также большие объемы собственных запасов ОУ, которыми необходимо распорядиться, несостоятельность варианта с Министерством энергетики настолько велика, что его нельзя считать надежным способом утилизации, даже имея письменные заверения министерства об обязательном приеме ОУ от консорциума LES.

С другой стороны, если LES воспользуется частным заводом по деконверсии, компания будет сама нести ответственность за утилизацию ОУ. В этом случае LES может выполнить поверхностное захоронение на специальном объекте в штате Юта ("Envirocare") или на объекте в штате Техас ("Waste Control Specialists"), граничащим с предполагаемым для строительства заводом в Нью-Мексико. Однако в проекте отчета DEIS Комиссия не упомянула об исследовании объектов по поверхностному захоронению.

NRC предлагает глубокое захоронение

Проект отчета о воздействии на окружающую среду предлагает, чтобы ОУ, произведенный предполагаемым заводом компании LES, был захоронен в выработанной шахте. В Проекте отчета оцениваются рассчитанные дозы воздействия на людей (т.е. какое количество урана может сосредоточиться в организме человека, живущего рядом с подобной шахтой и потребляющего грунтовую воду), а также утверждается, что эти дозы значительно ниже предельных установленных законом норм, которые составляют 25 мЛбэр/год. Комиссия утверждает, что эти оценки основаны на вычислениях, указанных в заключительном отчете СЕС FEIS от 1994 года. Несмотря на свои заверения, NRC отказалась поделиться с IEER методами и допущениями, по которым произведен расчет доз. Подробные методики расчета СЕС FEIS также недоступны, даже для самой Комиссии.

Эта информация крайне важна, поскольку дозы от урана-238, рассчитанные в проектном отчете СЕС FEIS для глубокого захоронения (в шахте), невероятно низкие. Например, доза урана в питьевой воде при захоронении десятков тысяч метрических тонн чистого порошка DU_3O_8 в шахте, по оценкам Комиссии в случае с СЕС, будет от миллиона до триллиона раз ниже обычных фоновых норм, возникающих от небольшого количества урана, который естественным образом присутствует в воде.

Расчеты IEER показывают, что дозовые оценки Комиссии неверны, вероятно, на много порядков. Однако проиллюстрировать во всей полноте неточность ее расчетов не представляется возможным, поскольку Комиссия отказалась предоставить информацию о способах и деталях ее расчетов в отношении предполагаемого строительства завода LES.

IEER предлагает глубокое захоронение

Из-за очевидного нежелания Комиссии делиться своими расчетами, IEER произвел свои несложные вычисления потенциальных доз, которые может получить человек, предположительно живущий над шахтой, где был захоронен ОУ. Мы предположили, что вода проникает в шахту и достигает равновесия с порошком обедненного урана (т.е. мы предположили, что прошло достаточно много времени, в течение которого произошли все важные химические реакции). Эта калькуляция повторилась с участием и без участия углекислого газа (т.е. воздуха) в шахте. Мы предположили, что вся питьевая вода берется из колодца, который был пробурен в шахте.

Доза в питьевой воде при присутствии только одного урана-238 была рассчитана в таких условиях в диапазоне десятков миллбэр в год. Сегодняшняя норма по питьевой воде для всех радионуклидов составляет 4 млбэр/год. Доза других урановых изотопов и прочих продуктов распада увеличит общую потенциальную дозу. Мы также обнаружили, что количество урана-238 в воде из шахты будет приблизительно от 6 до более чем 20 раз выше нынешней предельной нормы по питьевой воде, которая установлена Управлением охраны окружающей среды и которая составляет 30 микрограмм общей урановой дозы на один литр (мг/л).

Для сравнения мы подсчитали, что даже если одна миллионная часть урана, растворенного в воде, заполняющей шахту объемом $20\,000\text{ м}^3$, достигнет питьевой воды¹², то для сокращения дозы урана-238 до норм, определенных с помощью расчетов Комиссии в заключительном отчете о воздействии на окружающую среду при захоронении в песчаной/базальтовой шахте, потребуется раствор, который превысит объем воды всех Великих озер вместе взятых¹³.

Наш анализ показывает, что вполне разумно считать вариант Комиссии с колодезной водой в случае с СЕС (и в случае с LES) невероятным с научной точки зрения и неправильным в одном или нескольких аспектах. Окончательное решение по этому вопросу не может быть принято до тех пор, пока Комиссия по ядерному регулированию не предоставит все подробности своих расчетов, в том числе, какие модели использовались, каким образом они просчитывались, а также все возможные варианты, которые были просчитаны с учетом места, параметры модели и возможное урановое

воздействие. Комиссия пока не сумела обосновать свои заявления о том, что дозы облучения при утилизации обедненного урана в заброшенной шахте будут в пределах норм, предусмотренных законом. Исследование без точных данных недопустимо вообще, а тем более в отчете о воздействии на окружающую среду, который подготовлен государственным учреждением, отвечающим за здоровье и безопасность людей.

Наши обзорные вычисления показывают, что общие расчеты не являются убедительным основанием для предположения о том, что захоронение в какой-либо шахте будет проведено в соответствии с нормами доз воздействия или другими нормами здравоохранения. Необходимо проводить подробную оценку конкретных участков, рассматриваемых для утилизации обедненного урана.

IEER предлагает поверхностное захоронение

Помимо выводов о глубоком захоронении, IEER также протестировал ряд вариантов, используя программу "ResRad" для расчета доз с различными допущениями о поверхностном захоронении ОУ в засушливом климате¹⁴. Программа моделирования "ResRad", созданная в Национальной лаборатории Аргон (Argonne National Laboratory), была принята Комиссией для произведения расчетов доз в поддержку выведения АЭС из эксплуатации. В этих тестированиях мы допустили возможность ошибки программы "ResRad", которая рассматривает "среднестатистического человека" (взрослого белого мужчину весом 154 фунта) при оценке радиоактивного воздействия. Это допущение не берет в расчет того, что дети более чувствительны и к химическим и к радиологическим воздействиям урана. Однако, как мы продемонстрируем ниже, поверхностное захоронение урана вряд ли будет соответствовать положениям о здоровье и безопасности, даже в отношении среднестатистического человека.

Результаты этих основных расчетов обследования показаны в Таблице 3. Все результаты намеренно на несколько порядков выше установленной законом предельной нормы в 25 мрэм/год (или 0,025 рэм/год). Они показывают, что поверхностное захоронение также не подходит для утилизации обедненного урана.

Таблица 3. Результаты расчетов доз (IEER) для поверхностного захоронения порошка DU_3O_8

Дозы представлены в бэрах в год в сравнении с миллибэрами в год

Доза U-238	Доза U-235	Доза U-234	Общая предельная доза (бэр в год)	Норма, установленная законом (бэр в год)	Время при предельной дозе (лет после захоронения)
От 32 до 658	От 14 до 47	От 81 до 200	От 141 до 795	0,025	От 9 807 до 17 412

Примечание: Представлены диапазоны расчетных доз, поскольку расчеты производились для различных вариантов захоронения, в основе каждого лежит особое сочетание величин изменчивости загрязняющих веществ, присутствующая влага и степень эрозии. Все способы разработаны с учетом засушливого климата. Как показано, ежегодные дозы изотопов урана подразумевают также участие соответствующих им продуктов распада. Все цифры округлены.

