

ОПАСНОСТЬ ОТ БОЕПРИПАСОВ С ОБЕДНЕННЫМ УРАНОМ

Стив Феттер и Фрэнк фон Хиппель

В статье дается оценка радиологической и химической опасностей, вызываемых применением боеприпасов с обедненным ураном (ОУ). Благодаря низкой радиоактивности ОУ радиологическая опасность для отдельных лиц станет существенной по сравнению с естественным фоновым излучением только при длительном контакте, например, когда осколки пенетратора с ОУ остаются в теле солдата. Хотя дозы облучения фактически для всех гражданских лиц будут очень низкими, набираемая из-за разбрасывания сотен тонн ОУ (как это произошло во время войны в Персидском заливе) "доза для населения" может привести к десяти смертям от рака. Очень маловероятно, чтобы облучение людей, находившихся с подветренной стороны от места применения боеприпасов с ОУ, как и применение ими пищи или воды, зараженных пылью ОУ, достигло оцениваемых порогов для химического воздействия тяжелых металлов. Впрочем, облучение солдат внутри транспортных средств, пораженных боеприпасами с ОУ, может оказаться гораздо более высоким, а лица, которые в дальнейшем будут входить в поврежденные машины без соответствующих средств защиты, могут подвергнуться опасности. Следовало бы обучать солдат, как избежать ненужного облучения при контакте с ОУ, а поврежденные боеприпасами с ОУ транспортные средства должны быть сделаны недоступными для любопытных гражданских лиц.

Стив Феттер работает в Школе общественных событий при Мэрилендском университете, Колледж Парк, Мэриленд, США.

Фрэнк фон Хиппель работает в Центре изучения энергетики и окружающей среды при Принстонском университете, Принстон, Нью Джерси, США.

ВВЕДЕНИЕ

Отдельные лица высказали предположение, что применение Соединенными Штатами боеприпасов с обедненным ураном (ОУ) во время войны в Персидском заливе 1991 г. могло бы стать причиной проблем со здоровьем, о которых сообщалось вернувшимися американскими солдатами и населением Южного Ирака. Позднее внимание было сосредоточено на этом вопросе в результате применения боеприпасов с ОУ самолетами НАТО в Югославии. Было опубликовано несколько докладов и статей, которые утверждали, что использование боеприпасов с ОУ оказало серьезное отрицательное воздействие на здоровье солдат и окружающего населения, а также на окружающую среду ¹.

На основе такого мнения бывший министр юстиции США Рамсей Кларк и бывший советский президент Михаил Горбачев призвали к запрету на использование ОУ в виде оружия ². Напротив, министерство обороны США и различные правительственные подрядчики опубликовали результаты исследований, приведших к выводу, что влияние ОУ на здоровье не является серьезным ³. Мы использовали эти и иные ссылки, а также наши собственные расчеты, чтобы рассмотреть это противоречие в истинном свете ⁴. Чтобы сделать наши результаты более наглядными, мы используем также Приложение, где "на пальцах" оценены наиболее важные дозы излучения.

Наш предварительный вывод состоит в том, что опасения о здоровье людей и о влиянии ОУ на окружающую среду слишком раздуты. Похоже, что риск очень мал для окружающего населения и для лиц, которые не находились в прямом (без защиты) контакте с транспортными средствами, пораженными боеприпасами с ОУ, или с участками, сильно загрязненными при горении боеприпасов с ОУ. Загрязнение обедненным ураном вряд ли приведет к заметному воздействию на здоровье людей в Ираке или Югославии.

Более трудно оценить риск для солдат, которые находились внутри транспортных средств, пораженных боеприпасами, для персонала, вовлеченного в операции по спасению, ремонту и очистке, и для людей, которые охотятся за сувенирами в поврежденном транс-

порте. Судя по неофициальной информации, похоже, что обучение групп по очистке и предоставленное им оборудование оказались неадекватными, так что кое-кто мог вдохнуть заметное количество ОУ. К сожалению, несмотря на американский армейский устав, не было проведено, как представляется, своевременных измерений фактических телесных повреждений и поэтому мы можем никогда не узнать, сколько людей подверглись серьезному облучению.

ОБЕДНЕННЫЙ УРАН

Естественный уран, составляющий по весу около трех миллионных долей земной коры, состоит из 99.3% U-238, 0.7% U-235 и 0.0054% U-234 (продукт радиоактивного распада U-238). Обедненный уран отличается от естественного в силу того, что большая часть легких изотопов удалена для получения обогащенного урана, используемого в ядерном топливе или в оружии, но его химическое и биологическое поведение фактически не отличается от естественного урана, находящегося в такой же химической форме. В Таблице 1 приведен изотопный состав обедненного урана, используемого в американских боеприпасах.

Таблица 1. Изотопы в естественном и обедненном уране

Изотоп	Период полураспада, лет	Удельная активность, Ки/г	Концентрация, весовые %	
			Природный	Обедненный
U-234	$2.46 \cdot 10^5$	$6.22 \cdot 10^{-3}$	0.0054	0.0007
U-235	$7.04 \cdot 10^8$	$2.16 \cdot 10^{-6}$	0.711	0.2
U-236	$2.34 \cdot 10^7$	$6.47 \cdot 10^{-5}$		0.003
U-238	$4.47 \cdot 10^9$	$3.36 \cdot 10^{-7}$	99.28	99.8
Природный U		$6.85 \cdot 10^{-7}$		
Обедненный U		$3.85 \cdot 10^{-7}$		

а) Edgardo Browne, and Richard B.Firestone, "Table of Radioactive Isotopes" (New York: John Wiley, 1986).
 б) Удельная активность (Ки/г) = $3.57 \text{ E5}/\text{AT}$, где А – атомная масса, а Т – время распада до половины интенсивности (в годах).
 в) Концентрация U-235 может меняться в интервале между 0.2 и 0.3 процента. Используемый министерством обороны ОУ содержит около 0.2% U-235 и следы U-236 (от переработанного урана). Смотрите Health and Environmental Consequences of Depleted Uranium Use in the U.S. Army: Technical Report, Atlanta: U.S. Army Environmental Policy Institute (June, 1995). Адрес в Интернете: <http://aeoi.gatech.edu/DU/chapter2.html> Если ОУ содержит 0.2% U-235, то концентрация U-234 находится в интервале от 6.4 до 7.2 ppmw в зависимости от концентрации U-235 в обогащенном продукте. Смотрите статью Стива Феттера по ядерной археологии и проверке заявлений о производстве делящихся материалов в нашем журнале (том 3, выпуск 3, стр.49, 1993 г.).

Основные американские боеприпасы, содержащие ОУ, - это танковые снаряды диаметром 105 и 120 мм, содержащие, соответственно, 4 и 5 кг ОУ, а также патроны диаметром 30 мм для скорострельной пушки Гатлинга, установленной на самолете А-10 (каждый содержит около 300 г ОУ). Армия США использовала около 4000 крупнокалиберных снарядов в боях во время операции "Буря в пустыне" главным образом "в пустыне на расстоянии в несколько миль от ближайшего селения и на площадях размером в несколько сот квадратных миль" ⁵. На рис.1 приведена схематическая диаграмма снаряда диаметром 120 мм. Кроме использованных в боях снарядов, 7000 были использованы для обучения, а 3000 были уничтожены (многие из них при пожаре в лагере Дохоа в Кувейте ⁶). Как сообщается, ВВС США во время операции "Буря в пустыне" истратили около 800 000 30-мм снарядов с ОУ. Использование боеприпасов с ОУ морской пехотой США, силами ВМФ и британскими силами было относительно небольшим. Всего в операции "Буря в пустыне" было истратчено около 300 тонн ОУ. Это сравнимо с количеством естественного урана, которое было выпу-

щено в атмосферу правительственным центром США по производству топливных материалов (Ферналд, Огайо) в промежутки времени с 1953 по 1977 гг.⁷.