Мы не претендуем на предельную точность или полноту своих расчетов. Напротив, это крайне простые вычисления с многочисленными допущениями погрешности и общих особенностей данных. Задача этих расчетов установить: а) являются ли расчеты Комиссии в заключении СЕС FEIS обоснованными и допустимыми с учетом заявлений о том, что они получены таким же способом, что и расчеты по проекту отчета LES DEIS; и б) являются ли общие расчеты достаточным основанием для определения соответствия действующим положениям. Как отмечено выше, ответ на оба вопроса наверняка отрицательный.

К чести NRC стоит сказать, что в своем постановлении от января 2005 года, Комиссия приняла аргумент IEER о том, что ОУ достаточно опасен и способ его захоронения не может быть принят без дальнейшего изучения:

"Более сложный вопрос, на который у нас нет необходимости отвечать сегодня, касается того, соответствует ли вещество корпорации LES в его предполагаемых объемах и концентрации требованиям Части 61 по поверхностному захоронению. Комиссия принимает аргумент сторон о том, что принять точное решение по выбору этого или иных способов захоронения на данный момент не представляется возможным, и вероятно потребуются дальнейший анализ вопросов окружающей среды и безопасности. Под нашим решением не подразумевается личное мнение Комиссии по данному вопросу, вопрос касается обоснованности частного варианта компании LES по предлагаемому захоронению, а также финансовой гарантии. Эти моменты остаются на усмотрение совета директоров".

Формирование факторов риска для здоровья

Несмотря на ограниченные данные, складывающаяся картина факторов риска для здоровья от обедненного урана все же указывает на то, что обращаться с ОУ и утилизировать его следует крайне осторожно. Значительное количество последних исследований по воздействию ОУ на организм, проведенных в Исследовательском институте радиобиологии Вооруженных сил США после войны в Персидском заливе 1991 года, показало, что обедненный уран может быть мутагенным, канцерогенным, тератогенным, цитотоксическим и нейротоксическим. Иными словами, он способен вызывать или способствовать возникновению генных мутаций, опухолей, врожденных дефектов, токсичности на клеточном уровне, а также неврологических повреждений. Уран также может повреждать растущие кости, пересекать плаценту и наносить вред эмбриону/плоду.

Новое исследование показывает, что помимо воздействия урана на скелет, репродуктивные способности и на инициирование и/или развитие рака, его неврологические последствия аналогичны эффектам одного из видов радиоактивного свинца. По многим подобным повреждениям, возникающим в силу взаимодействия присущих урану свойств тяжелых металлов и радиоактивного компонента, угадываются признаки потенциального синергетического эффекта. Более подробную информацию об этих воздействиях можно прочитать в сопроводительной [статье](#).

Новые данные и новое понимание влияния урана на здоровье человека появляются в тех областях, которым прежде уделялось мало внимания. Это исследование вероятно сыграет серьезную роль в формировании будущих оценок риска от ОУ. Можно с полной уверенностью констатировать необходимость введения более жестких требований по утилизации ОУ, особенно если уран будет признан более опасным, нежели считается на сегодняшний день, и особенно если речь идет об охране детского здоровья. В конце концов, несколько раз в течение прошедших десятилетий, нормативы, регламентирующие деятельность ядерной промышленности, были пересмотрены с учетом осознания рисков на тот момент.

В течение нескольких десятилетий обогатительный завод, который собирается построить консорциум LES, планирует получить большое количество ОУ. Но это будет также время быстрого и серьезного роста осознания проблем, связанных с факторами риска от урана как отдельно, так и в сочетании с другими факторами воздействия на окружающую среду. В этом контексте LES и Комиссия, которая перед законом отвечает за здоровье населения, должны разработать стратегию по обращению и по утилизации ОУ, задача которой будет заключаться именно в охране здоровья людей. Они должны скорректировать свои планы и привести их в соответствие в том случае, если радиационные риски в целом и риски от урана в частности будут признаны более высокими, нежели считалось прежде. Им следует обеспечить особые меры безопасности по охране здоровья женщин и детей. Проект отчета Комиссии о воздействиях на окружающую среду имеет серьезный недостаток, поскольку не содержит существующих фактов, указывающих на подобные факторы риска, не говоря уже об их оценке с точки зрения обращения и захоронения ОУ. Включение цены этого вопроса в отчет - это единственная возможность избавить его от недостатков.

Комиссия должна принять во внимание рост факторов риска, которые выявили сегодняшние исследования, потому что они намного разнообразнее факторов риска для здоровья людей, официально рассчитанных на сегодняшний день. В противном случае, в будущем детские организмы будут страдать от плохой наследственности по аналогии с той, которая трагически сказалась на трех поколениях людей, отравленных свинцом. Но на сей раз это будет тяжелый металл, который также является и радиоактивным. LES и NRC должны учесть вероятность вредных воздействий обедненного урана до принятия решения о выработке таких больших объемов обедненного урана. Ведь это решение только прибавит проблем с обращением с отходами ОУ, которые уже произведены.

Затраты на утилизацию ОУ

От выбора стратегии по утилизации во многом зависит выбор процесса деконверсии обедненного урана. Существует как минимум две формы, в которые можно преобразовать DUF_6 - это DUO_2 и DU_3O_8 . Отчасти выбор формы деконверсии зависит от способа утилизации. IEER предлагает использовать керамический мусоросборник, который наиболее эффективен для изоляции веществ атомной шкалы. Именно поэтому мы отдаем свое предпочтение варианту с DUO_2 .

Мы пришли к выводу, что ни один вариант захоронения, предложенный в Проекте отчета о воздействии на окружающую среду, а именно использование заводов Министерства

энергетики США или возведение частного завода по деконверсии, не подходит для утилизации хвостов обедненного урана, которые будут результатом деятельности предполагаемого обогатительного завода. Мы разработали, на наш взгляд, три наиболее приемлемых альтернативных стратегии для деконверсии и захоронения ОУ. Вот эти три варианта:

1. DUF_6 преобразуют в DUO_2 , заливают цементом и затем утилизируют в шахту, которая наполовину меньше той, что предусмотрена для захоронения запасов обедненного урана Министерством энергетики США. Полученная фтористоводородная кислота будет нейтрализована в соединение фтористого кальция (CaF_2), которое затем будет утилизировано в специальной зоне как низкоактивные отходы.
2. DUF_6 преобразуют в DUO_2 , помещают в керамический мусоросборник, а затем закладывают в глубокий геологический могильник, аналогичный Экспериментальному заводу по изоляции отходов (Waste Isolation Pilot Plant, WIPP) в штате Нью-Мексико. Как и при варианте 1, полученная фтористоводородная кислота будет нейтрализована в соединение CaF_2 , которое затем будет утилизировано в специальной зоне как низкоактивные отходы. Этот способ также включает непредвиденные расходы в качестве дополнительных затрат, которые необходимо иметь в виду с учетом возникновения потенциальных рисков от обедненного урана, которые выявляют последние исследования.
3. Вариация способа 2, с различным учетом затрат на хранение и захоронение CaF_2 , а также затрат на разработку зоны глубокого геологического захоронения.

Мы рассчитали затраты на деконверсию и захоронение ОУ по трем приведенным вариантам. Допущения и оценка стоимости представлены в Таблице 4. Во всех трех случаях 25% приходится на непредвиденные обстоятельства. Оценка IEER умеренных затрат на утилизацию ОУ в случае выдачи лицензии представлена в вариантах 2 и 3, когда захоронение ОУ предполагается осуществить тем же способом, что и на заводе WIPP, независимо от присвоенной ему, ОУ, категории. Тот факт, что все три варианта составлены с учетом отнесения ОУ к категории выше класса С, связан лишь с его физическими и радиологическими свойствами, а также факторами риска для здоровья.

Таблица 4. Основные исходные данные IEER для трех вариантов обращения с ОУ и его утилизации

Способ	Варианты деконверсии	Варианты захоронения	Финансовые допущения	Непредвиденные обстоятельства из-за урановых рисков	Комментарии	Стоимость на 1 кг урана (в долл. США)
Способ 1: Цементное захоронение ОУ	UO_2 , цементация	Глубокая шахта	10% риска на деконверсию	Нет	Затраты на деконверсию в UO_2 выше, однако затраты на захоронение ниже и полная стоимость	13,59

					утилизации ниже	
Способ 2: выше класса С, завод WIPP	UO ₂ , керамический мусоросборник	Аналогично варианту WIPP	30% риска на деконверсию	19% на увеличение статьи издержек на деконверсию и захоронение	Низкая стоимость проектированной WIPP, низкие затраты на керамику, урановый риск означает повышенный риск для женщин	23,79
Способ 3: выше класса С, завод WIPP	UO ₂ , керамический мусоросборник	Аналогично варианту WIPP	30% риска на деконверсию	19% на увеличение статьи издержек на деконверсию и захоронение	Средняя оценка стоимости проектированной WIPP, низкие затраты на керамику, урановый риск означает повышенный риск для женщин	30,41

Примечание: Общее количество предполагаемого произведенного объема DUF₆ составляет 197 000 метрических тонн, что эквивалентно примерно 133 000 метрических тонн природного урана. Дополнительные примечания и ссылки для этой таблицы см. на страницах 48 и 51 отчета IEER по компании LES.

Эти расчетные затраты выливаются в сумму около 3-4 миллиардов долларов на надлежащее обращение с отходами ОУ и на их утилизацию, которые должен был бы произвести планируемый урановый обогатительный завод в штате Нью-Мексико. Затраты по каждому из трех способов скорее всего заставят признать предполагаемое строительство завода неэкономичным. Из-за этого также возрастет вероятность невыполнения обязательств завода по деконверсии и утилизации. Такие высокие издержки нельзя покрыть за счет потребителей услуг по обогащению урана. Именно поэтому компании необходимо в обязательном порядке и в первую очередь предоставить свои финансовые гарантии, которые будут входить в условия выдачи лицензии. В своей заявке на получение разрешения на строительство от июля 2004 года, консорциум LES предложил выделить лишь 731 миллион долларов на покрытие расходов по обращению с хвостами ОУ¹⁵.

Лицензия, которая не возлагает обязательства на LES покрыть расходы на утилизацию ОУ, подробно рассмотренную здесь (и это не самая высокая оценка умеренных затрат из возможных расчетов), рискует взвалить огромные обязательства по обращению с ним и его утилизацию на плечи американских налогоплательщиков и будущих поколений. Необходимо получить от владельцев будущего обогатительного завода его финансовые гарантии авансом как минимум в размере 2,5 миллиарда долларов (сегодняшняя цена),

которые соответственно увеличатся со временем. Это должно быть сделано независимо от финансового благополучия или объема продаж завода. Это крайне необходимо для того, чтобы оградить жителей штата Нью-Мексико, налогоплательщиков США и будущие поколения от выполнения обязательств, связанных с ОУ, который собирается производить компания LES на предполагаемом заводе по обогащению урана.

Низкоактивные отходы

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

Таким образом, в категорию "низкоактивных" радиоактивных отходов входит весь малорадиоактивный 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 выше класса С.

Класс А - в среднем это отходы малой 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 обычные мусорные кучи, однако согласно сегодняшней концепции сюда включены более сложные структуры.

Источник: Макхиджани и Салеска, *High-Level Dollars, Low-Level Sense* ("Высокоактивные доллары, низкоактивный разум"), IEER (Нью-Йорк, Апекс Пресс, 1992 г.).