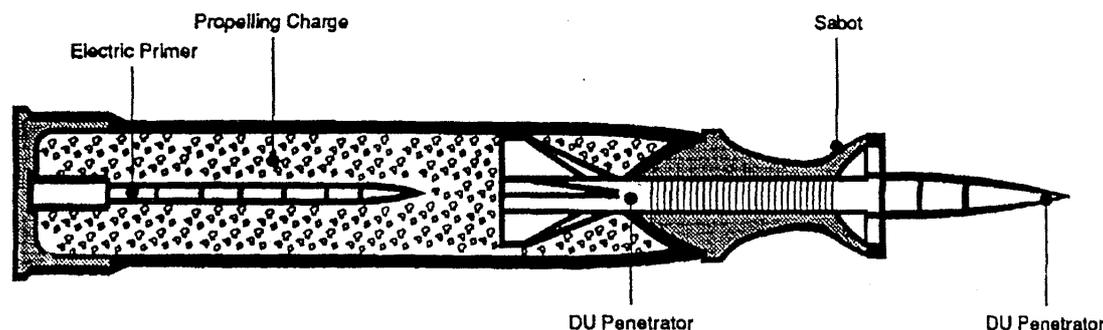


Рисунок 1. Схематическая диаграмма 120-мм пенетратора из ОУ. Источник: Operation Desert Storm: Army Not Adequately Prepared To Deal With Depleted Uranium Contamination, U.S. General Accounting Office Report, GAO-NSIAD-93-90 (1993), p.13. Обозначения (слева направо): а) электрозапал, б) заряд ВВ, в) пенетратор из ОУ, г) подкалиберный снаряд.

ОУ слабо радиоактивен. Он распадается очень медленно с периодом полураспада 4.5 миллиарда лет. Благодаря возникающему излучению внутреннее или внешнее облучение приводят к радиационным дозам. Весьма невероятно, чтобы облучение от ОУ привело к дозам, достаточно высоким, чтобы вызвать любые кратковременные радиационные эффекты, но меньшие дозы могут привести к увеличению вероятности заболевания раком⁸. Кроме того, внутреннее облучение ураном при достаточно высоких уровнях может привести к ядовитому химическому воздействию, аналогичному воздействию нерадиоактивных тяжелых металлов, например, свинца.

Основной источник внешнего облучения – это обращение с боеприпасами из ОУ или с их фрагментами, а также проживание в районе, загрязненном ОУ (или передвижение через него). Вдыхание мелких аэрозолей ОУ, возникающих при пожарах или при ударе боеприпаса о цель, станет самым сильным источником внутреннего облучения. Ниже мы оценим и рассчитаем риск для отдельных лиц и для населения в целом при внешнем и внутреннем облучении обедненным ураном.

ВНЕШНЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Изотопы урана и продукты их радиоактивного распада испускают альфа-, бета- и гамма-лучи. Альфа-частицы (ядра гелия) не могут проникать через бумагу или внешний нечувствительный слой кожи – они опасны только при вдыхании урана или попадании его в органы пищеварения. Бета-частицы (электроны) обладают несколько более высокими пробегами, но они опасны, если только уран находится в прямом контакте с кожей. Гамма-лучи (фотоны) обладают гораздо большей проникающей силой. Наиболее проникающие гамма-лучи от ОУ – это фотоны с энергией 1 МэВ, которые возникают при распаде Ра-234m (продукт распада урана-238). Их интенсивность уменьшается примерно втрое на расстоянии 16 см в воде или 1.5 см в свинце.

Индивидуальное облучение

Теоретическая максимальная доза облучения всего тела гамма-лучами ОУ составит 2.5 миллибэра в час (при внешней экспозиции)⁹. Дозу такого размера может получить лицо, окруженное со всех сторон боеприпасами с ОУ. При более обычных ситуациях рассматриваются значительно меньшие дозы. Согласно данным от армии США доза облучения всего

тела внутри (или вблизи) танка, полностью заполненного боеприпасами с ОУ, меньше 0.2 миллибэра в час¹⁰. Чтобы сделать эту величину более наглядной, отметим, что полная доза облучения всего тела от естественного фонового излучения на территории США составляет около 300 миллибэр в год¹¹. Таким образом, если вести полностью загруженный танк в течение 2000 часов, полученная доза окажется примерно равной годовой дозе от естественного фона.

Как можно ожидать, доза от попавшего на почву ОУ будет значительно ниже. Доза для лица, стоящего на плоском участке грунта, который заражен ОУ (одна тонна на квадратный километр, что является разумным верхним пределом для поля боя), составит около 1 миллибэра в год¹². Для сравнения укажем, что доза от естественного урана в почве равна около 10 миллибэр в год¹³. Американские законы ограничивают облучение населения от антропогенных источников ионизирующей радиации величиной 100 миллибэр в год¹⁴. Даже в непосредственной близости от транспортного средства, разрушенного боеприпасами из ОУ, доза при внешней экспозиции вряд ли превысит 30 миллибэр в год, что в десять раз ниже естественной фоновой дозы¹⁵.

Контакт незащищенного ОУ с незащищенной кожей, что может произойти при обращении с обломками ОУ-пенетратора после удара или пожара, приведет к гораздо более высокой дозе (около 230 миллибэр в час на коже), в основном, от бета-частиц¹⁶. Кожа относительно нечувствительна к излучению, так что даже длительный прямой контакт вряд ли приведет к радиационным ожогам или к какому либо иному воздействию на здоровье¹⁷. Впрочем, если кто-то будет держать кусок ОУ в кармане, а также носить ожерелье или браслет из ОУ, появится более высокий риск заболевания раком кожи¹⁸. Поэтому следует очищать фрагменты ОУ и размещать их в безопасном месте, чтобы избежать облучения от “сувениров”.

Облучение населения

Хотя внешние дозы вероятнее всего окажутся гораздо ниже установленных пределов на облучение, низкие дозы все еще могут вызывать тревогу, если облучилось много людей. Для защиты здоровья населения существует предположение, что любая доза излучения, как бы мала она ни была, связана с пропорциональным увеличением вероятности смерти от рака – это т.н. линейное и непороговое соотношение между дозой и результатом воздействия.

Однако важно отметить, что канцерогенный эффект излучения, наблюдавшийся при высоких дозах (около 10 бэр), обычно не обнаружим статистически при низких дозах, потому что рак может быть вызван иными причинами. Например, нет эпидемиологических фактов, что облучение естественным или обедненным ураном, которые слабо радиоактивны, связано с увеличением заболевания раком¹⁹. Хотя мы верим, что линейная модель – это консервативная оценка риска от малых доз ионизирующего излучения для генетически однородного населения, кое-кто полагает, что она может переоценивать риск.

Важное предсказание линейной модели состоит в том, что число смертей от рака не зависит от распределения дозы между населением²⁰. Доза в 10 бэр для каждого из 1000 людей приведет к тому же числу смертей от рака, как и в случае дозы в 1 бэр для 10000 людей, или 0.1 бэр для 100000 человек. Число смертей от рака пропорционально “дозе для населения” – сумме доз для всех облученных лиц. В приведенных выше примерах доза для населения составляет 10000 человек-бэр. Коэффициент риска, оцененный по данным от высоких доз, составляет около одной смерти от рака на 2000 человек-бэр, действовавших в течение длительного периода времени²¹. (В этом случае доза соответствует облучению всего тела – ее называют “эффективным эквивалентом дозы” (ЭЭД). ЭЭД является взвешенным средним от доз для разных органов, где веса определяются относительной вероятностью того, что фатальный рак проявится в данном органе при однородном облучении всего тела.) При использовании этого коэффициента получим, что доза для населения в 10000 человек-бэр приведет в среднем к пяти дополнительным смертям от рака.

Доза для населения при внешнем облучении от зараженной почвы D (человек-бэр год) дается соотношением

$$D_e = C_e M \rho \quad (1)$$

где C_e - переводной множитель для ЭЭД (1.3 миллибэр в год на тонну ОУ на кв. км)²², M – полная масса разбросанного ОУ (в тоннах), а ρ - плотность населения (на кв. км). Средняя плотность населения составляет 10 человек в Саудовской Аравии, 50 - в Ираке и 100 – в Кувейте и Югославии. Мы будем использовать величину 50 человек в качестве консервативного (то есть, завышенного) значения площади, зараженной ОУ во время войны в Персидском заливе.

Уравнение (1) игнорирует экранирование местностью и другими структурами, а также погодные условия, обработку почвы или ее очистку. Фактические дозы для населения будут значительно ниже, особенно через несколько лет²³. Уравнение (1) предполагает также, что нет корреляции между заражением и плотностью населения – иными словами, что уровень заражения ОУ одинаков в городских и сельских районах. Если степень заражения ОУ максимальна в отдаленных районах, вдали от городов и деревень, то доза для населения и ожидаемое число раковых заболеваний сократятся. Если принять во внимание эти факторы, полная доза для населения за период в 50 лет после начального заражения может быть, грубо говоря, в 10 раз выше дозы за первый год, даваемой уравнением (1), с точностью до множителя порядка двойки.