1. Составлению данного отчета препятствовал ряд факторов. Во-первых, Комиссия по ядерному регулированию (NRC) установила для подготовки документа очень короткий срок (один месяц). Во-вторых, материал был подготовлен при отсутствии полного предоставления LES своей фактической информации и переговоров об ожидаемых затратах на деконверсию обедненного урана (ОУ). В-третьих, NRC не представила основных критериев своих расчетов по дозам воздействия при утилизации ОУ. В-четвертых, общественная база данных NRC (называется "Agency-wide Documents Access and Management System", сокращенно "ADAMS") была долгое время недоступна из-за проверки, которую проводила служба безопасности, что помешало нам получить доступ к потенциально важной информации. IEER сохраняет за собой право обновлять и вносить изменения в данный отчет.
2. Подробную информацию о процессе обогащения урана, технологиях и мировом состоянии, см. [ЭБ № 31](#).
3. ОУ можно преобразовать в плутоний-239 с помощью ядерных реакторов. Одно время это считалось основным возможным применением ОУ. Однако на самом деле коммерческое использование плутония очень ограничено и такое применение ОУ является ничтожным по сравнению с тем количеством обедненного урана, которое было произведено за последние шестьдесят лет.
4. Комиссия США по ядерному регулированию - [In the Matter of Louisiana Energy Services, L.P. \("Национальный обогатительный завод"\). Досье № 70-3103-ML. Меморандум и приказ. CLI-05-05](#). Подшито к делу и пущено в производство.
5. пункт 10 глава 55 (а) Свода федеральных постановлений (CFR).
6. Национальный научно-исследовательский совет. Коллегия по управлению радиоактивными отходами (Board on Radioactive Waste Management). Комитет по улучшению научной базы для контроля над ядерными веществами и отработанным ядерным топливом с помощью Научной программы мер по охране окружающей среды (Committee on Improving the Scientific Basis for Managing Nuclear Materials and Spent Nuclear Fuel through the Environmental Management Science Program). [Improving the Scientific Basis for Managing DOE's Excess Nuclear Materials and Spent Nuclear Fuel](#). Вашингтон, округ Колумбия: Нэшнл Акедимик Пресс, 2003 г., стр. 67.
7. п. 10 главы 61 CFR.
8. По соображениям безопасности установлено, что гексафторид обедненного урана (DUF_6) должен в итоге быть "деконвертирован" из своей радиоактивной формы в окончательную форму отходов, либо в диоксид обедненного урана (DUO_2), либо в оксид обедненного урана (DU_3O_8) с целью долговременного контроля или утилизации. Комиссия по ядерному регулированию и Министерство энергетики заявляют, что DUF_6 безопасен для хранения на длительное время.
9. Министерство энергетики США уполномочено принимать ОУ от обогатительных заводов по Закону о приватизации Американской корпорации по обогащению урана (USEC Privatization Act) (42 U.S.C. 2297h-10), с внесенными поправками. В настоящее время Министерство энергетики еще не определило стоимость данной услуги на будущее. Однако прежние версии энергетических законопроектов, рассмотренные палатой представителей и сенатом, регламентировали бы цену, которую может назначить Министерство энергетики на уровне 71-90 центов за один килограмм ОУ. Закон об энергетике от 2005 года, который был недавно принят палатой представителей (H.R. 6, принят 21 апреля 2005 года), снял это предложение. Пока сенат не предложил ни одного варианта энергетического законопроекта на 2005 год.
10. Комиссия США по ядерному регулированию, Управление по сохранности и мерам безопасности ядерных веществ, Отделение по контролю за отходами и защите окружающей среды: [Environmental Impact Statement for the Proposed National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico: Draft Report for Comment](#) ("Отчет о воздействии на окружающую среду предполагаемого Национального обогатительного завода в округе Ли, штат Нью-Мексико: Проект отчета для комментариев"). NUREC-1790. Вашингтон, округ Колумбия, сентябрь 2004 г.
11. Даже по приказу суда Министерство энергетики США нарушило свое узаконенное обязательство принимать отработанное ядерное топливо от атомных электростанций, начиная с января 1998 года, и в настоящее время прием отходов намечен не раньше чем на 2012 год.
12. При предположительной плотности в 3 гр/см^3 , масса порошка DU_3O_8 , который предназначен для утилизации в случае с СЕС, одна составила бы примерно $20\,000 \text{ м}^3$. (NRC CEC FEIS 1994 г. А-1, А-7).

13. Для справки: система Великих озер содержит примерно 23 000 км³ воды, которая составляет около 18% от всего мирового запаса пресных поверхностных вод. (Управление по защите окружающей среды, Атлас Великих озер).
14. Для очень большого периода времени, который необходимо принимать в расчет при захоронении обедненного урана, стоит учесть последствия изменения природного и потенциально антропогенного климата при выборе варианта использования земли, а также метеорологических параметров, подходящих для установления доз. Хотя это выходит за рамки настоящего отчета, здесь необходимо привести доводы в пользу варианта с местными сельскими жителями, который является частью общего обзорного анализа.
15. "Луизиана Энерджи Сервисес" (Louisiana Energy Services). [National Enrichment Facility Safety Analysis Report](#) ("Отчет об анализе безопасности Национального обогатительного завода"), исправленное издание 2, (г. Альбукерке, штат Нью-Мексико?), июль 2004 г., стр. 10.3-3.

Новые факторы риска для здоровья от урана

Брайс Смит и Арджун Макхиджани¹

Уран, в том числе обедненный уран (ОУ), как правило, представляет наибольшую опасность для здоровья человека в случае его попадания в организм при заглатывании, вдыхании или через трещины на коже (длительный контакт может также привести к получению большой дозы внешнего облучения). В организме уран представляет угрозу, будучи одновременно токсическим тяжелым металлом и радиоактивным веществом. К тому же существует ряд признаков, которые указывают на возможный синергизм этих двух типов воздействия на организм.

Действующие в США федеральные положения о безопасности питьевой воды ограничивают содержание урана в ней до 30 микрограмм на один литр (мкг/л), главным образом основываясь на его химической токсичности. Для природного урана эта норма составляет 20 пикокюри радиоактивности урана на один литр воды (пКи/л). Что касается обедненного урана, то его концентрация в питьевой воде не может превышать примерно 12 пКи/л урановой активности. Вдыхание урана лимитировано федеральными положениями главным образом из-за риска раковых заболеваний, а потребление питьевой воды ограничено в основном из-за почечной токсичности.

Содержание урана в воде регламентировано из-за его химической токсичности - уран является известным нефротоксическим веществом, то есть токсичным для почек. Почки контролируют состав крови в организме и очищают его от ненужных веществ. Остаются серьезные сомнения в определении уровня чувствительности почек человека к обедненному урану. Исследования на животных показали, что существуют токсичные пороги, которые более чем на

порядок отличаются у более чувствительных кроликов и менее чувствительных крыс.

Наука, изучающая урановое воздействие на организм человека, быстро развивается во многом из-за проблем со здоровьем, вызванных войной в Персидском Заливе 1991 года, а также бомбардировками НАТО в бывшей Югославии в 1999-м, и постепенного их признания, которые стали известны как синдром войны в Персидском Заливе. Далее мы будем рассматривать формирующуюся картину фактов по этому исследованию.

Риски, связанные с ионизирующим излучением

Ионизирующее излучение - это известный канцероген. Его воздействие увеличивает риск возникновения различных видов раковых заболеваний. На сегодняшний день оптимальное осознание последствий малых доз радиации, которое легло в основу регулятивной деятельности в США и Европе, сводится к тому, что любое увеличение радиоактивного облучения способствует повышению роста риска раковых заболеваний. Это называется линейной беспороговой концепцией².

В целом, расчетный риск на единицу воздействия со временем вырос, поскольку появляются новые сведения о взаимодействии радиации и живой ткани. В результате были сокращены максимально допустимые дозы. К примеру, в 1954 году Комиссия по атомной энергии установила предельную дозу излучения на уровне 15 бэр в год³. Это было серьезным снижением в сравнении с нормой 0,1 рентгена в день, принятой в 1942 году в ходе Манхэттенского проекта. В 1959 году допустимая доза для людей была снижена до 0,5 бэра в год, а затем в 1990 году вновь снижена до 0,1 бэра в год⁴.

Нераковые воздействия, описанные далее (за исключением почечной токсичности), продемонстрированы с помощью лабораторных исследований, которые зачастую проводятся при повышенных уровнях радиации. Для людей эти уровни окончательно не установлены в количественном пересчете на факторы риска. К тому же, некоторые описанные здесь эксперименты были проведены с применением урана при непосредственном введении его в организм животных или с обедненным ураном, который был введен в металлической форме под кожу, что абсолютно отличается от возможных воздействий окружающей среды в результате утилизации оксида обедненного урана. К тому же еще не было установлено, есть ли пороги у некоторых нераковых воздействий, в отличие от общепринятой беспороговой концепции риска раковых заболеваний от ионизирующего излучения.

Дополнительным элементом радиологической защиты, который появился со временем, является осознание относительных рисков у женщин и мужчин. Сегодня общий риск развития смертельных раковых заболеваний у женщин при воздействии малыми дозами облучения и низкой ЛПЭ (линейной передаче

энергии) почти на 50% выше, чем у мужчин. Почти 45% дополнительного риска у женщин на единицу облучения является следствием особой чувствительности женской груди к облучению⁵. Если рассматривать процентное отношение раковых заболеваний, то, независимо от уровня смертности, это сравнение становится несколько выше. Получается, что для женщин риск заболеть какой-либо формой рака от радиоактивного облучения более чем на 58% выше, чем для мужчин.

Последнее исследование по обедненному урану

За последние годы сильно возросло осознание рисков раковых заболеваний, возникающих в результате радиоактивного облучения обедненным ураном, и вреда, наносимого почкам в силу присущих ему свойств тяжелых металлов. Кроме того, появляется много новых фактов, которые вызывают серьезные опасения последствий постоянного облучения ОУ для других функций организма. Исследования животных и людей показали, что уран может содержаться в переменных количествах в скелете, печени, почках, анализах и мозге. К тому же опыты на крысах, которым имплантировали таблетки с ОУ, показали содержание урана в сердце, ткани легких, яичниках и лимфоузлах наряду с другими тканями.

Как упомянуто выше, некоторые исследования также выявили признаки возможного синергетического эффекта урана, проявляющегося в его свойствах тяжелого металла и радиоактивного компонента. Исследование рисков влияния тяжелого металла кадмия показало потенциальный синергетический эффект при соединении воздействий с гамма-излучением. Работа с этими видами комбинированных воздействий выявила, что прямое повреждение ДНК от радиационного облучения, скорее всего, вызвало торможение процесса восстановления ДНК в результате присутствия тяжелых металлов. Так сказать, двойной Дамоклов меч.

Научная работа, проведенная в Исследовательском институте радиобиологии Вооруженных сил США (Armed Forces Radiobiology Research Institute, AFRRI), расположенном в городе Бесезда, штат Мериленд, выявила, что обедненный уран может вызывать окислительное повреждение ДНК. Это указывает на первые признаки того, что радиологические и химические воздействия урана потенциально способны не только инициировать опухоль, но и содействовать ее развитию. Далее мы обсудим некоторые из этих потенциальных аспектов воздействия обедненного урана на здоровье, которые выявляются в ходе многих исследований.

Мутагенные и канцерогенные эффекты

С конца 1990-х годов в результате исследований, проводимых *in vitro* и *in vivo* появляются все новые факты, которые указывают на то, что обедненный уран может быть генотоксичным, мутагенным и канцерогенным. На сегодняшний

день значительная часть этих исследований проводится в AFRRI под руководством доктора Александры Миллер.

Впервые доктор Миллер со своими коллегами продемонстрировала, что усвоенный обедненный уран может привести к "серьезному усилению мочевой мутагенности" - это можно считать обычным биомаркером воздействия генотоксичного вещества⁶. Они также впервые показали, что облучение ОУ способно трансформировать живые клетки в клетки, которые могут порождать раковые опухоли у мышей с подавленной иммунной системой. Они обнаружили, что облучения одинаковыми химическими дозами урана с различной изотопной структурой вызвали "увеличение случаев неопластической трансформации в зависимости от конкретного вида активности", что в дальнейшем означало, "что излучение способно сыграть свою роль в биологических воздействиях, вызванных ОУ в лабораторных условиях".

Другие эксперименты, проведенные доктором Миллер и группой ученых, также показали, что ОУ способен стимулировать "окислительное повреждение ДНК при отсутствии серьезного радиоактивного распада". В свете другого эксперимента этой группы исследователей, который указывает на радиологический потенциал ОУ, способствующий возникновению генотоксичных эффектов *in vitro*, ученые отметили, что "так возникает соблазн предположить, что ОУ способен выделять опухолевый компонент, как "иницирующий", так и "развивающий"". Эта возможная двойственная роль может возникать, к примеру, в результате излучения альфа-частиц, сначала вызывая раковую мутацию (иницирование опухоли), затем накопление окислительного повреждения из-за свойств тяжелых металлов и/или радиоактивного излучения урана, которые способствуют распространению рака (опухолевое развитие) или наоборот.

Какова настоящая роль радиологических и химических веществ при генетических повреждениях под воздействием обедненного урана - это серьезный вопрос. Особенно, учитывая, что в настоящее время содержание ОУ в питьевой воде регламентировано из-за его химической опасности, которая рассматривается как первостепенная проблема. При этом подразумевается, что его радиационная опасность является для окружающей среды проблемой второго плана.

Завершающее исследование, которое проводилось по данной проблематике в вышеупомянутом исследовательском институте, появилось в 2003 году в публикации доктора Миллер и группы ученых о потенциале ОУ, вызывающем геномную неустойчивость в клетках человека. Здесь стоит отметить, что в ходе радиоактивного распада ОУ испускает альфа-частицы. Авторы данной публикации в первую очередь отмечают, что:

"Исследования с применением ОУ, проведенные в нашей лаборатории, показали возникновение неопластической трансформации человеческих

клеток в условиях, когда примерно 14% клеток, облученных ОУ, подверглись трансформации, даже несмотря на то, что альфа-частица пересекла менее 5% из них. Полученные данные указывают на то, что факторы, не имеющие отношения к прямому или "прицельному" поражению ДНК, могут быть вовлечены в трансформацию. Химическое воздействие ОУ и "неприцельные" воздействия радиации могут также играть свою роль в данном процессе. "Неприцельные" воздействия могут привести к повреждению клеток, не задетых альфа-частицей. Общий уровень наблюдаемой трансформации может быть результатом присутствия любого или всех этих факторов".

Для того, чтобы отдельно измерить воздействие излучения и токсичности тяжелых металлов, эффекты обедненного урана сравнили с эффектами никеля и гамма-излучением. По результатам экспериментов доктор Миллер и группа ученых пришли к следующему выводу:

"В аннотации мы представили данные, которые показывают образование геномной нестабильности в потомстве человеческих клеток, облученных ОУ. Полученные данные указывают на то, что ОУ способен вызывать замедленную смерть клеток, а также генетические изменения в виде микроядер. В сравнении с гамма-излучением или никелем, облучение ОУ привело к большему проявлению геномной нестабильности. Хотя опыты на животных необходимо проводить *in vivo* для того, чтобы изучить эффект длительного облучения ОУ и геномной нестабильности. Результаты, полученные нашей системой *in vitro* могут сыграть серьезную роль при определении оценки риска облучения ОУ".

Воздействие на детей и эмбрион/внутриутробный плод

Дети, а также эмбрион/внутриутробный плод находятся в группе повышенного риска из-за мутагенного и канцерогенного свойств урана. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) отметила:

"Ионизирующее излучение, как известно, наносит серьезный вред клеточному размножению. Поэтому биологические системы с большим количеством размножающихся клеток показывают бурную реакцию на облучение. На протяжении всего периода внутриутробного развития плода обнаружен высокий процент клеточного размножения. Однако, несмотря на то что клеточное размножение является основным процессом распространения радиационных воздействий, чувствительность эмбриона и плода также определяется такими процессами, как видоизменение и клеточное перемещение, а также радиационными воздействиями на эти биологические процессы.