Если 300 тонн ОУ было разбросано на площади со средней плотностью населения в 50 человек на кв. км., то полная доза для населения составит около 20 человек-бэр в год. За пятидесятилетний период полная доза для населения вырастет примерно до 200 человек-бэр. В соответствии с линейной гипотезой эта доза приведет к 0.1 смерти от рака – иными словами, к десяти процентному шансу, что от рака умрет один человек.

Итак, мы приходим к выводу, что опасность для здоровья отдельных лиц или населения от внешнего облучения ОУ мала с возможным исключением для лиц, занятых расчисткой, которые имеют прямой и длительный контакт с обломками ОУ.

ВНУТРЕННЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Внутреннее облучение обедненным ураном более опасно, чем внешнее. Внутреннее облучение может произойти в результате вдыхания мелкозернистых аэрозолей, попадания пыли в пищу или длительного нахождения осколков в теле. Осколки, пыль и аэрозоли образуются при ударе боеприпаса о твердую цель, например, бронированные транспортные средства. У некоторых американских танков броня содержит ОУ и это может способствовать образованию осколков и аэрозолей. Аэрозоли и пыль могут образоваться также при пожарах с участием боеприпасов из ОУ или транспорта с броней из ОУ.

Танковые снаряды из ОУ обладают при вылете из дула скоростью 1500 м/с; при этой скорости кинетическая энергия ОУ-пенетратора массой в 5 кг эквивалентна 1.4 кг тротила²⁴. Кинетическая энергия 30-мм пенетраторов для скорострельной пушки эквивалентна примерно 50 г тротила²⁵. Когда такие пенетраторы сталкиваются с прочной целью (например, с танком), значительная часть их кинетической энергии преобразуется в тепло менее, чем за миллисекунду²⁶. Столь быстрое выделение энергии может превратить значительную часть ОУ в небольшие нагретые осколки и частички. Осколки меньшего размера могут сгореть с образованием аэрозоля из оксида урана. Если пенетратор сталкивается с непрочной целью (например, с машинами для перевозки людей, с грузовиками или с грунтом), образуется гораздо меньше аэрозоля и большая часть металлического ОУ-пенетратора может остаться неповрежденной.

Правительство США поддержало несколько испытаний для определения количества, размера и растворимости ОУ-аэрозолей, образованных при пожарах и соударениях. В пяти ударных испытаниях с использованием ОУ-снарядов диаметром 25, 105 и 120 мм при полном, частичном или нулевом проникновении в прочную бронированную мишень доля ОУ, превратившаяся в аэрозоль, менялась в диапазоне 3-70%; от 1% до 96% массы аэрозоля можно было вдохнуть (то есть, диаметр частиц был менее 10 микрон), а 17-43% такого вдыхаемого аэрозоля находилось в виде химических соединений, растворимых в воде²⁷. Два из пяти этих испытаний явно оказались с дефектами, что вызвало значительную недооценку или переоценку доли образовавшегося аэрозоля. С учетом всех обстоятельств разумная консервативная оценка доли массы ОУ, превратившейся в аэрозоль, который можно вдохнуть, при ударе о твердую цель составляет 20%. Если предположить, что не более полови-

ны снарядов попадают на прочную цель, примерно 10% ОУ из снарядов, выпущенных во время военных операций, будет преобразовано в аэрозоль, который можно вдыхать.

Вообще говоря, при стрельбе гораздо меньшая доля ОУ превращается в аэрозоль по сравнению с тем, что происходит при ударе о прочную цель, и доля растворимого в воде аэрозоля будет меньше. В трех испытаниях с использованием боеприпасов разного типа 10-35% массы ОУ перешло в оксид; 0.07-0.6% массы оксида были в виде аэрозоля, а 0.007-0.07% массы оксида было в виде аэрозоля, опасного при вдохе (частицы с диаметром менее 10 микрон), причем 3-7% всего аэрозоля могли растворяться в воде ²⁸. Поэтому при стрельбе оцениваемая доля всей массы ОУ, выделяемая в виде аэрозоля, который можно вдохнуть, меньше 0.05%.

Воздействие внутреннего облучения на здоровье

Риск для здоровья, вызываемый ОУ-аэрозолями, зависит от размера их частиц и растворимости в жидкостях тела. Размер аэрозоля определяет долю вдыхаемого ОУ, оседающего в носовых пазухах, бронхах и легких. Растворимость определяет, как скоро вдыхаемый или проглоченный ОУ поглощается потоком крови. Крошечные и нерастворимые частицы аэрозолей приводят к более высоким дозам облучения, поскольку они главным образом оседают в легких и остаются там на несколько лет. Растворимые аэрозоли дают больший риск химической токсичности, так как они быстро переходят в поток крови. Растворенный в крови уран концентрируется в почках и костях. Мы использовали метаболическую модель Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) для вычисления количеств урана в разных органах в зависимости от времени, прошедшего после вдыхания или заглатывания, а также для оценки возникающих доз облучения ²⁹.

Воздействие излучения. Как обсуждалось выше, основной риск от малых доз облучения выражается в увеличенной вероятности заболевания раком. В США рабочие ограничены дозой 5 бэр в год при облучении всего тела (ЭЭД). Кроме того, максимальная доза для любого органа не превышает 50 бэр в год. В соответствии с линейной теорией облучение всего тела дозой 5 бэр влечет за собой 0.25%-ный шанс заболевания раком ³⁰.

В Табл.2 приведены ЭЭД за 50 лет и воздействие 50-летней дозы на наиболее облучаемые органы в расчете на грамм вдыхаемого или проглоченного аэрозоля из ОУ в зависимости от размеров и растворимости частичек аэрозоля. Можно вдохнуть 3 г растворимого ОУ-аэрозоля или 0.05-0.3 г нерастворимого аэрозоля (в зависимости от его размера) без превышения профессиональных порогов на облучение. Аналогично, можно проглотить 30 г растворимого аэрозоля или 600 г (более одного фунта!) нерастворимого, не переходя профессиональный предел. Очень маловероятно, чтобы можно было вдохнуть или проглотить ОУ-аэрозоль в количествах, достаточных для получения такой большой дозы облучения, которая вызовет любые быстро проявляющиеся воздействия на здоровье ³¹.

Таблица 2. Воздействие 50-летней дозы (бэр на грамм вдыхаемого или проглоченного ОУ)^а.

	Размер аэрозоля ^б (мкм)	Растворимый ^в		Нерастворимый ^г	
		Скелет	ЭЭД	Легкие	ЭЭД
Вдыхаемый	0.2	18	1.2	770	92
	1	14	0.96	380	46
	5	16	1.1	130	16
		Скелет	ЭЭД	Скелет	ЭЭД
Проглоченный		1.5	0.098	0.058	0.0387

а) При вычислении использована модель для урана, приведенная в книге Международной комиссии по радиологической защите, "Limits on Intakes of Radionuclides by Workers", ICRP Publication 30, Part 1 (Oxford: Pergamon Press, 1978).

б) Средний аэродинамический активный диаметр.

в) Легкие очищаются в течение дней.

г) Легкие очищаются в течение годов.

Химическая токсичность. Как и многие тяжелые металлы, уран токсичен. Обычно почки считаются самым чувствительным органом, поскольку кислая среда в почечных каналах, где собирается моча, выделяет уран в чистом виде и он воздействует на клетки поверхности каналов. На основе изучения животных полагается, что заметная гибель клеток происходит при весовой концентрации урана в ткани почек выше 3 ppm³². Для среднего взрослого мужчины с массой почек 310 г такая концентрация соответствует полной массе урана в почках около 1 миллиграмма.

Администрация США по профессиональному здоровью и безопасности (АПЗБ) установила следующие “допустимые уровни облучения” для аэрозолей урана: 0.5 миллиграмма на кубический метр для растворимых соединений (так же, как и для свинцовых аэрозолей) и 0.25 мг/м³ для нерастворимых. Эти пределы основаны на непрерывном профессиональном облучении (40 часов в неделю, 50 недель в году). Непрерывное профессиональное облучение на уровне порогов АПЗБ приведет к равновесной концентрации урана в почках порядка 1 ppm. Однократное облучение, вызывающее такую же или меньшую концентрацию урана в почках, вряд ли будет по этой причине приносить постоянный вред³³.

В Табл.3 указано максимальное количество урана в почках в результате вдыхания или заглатывания одного грамма уранового аэрозоля. Концентрация урана в почках порядка 1 ppm наступит после вдыхания 5-6 мг растворимого уранового аэрозоля или 300-1400 мг нерастворимого аэрозоля. Для сравнения укажем на оценки общества медицинской физики, касающиеся порогов проходящей и постоянной опасности для мочеточников: это 8 и 40 мг вдыхаемого растворимого уранового аэрозоля³⁴. Обратите внимание также на то, что концентрация урана в почках на уровне 1 ppm наступит после заглатывания 60 мг растворимого аэрозоля или 1400 мг нерастворимого.