(...)

Оказывается, что такие ткани, как мозг, щитовидная железа, кость и молочная железа являются более чувствительными к облучению, если это облучение происходило в ходе обычных периодов активного роста организма (например, в раннем детстве или половой зрелости)⁷".

Признавая эти более серьезные факторы риска радиационного облучения для детей, в приложении к Отчету № 13 по федеральным нормативам Управления охраны окружающей среды от 2002 года были представлены коэффициенты смертности и заболеваемости на один беккерель поглощения, составленные для различных возрастных групп, в том числе от 0 до 5 лет. По трем изотопам, присутствующим в ОУ, риск развития смертельной формы рака у ребенка до пяти лет на единицу поглощения примерно в шесть-восемь раз превышает усредненный риск этой возрастной группы, на который сегодня ориентируются в Управлении охраны окружающей среды при определении доз поглощения во время приема пищи и питьевой воды соответственно.

Суммируя все сказанное - повышенный риск на единицу поглощения в сочетании со своеобразным восприятием детского организма таких загрязняющих веществ, как ОУ, и тот факт, что уран, как известно, способен пересекать плацентарную оболочку и концентрироваться внутри эмбриона/плода, - можно с полной уверенностью констатировать необходимость введения более жестких требований по утилизации ОУ, особенно если уран будет признан более канцерогенным веществом, каковым он не считается на сегодняшний день, и особенно если речь идет об охране детского здоровья.

Воздействие на репродуктивные функции

Отчеты об опытах на животных, оценивающие влияние уранового облучения на их репродуктивные функции, были составлены еще в 1940-х годах. Однако оказалось, что в США эти первые исследования не получили дальнейшего методичного развития другими американскими учеными И только много десятилетий спустя появились последователи. Даже сегодня существуют серьезные пробелы в восприятии проблем уранового воздействия на репродуктивную способность людей и животных.

При проведении экспериментов в 1940-е годы было обнаружено, что продолжительное или даже однократное кормление крыс ураном могло пагубно отразиться на репродуктивных способностях животных. Его воздействие при длительном кормлении было значительно выше, нежели при одноразовом потреблении урана. Авторы отметили неожиданное продолжение этого воздействия на репродуктивный цикл крыс даже через девять месяцев после однократного уранового облучения⁸.

Остается неясной причина, по которой эти первые изыскания не получили продолжения или более широкого освещения. Однако недавно проведенное исследование по урану развило эти ранние открытия, и в результате проделанной

работы появились две самостоятельные области изучения потенциального воздействия урана на репродуктивную функцию. Первая область относится к рискам, связанным с облучением мужчин, а вторая касается облучения женщин.

Повышенное содержание урана было обнаружено в анализах и сперме участников войны в Персидском заливе. Хотя эпидемиологические данные пока не показали взаимосвязь облучения и репродуктивных функций ветеранов войны, Королевское научное общество Великобритании отметило, что концентрация ОУ в анализах является потенциальной проблемой при возможном существовании синергетических эффектов, вызванных способностью урана поражать ДНК через химический окислительный стресс и ионизирующее альфа-излучение. К тому же, Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) отмечала наблюдение "неустановленных дегенеративных изменений в анализах" крыс после длительного приема растворимых урановых соединений.

Хотя и весьма ограниченное количество, но все же чуть больше исследований было проведено по воздействиям уранового облучения на репродуктивные функции женщин. Они показали, что уран пересекает границу плаценты и концентрируется в ткани плода. Опыты на животных выявили, что облучение ураном - как глотание, так и инъекция - может привести к "сниженному уровню рождаемости, токсичности эмбриона/плода, в том числе тератогенности, а также снижению росту потомства". Эти данные были получены при экспериментах на крысах и мышках и служат доказательством того, что, по крайней мере, при исследованных дозах поглощения урана, урановое облучение может неблагоприятно сказаться на репродуктивных способностях самок. Единственный описанный в отчете эксперимент с применением обедненного урана не обнаружил статистически значимых воздействий на "прибавку в весе будущей матери, потреблении воды или пищи, период беременности или количество плодов, доношенных до срока". Однако было обнаружено, что более высокое количество имплантированных таблеток с ОУ приводит к увеличению содержания урана в плаценте и во всем плоде грызунов.

Что касается воздействий урана на репродуктивность, то здесь пока остается много неизвестных факторов, и был предложен ряд потенциальных радиологических и нерадиологических процессов, которые помогут объяснить те воздействия, о которых идет речь. Эти процессы включают гормональное или ферментное разрушение, а также поведенческие изменения. К тому же, мы уже упомянули выводы МКРЗ относительно повышенной общей чувствительности к облучению развивающегося эмбриона/плода, а также маленьких детей, что также потенциально может сыграть свою роль в воздействии ОУ на репродуктивность.

Нейротоксические эффекты

Ограниченные подтверждения взаимосвязи урана и неврологических повреждений относятся минимум к середине 1980-х годов. Несмотря на ряд проблем, помешавших этим первым исследованиям сформировать твердые

выводы о неврологических рисках обедненного урана, они все-таки послужили стимулом для проведения дальнейшей работы. Исследования, которые начались в 1990-х годах, обозначили ряд новых проблем, связанных с потенциальными токсическими эффектами ОУ для мозговой деятельности. Одна из серьезнейших обеспокоенностей, связанных с последней исследовательской работой, заключается в том, что первоначальная химическая форма урана в теле, тяжелый токсичный металл ураниловый катион (UO_2^{2+}), является химическим аналогом катиона свинца (Pb^{2+}). О нем известно многое, включая трагическую историю с нейротоксинами, и он представляет собой отдельную проблему для детского здоровья.

В 1999 году д-р Пеллмар и группа ученых из AFRRRI продемонстрировали, что обедненный уран, имплантированный в мышей, сосредоточился в различных областях мозга, причем его более высокое содержание отмечается при более высоких дозах облучения. По этим результатам они пришли к заключению, что урановое "накопление в мозге, лимфоузлах и яичках свидетельствует о возможном возникновении непредвиденных физиологических последствий воздействий урана данным способом"⁹.

В дополнительном исследовании Пеллмар и группа ученых пошли дальше и смогли показать, что "облучение фрагментами ОУ привело к нейрофизиологическим изменениям у морского конька". Морской конек был выбран для изучения благодаря мозговой области, связанной с памятью и обучением. По обзорам данных экспериментов AFRRRI был сделан вывод, что их результаты являются серьезным подтверждением возможного нейротоксического воздействия обедненного урана.

Другие исследователи доказали, что после проглатывания уран концентрируется в мозге мышей и крыс. Некоторые эксперименты на мышах показали воздействие на мозг с потенциальным нейротоксикологическим влиянием при таких дозах уранового облучения, после которых не было обнаружено видимых повреждений почек. Последнее исследование обнаружило заметные поведенческие изменения у крыс после двухнедельного облучения ОУ через питьевую воду¹⁰.