Таблица 3. Максимальное количество урана в почках (мг) в результате вдыхания или заглатывания одного грамма уранового аэрозоля^a.

	Размер аэрозоля ^б (мкм)	Растворимый ^в	Нерастворимый ^г
Вдыхаемый	0.2	58	0.22
	1	48	0.49
	5	61	1.1
Проглоченный		5.4	0.22

а) При вычислении использована модель для урана, приведенная в книге Международной комиссии по радиологической защите, “Limits on Intakes of Radionuclides by Workers”, *ICRP Publication 30, Part 1* (Oxford: Pergamon Press, 1978).
б) Средний аэродинамический активный диаметр.
в) Легкие очищаются в течение дней.
г) Легкие очищаются в течение годов.

Не сообщалось о токсичных эффектах при таком уровне облучения ураном, который требуется для нанесения вреда почкам. Впрочем, было проведено гораздо меньше исследований по влиянию малых доз от урана, нежели от свинца. В случае свинца значительные биохимические и неврологические эффекты наблюдались на уровнях содержания в крови, в 5-10 раз меньших по сравнению с теми, когда причинялся вред почкам. Поэтому мы не можем исключить возможности, что значительно меньшие количества урана могут обладать вредным, но пока что непонятным воздействием на здоровье.

В Табл.4 приведены максимальные количества аэрозоля ОУ, которые можно вдохнуть или проглотить в единичном случае в зависимости от размера частиц аэрозоля и процентного содержания урана в растворимой форме, на основе профессиональных стандартов как для излучения, так и для токсичности. Воздействие в меньших количествах не приведет к дозам облучения или концентрации урана в почках, которые превысят допустимые текущие профессиональные стандарты в США. Для аэрозолей, образующихся при пожарах, когда 3-7% урана находится в растворимой форме, предел составляет 56-110 мг в зависи-

мости от размера частиц аэрозоля, а для аэрозолей, образующихся при ударе (17-43% в растворимой форме), предел составит 12-36 мг.

Индивидуальное облучение

Оценки облучения отдельных лиц находящимися в воздухе аэрозолями ОУ затруднительны, поскольку концентрации очень чувствительны к деталям их возникновения, погодным условиям и другим факторам. Мы используем сочетание грубых оценок и испытательных данных для оценки дозы, которую могут получить отдельные лица в разных обстоятельствах.

Таблица 4. Максимальное количество ОУ, которое можно вдохнуть или проглотить (мг) без нарушения профессиональных стандартов США на излучение или токсичность.

Доля растворимых форм ^а	Вдыхание			Проглатывание
	0.2 мкм	1 мкм	5 мкм	
0	54 ^б	110 ^б	290	1400
5	57 ^б	110	76	650
10	51	80	44	420
15	35	41	31	310
25	21	25	19	200
50	11	13	10	110

а) Легкие очищаются в течение дней.

б) Предел устанавливается дозой облучения (ЭЭД 5 бэр в год, для все других органов 50 бэр в год). Остальные пределы определяются химической токсичностью (0.1 мкг/г в почках).

Вне поврежденных транспортных средств. Сначала рассмотрим случай, когда одиночный пенетратор из ОУ ударяется о твердую цель. Как отмечалось выше, во время такого удара 20% массы пенетратора может быть преобразовано в способный к вдыханию аэрозоль. Прежде всего этот аэрозоль начнет распределяться внутри облака, образовавшегося при соударении. Поскольку кинетическая энергия пенетратора очень быстро преобразуется в тепло (меньше, чем за миллисекунду), разумно предположить, что облако будет иметь, грубо говоря, те же характеристики, какие типичны для взрыва эквивалентного количества ВВ.

Чарч приводит следующие эмпирические соотношения для высоты H (м) и радиуса R (м) облака, образованного при взрыве ВВ³⁵:

$$H = 76W^{0.25} \quad R = 35W^{0.375} \quad (2)$$

где W - мощность взрыва в фунтах тротилового эквивалента. Эксперименты показали, что около 5% аэрозоля в первое время находятся между почвой и высотой $H/4$ ³⁶. Поэтому средняя концентрация аэрозоля около почвы χ (миллиграммы на кубический метр) составляет примерно

$$\chi \approx \frac{0.05 f_i M}{\pi R^2 (H/4)} = \frac{68 f_i M}{W} \quad (3)$$

где M – масса пенетратора (кг), а f_i - доля ее, превратившаяся в аэрозоль, который можно вдыхать.

А теперь рассмотрим человека, стоящего на открытом месте непосредственно с подветренной стороны от центра облака. Облако накроет его на время $t \cong 2R/u$, где u - скорость ветра (м/с). Полное количество вдыхаемого аэрозоля I (мг) за это время составит

$$I = \chi t b = \frac{2R\chi b}{u} = \frac{480f_i M b}{u W^{0.625}} \quad (4)$$

где u - скорость дыхания ($\text{м}^3/\text{с}$). Поэтому, если $f_i M = 1 \text{ кг}$, $u = 1 \text{ м/с}$, а $b = 3.3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, то $I = 0.16W^{-0.625}$. Более высокие значения W приводят к меньшим вдыхаемым дозам, поскольку выделяемая энергия разбрасывает аэрозоль и снижает концентрацию.

Как отмечено выше, кинетическая энергия пенетратора диаметром 120 мм эквивалентна трем фунтам тротила. Если при ударе теряется вся кинетическая энергия, максимальное вдыхаемое количество составит 0.08 мг ($u = 1 \text{ м/с}$). Если только 10% кинетической энергии потеряется при ударе (но доля массы пенетратора, переходящая в аэрозоль, останется равной 20%), максимальное вдыхаемое количество составит 0.3 мг. Аналогичные вычисления для снаряда из ОУ диаметром 30 мм при условии, что теряется четверть кинетической энергии (15 граммов тротила) приводят к максимальной вдыхаемой дозе 0.08 мг. Как отмечалось ранее, человек может вдохнуть 12-36 мг аэрозоля ОУ (из которых 17-43% находятся в растворимой форме), не доходя до порога 1 ppm урана в почках. Отдельному лицу на открытом воздухе пришлось бы находиться очень близко к аэрозольному облаку, возникшему от ударов 40-500 таких пенетраторов, чтобы вдохнуть столь большое количество аэрозоля ОУ. Такой сценарий кажется маловероятным.

Более правдоподобной является ситуация, когда отдельные лица облучаются на более далеких расстояниях от аэрозольных облаков, вызванных ударами сотен танковых снарядов или тысячами снарядов скорострельных авиапушек.

Можно воспользоваться стандартными гауссовскими моделями облака для оценки количества аэрозоля, которое вдохнут лица, находящиеся с подветренной стороны от места образования аэрозоля, при различных условиях. В Табл.5 приведены результаты одной из таких моделей для незащищенного человека, расположенного четко с подветренной стороны от места образования 1 кг аэрозоля, который можно вдыхать³⁷. Такое количество аэрозоля может быть образовано от удара о прочную цель одного танкового снаряда или, примерно, 20 снарядов скорострельной пушки. На расстоянии в 1 км вдыхаемая доза составит только 2-26 микрограмм, что в 500-20000 раз меньше, чем 12-36 мг, полученные ранее. На расстоянии в 10 км дозы будут меньше еще в 10 раз.

В операции "Буря в пустыне" всего было выпущено 4000 танковых снарядов и 800000 снарядов скорострельных пушек по большой площади. Тот, кому каким-то образом удалось бы находиться в 10 км *строго с подветренной стороны* от каждого из этих ударов при *наихудших* погодных условиях, вдохнул бы в себя менее 15 мг ОУ. Значит, фактически невозможно, чтобы любой американский солдат, находившийся вне поврежденного транспортного средства, смог вдохнуть опасное количество аэрозоля ОУ от попаданий пенетраторов. Кажется маловероятным, чтобы даже иракские солдаты на дороге смерти между городом Кувейт и Басрой, которые не находились в транспорте, подбитом боеприпасами с ОУ, смогли получить дозы, превышающие американские профессиональные стандарты по излучению и токсичности.