Специализированный компьютерный анализ, разработанный для оценки "коэффициента полезной деятельности", был использован для обнаружения потенциальных неврологических эффектов у участников войны в Персидском заливе, которые подверглись облучению через боеприпасы с обедненным ураном. Эти анализы были проведены в Балтиморском медицинском центре Управления по делам ветеранов армии (Baltimore VA Medical Center). Они показали статистически значимую взаимосвязь между содержанием урана в их моче и более низкими показателями в компьютерных нейрокогнитивных тестах. Однако при использовании традиционных нейрокогнитивных тестов в этой же группе не было обнаружено никаких измеримых последствий. В данном случае важно отметить, что солдаты подверглись облучению в зрелом возрасте и что эти

анализы не дают информацию о воздействии на более чувствительных к урановому облучению стадиях раннего детства, когда происходит быстрый рост и развитие мозга или когда гематоэнцефалический барьер еще не полностью сформирован.

Помимо потенциальной возможности урана оказывать химически нейротоксическое действие аналогично свинцу, также известно, что облучение неблагоприятно влияет на нервную систему эмбриона/плода. Из обзора данных о выживших после атомной бомбардировки японцев МКРЗ в упомянутой выше публикации пришла к выводу:

"Существует целый букет последствий внутриутробного облучения на развитие центральной нервной системы - это олигофрения, снижение умственных способностей и успеваемости в школе, а также различные приступы".

Позже МКРЗ конкретизировала, почему внутриутробный период вызывает особую опасность при радиационном поражении нервной системы и почему так важно принимать это во внимание, оценивая риски:

"Развитие центральной нервной системы начинается в первые недели эмбрионального роста и продолжается весь ранний послеродовой период. Таким образом, развитие центральной нервной системы происходит в течение длительного периода времени, когда она особенно уязвима. Было обнаружено, что развитие этой системы зачастую нарушается ионизирующим излучением, поэтому следует придать особое значение этим биологическим процессам".

Воздействие свинца и ртути на внутриутробное развитие также указывало на признак того, что данные вещества способны наносить неврологические повреждения в этот период быстрого роста. Однако первые годы детства, как правило, считаются самым критическим периодом для воздействия тяжелых металлов с учетом более высокой вероятности младенцев подвергаться влиянию окружающей среды. Что касается ряда других формирующихся факторов риска, упомянутых выше, здесь также возможен синергизм химического и радиационного воздействия урана на нервную систему.

Необходимо отметить, что даже относительно небольшие изменения в среднем коэффициенте умственного развития, которые распространены у многих детей, приведут "к значительному увеличению процента детей с интеллектом ниже любого установленного уровня IQ, например 80, а также снижению процента "одаренных" детей с интеллектом выше любого высокого уровня, например, 120". Таким образом, воздействие нейротоксических веществ даже в очень малых дозах на население в конечном счете может быть крайне серьезным, даже если оно не кажется таковым для "среднего" или "обычного" представителя подвергнувшегося воздействию населения.

Воздействия на кости

Как и с мозговой деятельностью, зародышевый и другие периоды быстрого роста (т.е. в раннем детстве и во время половой зрелости) - это время повышенной чувствительности скелета. Эксперименты на крысах показали, что сильное кратковременное и продолжительное поглощение урана может привести к повреждению костей. Королевское научное общество Великобритании заявило, что в свете того, что уран пересекает плацентарную преграду, "необходимо также принимать во внимание воздействие ОУ, которому подверглась мать, на костный рост плода". ВОЗ и Национальный научно-исследовательский совет (National Research Council) также предложили провести исследования, чтобы определить какое воздействие, если таковое присутствует, оказывает на костный мозг интегрированный в кость уран и, следовательно, на образование новых клеток крови. Новое исследование воздействия ежедневных доз гексагидрата уранилдинитрата на собак, начиная с раннего возраста, показало, что уран концентрируется в костном мозге в таком же количестве, как и в кости, несмотря на то, что были применены однократные проникающие дозы¹¹.

Уран - это радиоактивный свинец?

Существуют явные признаки того, что токсичность урана, по крайней мере, по некоторым последствиям, в том числе по нейротоксическим воздействиям на внутриутробный плод и маленьких детей, можно быстрее распознать, если рассматривать уран как аналог одного из видов радиоактивного свинца, когда вред от альфа-излучения сочетается с воздействием тяжелых металлов. Это сочетание создает ряд проблем для здоровья при относительно малых дозах облучения. Эта аналогия урана со свинцом была проведена в 2003 году Лемерсьером и группой ученых в отчете по проведенному исследованию, которое показало содержание урана в мозге крыс¹². Хотя такой взгляд на проблему явно ограничивает восприятие нюансов биологических механизмов, подвергшихся воздействию урана, в сравнении со свинцом, способность урана химически индуцировать окислительный стресс, пересекать гематоэнцефалический барьер и изменять электрическую активность в верхних частях головного мозга, а также потенциально прерывать нейротрансмиттеры с помощью химического замещения кальция в межнейронных пробелах - все это в сочетании с высокой степенью локального клеточного повреждения, вызванного альфа-излучением, дает серьезные основания для беспокойства по поводу потенциального воздействия урана на развивающийся мозг ребенка.

В свете аналогии урана со свинцом необходимо заметить, что несмотря на факты воздействия свинца на мозг, которые были известны почти два тысячелетия назад, а также свинцового отравления, присутствие которого в детском организме было впервые клинически установлено еще в 1890-х годах, только в 1979 году свинцованный бензин был, наконец, снят в США с производства после нескольких десятилетий широкой торговли. Как и в случае с общей тенденцией в нормативах защиты от радиации, Центр по контролю над

болезнями (CDC) принял решение о четырехкратном снижении норматива, который с конца 1960-х годов считается признаком повышенных доз свинца в крови детей. Сегодня этот уровень составляет одну шестую от норматива 35-летней давности. При этом CDC твердо заявил, что безопасных доз свинцового воздействия не существует, и, соответственно, любое его поглощение будет иметь какое-либо вредное последствие.

К сожалению, несмотря на начавшееся с 1979 года серьезное снижение предельно-допустимых доз урана, сегодня в крови детей они по-прежнему варьируются от 100 до 1000 раз выше расчетных предпромышленных уровней. Согласно оценкам CDC за 2000 год превышающие нормы повышенного содержания свинца в крови отмечены почти у полумиллиона детей в США. Помимо этого исследования по воздействию свинца показывают, что на умственные функции детей неблагоприятное влияние оказывает воздействие примерно уже половины дозы, которая установлена CDC/ВОЗ. И это также подтверждает вывод о том, что едва ли существует порог для вредного воздействия свинца на человека.