В отличие от соударений, которые происходили на больших площадях, при пожарах может произойти облучение находящихся рядом лиц аэрозолями от сотен горящих боеприпасов. Например, 11 июля 1991 г, 660 снарядов диаметром 120 мм попали в огонь в лагере Дохоа (17 км восточнее города Кувейт). Это событие, по-видимому, представляет из себя сценарий близкого к наихудшему случая. Тем не менее, многие из снарядов перенесли пожар без взрыва или сгорания, а многие из ОУ-пенетраторов в взорвавшихся или сгоревших снарядах были найдены в неповрежденном или почти неповрежденном виде.

При экспериментальных пожарах, о которых говорилось выше, менее 0.025% массы ОУ было преобразовано в аэрозоль, пригодный для вдыхания, и только 3-7% его было в растворимых формах. Прилагая эту долю выделения к 660 снарядам, пострадавшим при пожаре в Дохоа, получаем, что всего выделилось менее 1 кг способного к вдыханию аэрозоля, а это меньше, чем от соударения с прочной целью одного пенетратора.

В Табл.6 приведено количество аэрозоля, который может попасть в легкие, вдыхаемое отдельными лицами, находящимися строго с подветренной стороны от пожара, где образуется 1 кг такого аэрозоля. Хотя размер и высота начального облака и время, в течение которого происходит выделение аэрозоля, очень отличаются случая взрывного выделения аэрозоля, получаемые дозы оказываются примерно такими же. Даже если бы количество

выделившегося аэрозоля было в десять раз больше, то количество попавшего в легкие аэрозоля на порядки величины окажется меньше порогов для профессионального облучения³⁸

Таблица 5. Вдыхаемый отдельными лицами ОУ (мкг) с подветренной стороны от места выделения 1 кг аэрозоля ОУ, который может попасть в легкие, в результате удара одного пенетратора диаметром 120 мм ($W = 130-1300$ г) или семнадцати пенетраторов диаметром 30 мм ($W = 13$ г)^а.

Расстояние (км)	Наихудшая погода ^б			Обычная погода ^в		
	13 г	130 г	1300 г	13 г	130 г	1300 г
0.1	200	59	18	54	22	8.4
0.2	120	42	13	32	15	5.9
0.5	54	22	7.4	11	6.9	3.4
1	26	12	4.5	4.3	3.2	1.9
2	8.8	5.4	2.3	1.5	1.3	0.93
5	1.4	1.3	0.74	0.40	0.36	0.30
10	0.32	0.37	0.30	0.18	0.14	0.13

а) Источник :HOTSPOT 98 в предположении, что условия местности обычны, скорость распространения выпадения аэрозоля 0.01 м/с, время накопления 10 минут, скорость вдыхания $3.3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.
б) Скорость ветра 1 м/с, высота смешивания 250 м.
в) Скорость ветра 5 м/с, высота смешивания 1000 м.

Таблица 6. Количество вдыхаемого отдельными лицами ОУ (мг) с подветренной стороны от места выделения 1 кг способного попасть в легкие аэрозоля, образованного при пожаре^а.

Расстояние (км)	Наихудшая погода ^б		Обычная погода ^в	
	Тление ^г	Сильный огонь ^д	Тление ^г	Сильный огонь ^д
0.1	25	54	11	14
0.2	16	44	7.9	10
0.5	6.9	25	3.8	4.9
1	3.1	13	1.8	2.4
2	1.1	4.6	0.79	0.98
5	0.18	0.79	0.23	0.30
10	0.04	0.16	0.09	0.12

а) Источник: HOTSPOT 98 в предположении, что условия местности обычны, скорость распространения выпадения аэрозоля 0.01 м/с, скорость вдыхания $3.3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, радиус выделения аэрозоля 50 м.
б) скорость ветра 1 м/с, высота смешивания 250 м.
в) скорость ветра 5 м/с, высота смешивания 1000 м.
г) темпы тепловыделения 10^4 кал/с в течение 5 часов.
д) темпы тепловыделения 10^5 кал/с в течение одного часа.

Внутри поврежденных транспортных средств. Гораздо более высокие дозы возможны внутри поврежденных транспортных средств, поскольку ветер медленно рассеивает аэрозоль. Измерения, проведенные внутри танка М1А1 после попадания одного пенетратора из ОУ диаметром 120 мм, соответствовали средним и максимальным попаданиям в организм (в течение 15 минут) 12 и 26 мг, соответственно³⁹. Оценки, полученные в результате измерения концентрации урана в моче 14 солдат, находившихся внутри поврежденных транспортных средств, но не были ранены осколками, совместимы с вдыханием примерно 25 мг ОУ⁴⁰. Принимая во внимание различные неопределенности и возможность нескольких попаданий пенетратора, можно предположить, что лица внутри поврежденного транспортного средства могут вдохнуть 50 мг аэрозоля ОУ или больше. В соответствии с табли-

цами 2 и 3 вдыхание 50 мг аэрозоля (у которого 17-43% находится в растворимой форме) приведет к 50-летнему ЭЭД до 4 бэр и к концентрации урана в почках до 4 ррт. Доза облучения не станет серьезной причиной для тревоги, но возможность повреждения почек или иных токсичных эффектов окажется такой причиной.

Кроме вдыхания аэрозоля лица в поврежденных транспортных средствах могут оказаться ранеными осколками урана. Такие осколки дают большую дозу облучения в относительно малом объеме окружающей ткани. По мере постепенного растворения осколков в жидкости тела уран переносится также к другим органам и выделяется в почках. У ветеранов войны, получивших ранения от осколков, наблюдалось при мочеиспускании до 70 микрограмм урана в день в течение трех лет после ранения⁴¹. Столь высокие темпы выделения можно связать только с постепенным растворением застрявших в теле осколков, а не с вдыханием аэрозоля⁴². Выделение 70 мкг в день подразумевает равновесную концентрацию в почках порядка 0.5 ррт, что в 6 раз ниже порога 3 ррт, при котором возникают повреждения почек⁴³. ЭЭД от урана, попадающего в кровь со скоростью 70 мкг в день, меньше, чем 0.05 бэр в год, а полная доза за 50 лет будет меньше 2 бэр⁴⁴.

Дозу облучения от самих осколков труднее оценить прямыми путями. Если осколки имеют вид многочисленных мелких кусочков металлического урана размером около 0.1 мм, то доза за 50 лет для мускула будет порядка 100 бэр на грамм оставшихся в теле осколков, что приводит к ЭЭД около 6 бэр на грамм осколков⁴⁵. Если, с другой стороны, осколки имели бы размер в 1 мм, дозы в пересчете на один грамм ОУ будут в 10 раз меньше. В любом случае доза от осколков передается очень малому объему ткани и связанный с этим риск, как представляется, будет меньше, чем при эквивалентной однородно распределенной дозе⁴⁶.

Отвлекаясь от риска облучения обедненным ураном, отметим, что вероятность смерти или серьезного ранения очень велика внутри транспортного средства, пораженного противотанковым оружием. Из 113 солдат, которые находились во время войны в Персидском заливе внутри американских транспортных средств, пораженных пенетраторами с ОУ, 13 были убиты, а 50 ранены – полная доля поражения превышает 50%⁴⁷. По сравнению с этим риск от облучения ОУ очень мал.

К последней категории облучения относятся люди, входившие в транспортное средство после его повреждения либо для спасения товарищей, выноса боеприпасов или оборудования, либо для очистки или ремонта поврежденного транспорта. Если входить в зараженный транспорт в защитной одежде и масках, не возникнет внутреннего облучения, а внешняя доза окажется очень малой. Может оказаться необходимым войти в транспортное средство немедленно и без защитной одежды (например, для спасения), но кажется маловероятным, чтобы спасатели вдохнули больше ОУ, чем те, кто был внутри при повреждении.

К сожалению, похоже, что во время войны в Персидском заливе многие солдаты проникли внутрь поврежденных вражеских транспортных средств в погоне за сувенирами, обеззараживали американские средства, поврежденные боеприпасами с ОУ, или очищали участки территории, загрязненные при сгорании боеприпасов с ОУ, не пользуясь эффективными средствами защиты. Анализ содержания урана в моче вскоре после облучения был бы лучшим путем для оценки величины соответствующих доз. Но таких тестов не проводилось в течение почти двух лет после облучения, а потом концентрации вернулись к фоновому уровню.

Очень трудно оценить дозу при операциях по очистке. Рассмотрим в качестве гипотетического примера внутренность транспортного средства, загрязненное ста граммами аэрозоля ОУ – это 2% массы пенетратора с ОУ диаметром 120 мм и 10% массы всего аэрозоля. Возможно, во время очистки в любой заданный момент времени 1% аэрозоля может оказаться во взвешенном состоянии. Если внутренний объем равен 10 кубическим метрам, концентрация аэрозоля в воздухе составит 100 мг на кубометр. Человек, совершающий умеренную по трудности работу, вдыхает полтора кубометра воздуха в час и вдохнет вместе с ним 150 мг ОУ в час. Считая, что от 17 до 43% аэрозоля находится в растворимой форме, получим, что порог для постоянной опасности почкам (это 40 мг растворимого аэрозоля урана) будет превзойден за 40-90 минут. Хотя действительная концентрация поднимающегося в воздух аэрозоля может быть в десять или более раз ниже, полное время облучения может быть в десять или более раз выше. Это подчеркивает важность соответствующе-

го образования, использование защитного оборудования и недопущение незащищенного персонала к входу в загрязненные транспортные средства или на загрязненные участки.

Облучение населения

Возникшие при ударах или пожарах аэрозоли могут переноситься ветром на расстояния вплоть до сотни км или дальше до осаждения на почву, растительность или на иные поверхности. Окружающее население может подвергнуться облучению от вдыхания аэрозолей из проходящих облаков или поднявшихся в воздух аэрозолей, или от проглатывания ОУ, находящегося в зараженной воде или пище.

Вдыхание. Концентрация аэрозолей ОУ в конкретной точке зависит от многих переменных, включая стабильность атмосферы, скорость ветра, осадки, вид местности, а также размер и высоту начального аэрозольного облака. Были разработаны модели рассеивания в атмосфере для предсказания концентрации с подветренной стороны от места выброса аэрозоля. Однако, в ситуациях, подобных нашей, можно гораздо лучше почувствовать оценки на основе исключительно простой модели рассеивания в атмосфере – т.н. “клиновой модели”⁴⁸. Простота получаемых на основе этой модели результатов следует из того факта, что (если риск заболевания раком линейно пропорционален дозе) полное число раковых случаев будет зависеть только от полного количества ОУ, которое попало в легкие населения, а не от распределения доз среди населения. Точность предсказания клиновой модели в подобных приложениях обычно сравнима с тем, что дают более сложные модели, потому что большая часть заболеваний раком связаны с очень малыми дозами, полученными на больших расстояниях от места выделения аэрозоля.

На основе клиновой модели получаем, что доза для населения D_i (человек-бэр) при вдыхании ОУ из проходящих облаков аэрозоля составляет⁴⁹:

$$D_i = \frac{C_i f_i M \rho b}{v} \quad (5)$$

где C_i - коэффициент преобразования дозы при вдыхании ОУ (бэр на грамм), M – масса ОУ (тонны), f_i - доля выделенного аэрозоля, которая может попасть в легкие, ρ - средняя плотность населения (км^{-2}), b – средняя скорость дыхания ($\text{м}^3/\text{с}$), а v - средняя скорость осаждения аэрозоля ОУ ($\text{м}/\text{с}$)⁵⁰. Средняя скорость дыхания у взрослого человека, занятого легкой работой, составляет $3.3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ (1.2 м^3 в час). Наблюдаемые скорости осаждения аэрозолей при отсутствии осадков лежат в диапазоне $0.001 - 0.1 \text{ м}/\text{с}$ в зависимости от размеров частиц аэрозоля и его состава, скорости ветра, характера местности и покрытия почвы; для аэрозолей с размером частиц один микрон средняя скорость составляет, грубо говоря, $0.01 \text{ м}/\text{с}$ ⁵¹.

Вернемся к предыдущему примеру. Если 10% из 300 тонн ОУ были преобразованы в аэрозоль микронного размера и 25% аэрозоля находится в растворимой форме ($C_i = 35$ бэрг, $v = 0.01 \text{ м}/\text{с}$), причем аэрозоль рассеян по территории со средней плотностью населения 50 человек на квадратный километр, то доза для населения при вдыхании во время прохождения облака составит примерно 2000 человек-бэр, что достаточно (в соответствии с линейной моделью) для вызова одной добавочной смерти от рака. Мы считаем, что это относительно консервативная (т.е. завышенная) оценка дозы для населения от использования ОУ во время войны в Персидском заливе, но неопределенности очень велики. Доля аэрозоля, выделенная в растворимой форме, может вдвое выше или в десять раз ниже, а плотность населения в зараженной зоне может оказаться значительно меньше, чем средняя по всему региону. Более мелкие и менее растворимые аэрозоли ($C_i = 80$ бэрг, $v = 0.05 \text{ м}/\text{с}$) приведут к более высокой (в десять раз) дозе для населения, а более крупные и более растворимые аэрозоли ($C_i = 8$ бэрг, $v = 0.002 \text{ м}/\text{с}$) уменьшат дозу в 20 раз. Если рассмотреть все возможные случаи, то реальная доза для населения в данном случае будет составлять скорее всего от 40 до 20000 человек-бэр.

Распыление. Почва под облаком будет покрываться тонким слоем ОУ в виде пыли, которую поднимает в воздух ветер или проезжающий транспорт, так что ее снова можно вдыхать. Впрочем, за период в несколько лет аэрозоль впитается в грунт или пристанет к

частицам большего размера. Для местного населения доза от вдыхания распыленного ОУ может иметь тот же порядок величины, что и доза во время прохождения облака. Для проезжающих людей такая доза от распыления будет значительно меньше, чем начальная доза от вдыхания.

На основе клиновой модели получаем дозу от распыления D_r (человек-бэр)⁵²:

$$D_r = C_i f_i M_{pb} \int K(t) dt \quad (6)$$

где фактор распыления K (m^{-1}) – это отношение концентрации распыленного аэрозоля в воздухе ($г/м^3$) к концентрации аэрозоля на почве ($г/м^2$). Фактор распыления, как правило, уменьшается со временем из-за погодных условий. Наблюдаемые значения K меняются в интервале восьми порядков величины в зависимости от климата (ветер, дождь, циклы заморозков и таяния), механических возмущений, покрытия грунта, размеров аэрозоля и его химического состава, а также от иных факторов⁵³.

Фактор распыления часто выражают в виде суммы краткосрочного (спадающего по экспоненте) и долгосрочного членов:

$$K(t) = K_0 e^{-t/\tau} + K_{\infty} \quad (7)$$

В опубликованных в течение 70-х гг. докладах приведены значения K_0 , K_{∞} и τ , которые после интегрирования за 50 лет приводят к значениям $\int K$, лежащим в интервале от 60 до 800 $с/м$ ⁵⁴. На основе данных от событий в Чернобыле Национальный совет по защите от излучения и измерениям рекомендовал недавно следующие варианты:

$$K(t) = \frac{10^{-6}}{t} \quad 1 \leq t \leq 1000 \quad (8)$$

$$K(t) = 10^{-9} t > 1000$$

где t измеряется в днях⁵⁵. При интегрировании за 50 лет уравнение (8) дает значение $\int K$, равное 2 $с/м$. Если в приведенном выше примере, связанном с выделением 30 тонн аэрозоля ОУ, предположить, что $\int K$ равен 2-800 $с/м$, доза для населения от распыления составит 30-14000 человек-бэр.

Проглатывание. В сельскохозяйственных районах типа Косово использование боеприпасов с ОУ могло бы привести к появлению слоя пыли на растительности, которую могли бы съесть люди или животные, входящие в пищевую цепочку человека.

ОУ может также просачиваться в пищевую воду. Впрочем, проглатывание не кажется важным вкладом в дозу для населения, так как подвергшиеся атмосферному воздействию аэрозоли оказываются относительно нерастворимыми. (Даже та фракция, которую раньше называлась растворимой, будет в результате окисления в окружающей среде переходить в нерастворимые формы.) Фактически вся доза для населения в результате проглатывания возникает из-за потребления продуктов, загрязненных прямым откладыванием на поверхность листьев или во время прохождения облака, или при распылении.

Доза для населения от иных путей проглатывания (поглощение корнями продуктов сельского хозяйства, использование молока или мяса от животных, которые принимали загрязненную еду, попадание в желудок загрязненной почвы или воды) очень мала и ею можно пренебречь⁵⁶.