Последнее исследование показало, что помимо свинцовой нейротоксичности, воздействие свинца на внутриутробное и послеродовое развитие вызывает замедленный рост у животных и людей, а также может способствовать изменению выработки половых гормонов и задержки половой зрелости у крыс. Эпидемиологическое исследование, опубликованное в 2003 году, показало, что даже относительно низкие средние дозы свинца (примерно третья часть нормы, установленной CDC/ВОЗ) вызвали измеримую задержку половой зрелости у афро-американских и мексикано-американских девочек, хотя у белокожих девочек не было выявлено никаких статистически значимых задержек. Это воздействие на половое развитие девочек, по крайней мере, отчасти объяснялось потенциальными "изменениями в эндокринной функции". Остается немало вопросов относительно того, каким образом свинец вызвал эту задержку, а также подвергались ли дети облучению более высокими дозами свинца в прошлом, то есть до начала исследований. Тем не менее, потенциальная возможность урана оказывать аналогичное воздействие на гормонально опосредованные процессы в развитии детского организма может еще больше расширить перечень факторов риска, а также открыть новые серьезные возможности для потенциального синергизма за счет иных химических и радиологических воздействий на здоровье.

Уроки трагического опыта использования свинца в связи с нанесенным вредом детскому здоровью, в том числе отрицание производителями в течение нескольких десятилетий опасности продукции на основе свинца, а также систематическое и поступательное ужесточение нормативов по охране детского здоровья после их утверждения, заслуживают серьезного изучения с учетом тех направлений, по которым в настоящее время проводятся исследования урана.

Определения

Цитотоксический - токсический для клеток.

Геномная неустойчивость - повышенная тенденция ДНК к неправильному самовосстановлению, что типично для раковых клеток.

Генотоксичный - губительный для ДНК.

In vitro - эксперименты, проведенные не на живом организме.

In vivo - эксперименты, проведенные на живом организме.

Микроядра - фрагменты хромосом, которые при клеточном делении не объединяются в ядра.

Мутагенный - вызывающий или способствующий возникновению наследственных генных мутаций.

Неопластическая трансформация - преобразование нормальных клеток в злокачественные.

Проген - потомок.

Канцерогенный - вызывающий опухоли.

Источники

1. Данная статья основана на отчете IEER: [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](#) ("Затраты и риски, связанные с контролем и утилизацией обедненного урана национального обогатительного завода, который консорциум "LES" планирует построить в округе Ли, штат Нью-Мексико"). Отчет был подготовлен для Информационной службы по ядерным вопросам и ресурсам (NIRS) и организации "Public Citizen" ("Гражданин"). Подробные ссылки можно найти в отчете.
2. См. Национальный совет по защите и измерению радиационного излучения (National Council on Radiation Protection and Measurements): "Оценка модели линейной беспороговой зависимости "доза - эффект" для ионизирующего излучения" (*Evaluation of the Linear-Nonthreshold Dose-Response Model for Ionizing Radiation*). Отчет подготовлен NCRP № 136, г. Бесезда, штат Мериленд, 4 июня, 2001 г.
3. Краткая информация о регулятивных предельных дозах излучения за прошлые годы для рабочих США опубликована в издании [ЭБ №15](#), за 2001 г.
4. Министерство энергетики США, Управление экологической безопасности и здоровья (Office of Environmental Safety and Health): *Radiation protection of the public and environment* ("Радиационная защита людей и окружающей среды"). Приказ: Министерство энергетики 5400.5, Вашингтон, округ Колумбия, 8 февраля 1990 г. Раздел II.1 а.
5. Общий риск заболеваний раком в человеко-Греях от воздействия малых доз радиации и малых ЛПЭ для женщин составляет $6,83 \times 10^{-2}$, а для мужчин $4,62 \times 10^{-2}$. Женская молочная железа занимает

второе место в группе повышенного риска на единицу облучения среди прочих мужских и женских органов, которые перечислены в настоящем отчете Управления по охране окружающей среды, а также находится выше группы риска, если сравнить его с риском для всех мужских органов. (Кейт Ф. Эккерман (Keith F. Eckerman), Ричард У. Леггетт (Richard W. Leggett), Кристофер Б. Нельсон (Christopher B. Nelson), Джером С. Паскин (Jerome S. Puskin), Алан С.Б. Ричардсон (Allan C.B. Richardson). "Коэффициенты риска раковых заболеваний при радионуклидном воздействии окружающей среды: удельные радионуклидные временные коэффициенты риска раковых заболеваний радиоактивного происхождения для населения США в зависимости от возраста, дозиметрии и моделей риска". Отчет "Федерал Гайденс" № 13. EPA 402-R-99-001. Ок-Ридж, ТН: Ок-Риджская Национальная лаборатория (Oak Ridge National Laboratory); Вашингтон, округ Колумбия: Управление по вопросам радиации и воздуху в помещениях, Управление по охране окружающей среды США, сентябрь 1999 г.).

6. Если не указано иное, это и другие исследования, указанные в данном разделе, относятся к ряду работ доктора Миллер и других ученых, которые были опубликованы между 1998 и 2003 гг. Полные ссылки на источники указаны на стр. 10-13 отчета IEER, который лег в основу данной статьи. Отчет называется [Costs and Risks of Management and Disposal of Depleted Uranium from the National Enrichment Facility Proposal to be Built in Lea County New Mexico by LES](#), "Затраты и риски, связанные с контролем и утилизацией обедненного урана национального обогатительного завода, который консорциум "LES" планирует построить в округе Ли, штат Нью-Мексико".
7. Международная комиссия по радиологической защите - "*Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus)*". Из материалов МКРЗ, выпуск 33, номера 1-2, публикация МКРЗ 90; Кидлингтон, Оксфорд; Тэрритаун, Нью-Йорк: Pergamon, 2003 г.
8. Ссылки по данному разделу см. на стр. 13-14 отчета IEER по компании "LES".
9. Если не указано иное, ссылки по данному разделу см. на стр. 14-16 отчета IEER по "LES".
10. Уейн Брайнер (Wayne Briner) и Дженнифер Марей (Jennifer Murray) "Effects of short-term and long-term depleted uranium exposure on open-field behavior and brain lipid oxidation in rats". *Нейротоксикология и тератология*, выпуск 27 (2005 г.), стр. 135-144.
11. Эррадо-Нето и др. (Arrudo-Neto) "Long-term accumulation and microdistribution of uranium in the bone and marrow of beagle dog". *Int. J. Radiat. Biol.*, выпуск 80, номер 8 (2004 г.), стр. 567-575.
12. Лемерсьер и др. "Study of uranium transfer across the blood-brain barrier". *Радиационная защитная дозиметрия*, выпуск 105, номера 1-4 (2003 г.), стр. 243-245.

[Энергетика и Безопасность](#) | ([английский вариант](#))
[IEER](#)



Институт исследований энергетики и окружающей среды

Ваши вопросы и замечание посылайте директору по внешним связям: ieer@ieer.org
Такома Парк, Мэриленд США

2005 г. (Английский вариант издания был опубликован в июне 2005 г.)

Опубликовано в Интернете в августе 2005 г.