Если предположить, что $с/х$ продуктов, растущих в загрязненном районе, достаточно для полного обеспечения питанием живущего там населения, доза для населения D_g от попадания аэрозолей ОУ на продукты и фураж дается следующим выражением⁵⁷:

$$D_g = C_g f_g M_p \tau_v [1 + v \int K(t) dt] \frac{U_p r_p}{Y_p} \quad (9)$$

где C_g - фактор преобразования дозы при проглатывании ОУ (бэр/г), f_g - доля ОУ, преобразованная в проглоченный аэрозоль, τ_v - среднее время пребывания пыли ОУ на растительности (в годах), U_p - среднее ежегодное потребление продукта (кг в год) на душу населения, r_p - доля пыли ОУ, оставшаяся на продукте и фураже, а Y_p - урожайность (в килограммах продукта на квадратный метр). Типичные значения таковы: $\tau_v = 0.06$ года, $U_p = 200$ кг/год, $r_p = 0.2$ и $Y_p = 0.7$ кг/м²⁵⁸. Уравнение (9) предполагает, что длительность сезона созревания больше, чем τ_v , и что начальное загрязнение обедненным ураном распределяется по сезону созревания⁵⁹.

Как показано в Табл.2, фактор преобразования дозы зависит от растворимости аэрозоля ОУ. Если растворима четверть аэрозоля, $C_g = 0.03$ бэр/г. Если вернуться к примеру из войны в Персидском заливе, где $f_g = 0.2$, $M = 300$ тонн, $\rho = 50$ км⁻², $v = 0.01$ м/с и $\int K = 100$ с/м, доза для населения от проглатывания составит примерно 600 человек-бэр. Неопределенность в этой оценке очень велика, но оценка служит для иллюстрации того, что проглатывание ОУ, вообще говоря, менее важно, чем вдыхание⁶⁰.

ВЛИЯНИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Наконец, иногда утверждается, что применение боеприпасов с ОУ приводит к серьезному отрицательному воздействию на растения и животных. Полное изучение такой возможности потребует анализа экологии, геологии и гидрологии конкретных районов, где мог быть рассеян ОУ, а это выходит за рамки данной статьи.

Но тот факт, что естественный уран распространен в почве и его концентрация не является постоянной, заставляет нас сомневаться в серьезных последствиях рассеяния ОУ для окружающей среды. Средняя концентрация урана в почвах США составляет 1.8 миллионных весовых долей в пределах 1-4 ppm. В некоторых районах мира обнаружены более высокие концентрации (до 10 ppm. Если рассматривать только самые верхние 10 см почвы (т.н. слой перемешивания), средняя концентрация в почвах США составит 0.3 г/м² с точностью до множителя порядка двойки в ту и другую стороны.

Во время войны в Персидском заливе было использовано 300 тонн ОУ на площади в несколько тысяч квадратных километров, что дает среднюю концентрацию порядка 0.1 г/м². Хотя на некоторых участках концентрации могут быть значительно выше, только часть ОУ (возможно, 10%) находится в виде биологически доступных аэрозоля или пыли. Остальное содержится в неповрежденных (или почти неповрежденных) пенетраторах с металлическим ураном, значительная часть которых погребена в почве. И хотя заметная часть аэрозолей, возникших при попадании, в начальные моменты является растворимой, она впоследствии окисляется в окружающих условиях и переходит в нерастворимые химические формы. Более того, радиационные дозы для животных при внутреннем облучении обедненным ураном составляют только примерно половину от того, что дает естественный уран (в расчете на миллиграмм урана, который вдыхался или проглатывался), а внешняя доза облучения от ОУ меньше, чем от естественного урана в почве, в десять раз или еще ниже (в расчете на грамм урана на квадратный метр почвы)⁶¹. Итак, при усреднении по разумно крупным районам оказывается, что влияния ОУ на окружающую среду скорее всего кажутся возмущениями, сходными по величине с изменениями концентрации естественного урана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если подытожить сказанное, то лица, которые не находились в поврежденных боеприпасами из ОУ транспортных средствах или не входили в них после повреждения, получают дозы облучения, низкие по сравнению с дозами от естественного фона. К тому же поглощение урана организмом количественно оказывается гораздо ниже порогов наблюдения токсичных эффектов. Радиационная доза для всего населения также совсем низка, Полная доза для населения от применения ОУ во время войны в Персидском заливе составляет по порядку величины 3000 человек-бэр, что вероятнее всего приведет к одной или двум смертям от рака. Если распределить эту дозу среди миллиона людей, то средняя индивидуальная доза составит 3 миллизбэра – это около 1% от средней ежегодной фоновой дозы. Из-за

многих неопределенностей доза может оказать в десять раз выше или (что более вероятно) в десять раз ниже. Даже на верхнем пределе такого разброса риск от ОУ для всего населения малю

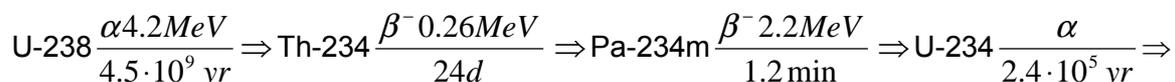
Наиболее облучившиеся солдаты (те, кто находился внутри поврежденных боеприпасами из ОУ бронированных транспортных средств или входил в них после повреждения, и те, кто участвовал в очистке таких средств без защитного оборудования) могли получить достаточно большие дозы и пострадать от известных химических токсичных воздействий, вызываемых ураном. Если боеприпасы из ОУ будут опять применяться в будущем, надо заранее обучать и экипировать соединения, предназначенные для очистки.

Загрязненные транспортные средства и обломки пенетраторов из ОУ, оставленные на поле боя, представляют из себя "привлекательные помехи". Любопытные прохожие (как взрослые, так и дети) будут залезать в транспортные средства и поэтому окажутся подверженными потенциально значительным дозам облучения ураном от поднявшейся в воздух или проглоченной аэрозольной пыли. Обломки пенетратора могут быть подобраны и взяты домой в качестве сувениров. США удалили небольшое число своих бронированных транспортных средств, пораженных "дружескими" боеприпасами из ОУ – они были либо очищены, либо захоронены. В отсутствие более дорогих попыток по очистке мы хотели бы предложить, чтобы все загрязненные обедненным ураном транспортные средства были залиты бетоном и захоронены, а обломки пенетраторов из ОУ были подобраны и захоронены как радиоактивные отходы с низким уровнем активности.

ПРИЛОЖЕНИЕ А:

КАК ОЦЕНИТЬ "НА ПАЛЬЦАХ" ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

Уран-238 составляет 99.8% обедненного урана и излучение от него и продуктов его распада доминирует при определении доз облучения от обедненного урана. Ниже приведена основная цепочка распада урана-238 (над чертой указаны тип излучаемой частицы и ее энергия, а под чертой – период полураспада):



Через несколько месяцев после получения чистого U-238 продукты его распада Th-234 и Pa-234m благодаря коротким периодам полураспада будут находиться в равновесии (то есть, иметь такую же активность) с U-238. Однако, из-за большого периода полураспада U-234 придется ждать более 100 000 лет, чтобы его активность и активность продуктов его распада выросли до такого же уровня. В результате в течение тысяч лет после получения дозы от ОУ будут определяться распадами U-238, Th-234 и Pa-234m.

Внешняя доза от гамма-лучей

Альфа-распад U-238 не сопровождается заметным излучением гамма-лучей. При бета-распаде Th-234 образуются гамма-лучи низкой энергии; наиболее важные обладают энергией 0.063 МэВ (3.9% распадов), 0.093 МэВ (5.5%) и 0.113 МэВ (0.28%)⁶². Распад Pa-234m сопровождается гамма-лучами высокой энергии: 0.77 МэВ (0.21%) и 1.00 МэВ (0.65%)⁶³. С учетом более слабых распадов с аналогичной энергией получаем, что при распаде Th-234 примерно образуется 0.1 гамма-кванта со средней энергией 0.08 МэВ на распад, а при распаде Pa-234m - 0.009 гамма-кванта со средней энергией 1 МэВ.

Скорость выделения энергии гамма-лучей от i-го изотопа в цепочке распада U-238 R_i (Дж/м²·год) над плоской бесконечной плитой, равномерно загрязненной одной тонной U-238 на квадратный километр (1 г/м²), дается выражением:

$$R_i = \frac{(6.0 \cdot 10^{23})(1.6 \cdot 10^{-13})}{A \tau} f_i E_i = 0.063 f_i E_i \quad (\text{A-1})$$

где $6.02 \cdot 10^{23}$ - число ядер на моль, $1.6 \cdot 10^{-13}$ - число джоулей на МэВ, A – атомный вес U-238 (238 г на моль), τ - среднее время жизни: $\tau = 4.5 \cdot 10^9 / \ln(2) = 6.5 \cdot 10^9$ лет, f_i – число гамма-лучей, испускаемых при распаде i -го изотопа в цепочке распада, а E_i - соответствующая усредненная энергия гамма-лучей.

Скорость поглощения энергии на кг ткани на высоте h над загрязненной плитой от гамма-лучей, испущенных i -ым радиоизотопом с квадратного метра поверхности, удаленного на расстояние r , $P_i(r, h)$ (Дж/кг.год) дается выражением:

$$P_i(r, h) = \frac{R_i}{4\pi(r^2 + h^2)\lambda_t \rho_t} \exp\left[-\frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{\lambda_{ai}}\right] \quad (A-2)$$

где λ_t - средняя глубина ослабления энергии в ткани (примерно 0.3 м для гамма-лучей с энергией 0.08 и 1.0 МэВ)⁶⁴, ρ_t - плотность ткани (примерно 10^3 кг/м³, а λ_{ai} - средняя длина поглощения энергии гамма-лучей в воздухе. На уровне моря плотность воздуха равна 1.2 кг/м³ и λ_{ai} составляет 360 м для гамма-лучей с энергией 0.08 МэВ, а для гамма-лучей с энергией 1.0 МэВ эта величина равна 300 м⁶⁵.

Интегрирование уравнения (A-2) в пространстве над плитой приводит к величине дозы

$$P_i(h) = \int_0^\infty P_i(r, h) dr = \frac{R_i}{2\lambda_t \rho_t} \ln\left(\frac{\lambda_{ai}}{h}\right) = 10^{-4} f_i E_i \ln\left(\frac{\lambda_{ai}}{h}\right) \quad (A-3)$$

Если положить $h = 1$ м и вставить средние значения остальных параметров для Th-234 и Pa-234m, получим приближенное значение для величины P , равное одному миллибэру в год:

$$P = 10^{-4} [(0.1)(0.08)\ln(360) + (0.009)(1.0)\ln(300)] = 10^{-5} \text{ Дж/(кг.год)}$$

с учетом того, что 1 миллибэр равен 10^{-5} Дж/(кг.год). Для сравнения отметим, что более точный результат, полученный в основном тексте, составляет 1.3 миллибэра в год.

Внутренняя доза

Мы рассчитали радиационные дозы от внутреннего облучения на основе респираторной модели МКРЗ (с учетом внутреннего переноса). В этой модели дыхательная система разделена на три области – носоглотка (NP), трахеи и бронхи (ТВ) и легочная область (Р). Доля вдыхаемого материала, отложенного в первые моменты в каждой из этих областей, показана на рис. А1 в зависимости от эффективного диаметра частиц аэрозоля. При размере частиц 1 микрон 25% вдыхаемого материала попадает прямо в легкие.

Часть материала, отложенного в области легких, удаляется оттуда в составе слизи в желудочно-кишечный тракт, а остальная часть поглощается жидкостями тела либо непосредственно, либо при прохождении через легочные лимфатические узлы. На рис. 2А приведены основные выводы этой транспортной модели. Определены категории растворимости в соответствии с тем, насколько быстро аэрозоль растворится в жидкостях организма: в течение дней (D), недель (W) или лет (Y). Перенос материала между ячейками определяется в единицах доли массы аэрозоля, находящейся в первичной ячейке, и характерным временем переноса в другую ячейку. Оксиды урана UO_2 и U_3O_8 относятся к наиболее нерастворимому классу (Y), а UO_3 - к промежуточному классу (W).

Наиболее важные радиационные дозы от вдыхания нерастворимого уранового аэрозоля связаны с облучением легких. Около 60% нерастворимого аэрозоля, осаждаемого в легочной области (15% массы вдыхаемого аэрозоля) остается там со средним временем нахождения $500/\ln(2) = 720$ дней = 2 года; если включить сюда последующий перенос в легочные лимфатические узлы и удержание там, полное время сохранения этого материала в легких составит 4.2 года⁶⁶. Основная часть энергии, выделяемой ураном, заключена в аль-

фа-частицах с очень малым пробегом (4.2 МэВ на распад U-238). Канцерогенный эффект высокой плотности ионизации вдоль трека альфа-частицы, как считается, будет в двадцать раз выше, чем при энерговыделении гамма- и бета-лучами (в расчете на единицу выделенной энергии). Принимая во внимание этот "качественный фактор" в 20 Зв на Дж/кг (2000 бэр на Дж/кг), получим примерную оценку дозы в легких при вдыхании одного грамма урана-238:

$$\left(\frac{0.15g}{g_{inh}}\right) [(4.2yr)] \left(\frac{0.063decay.J}{g.yr.MeV}\right) \left(\frac{4.2MeV}{decay}\right) \left(\frac{2000rem}{J/kg}\right) (1kg)^{-1} = 330 \text{ бэр/г} \quad (A-4)$$

где 0.15 – часть вдыхаемого урана, оставшаяся в легких со средним временем пребывания 4.2 года (в предположении нерастворимого аэрозоля размером в один микрон), 0.063 – число распадов в год на грамм урана-238, умноженное на число джоулей в МэВ (см. уравнение A-1), а 1 кг – это масса легких у среднего взрослого человека. Отметим для сравнения, что табл.2 дает дозу в легких в 380 бэр на грамм вдыхаемого ОУ – различие связано с учетом распадов U-234 и U-235. Вклад облучения легких в ЭЭД (эффективную эквивалентную дозу) находится путем умножения легочной дозы на множитель 0.12 (это доля дополнительных смертей от рака из-за рака легких, возникшего при однородном облучении всего тела).

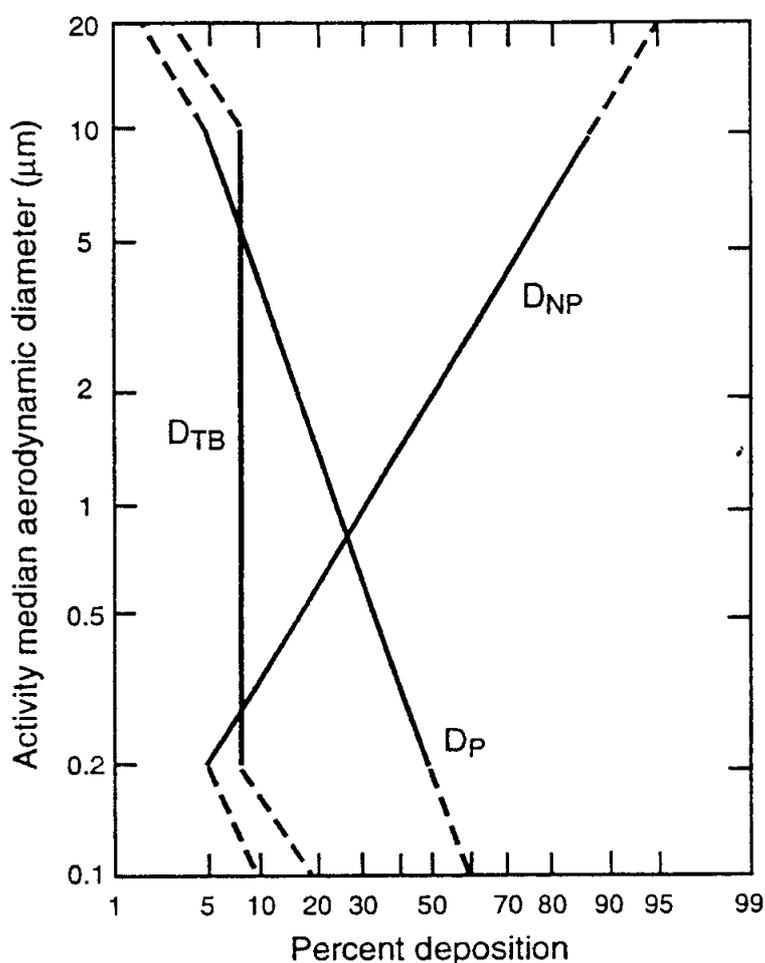


Рисунок А1. Доля вдыхаемого материала, откладываемая в зависимости от эффективного размера частиц аэрозоля в следующих областях: носоглотка (NP), трахеи и бронхи (TB) и легкие (P). По оси абсцисс отложены откладываемые доли (%), по оси ординат – эффективный размер частиц аэрозоля (в микронах).

Region	Compartment	Clearance Class					
		D		W		Y	
		T (day)	F	T (day)	F	T (day)	F
NP ($D_{NP} = 0.30$) ^a	a	0.01	0.5	0.01	0.1	0.01	0.01
	b	0.01	0.5	0.40	0.9	0.40	0.99
TB ($D_{TB} = 0.08$) ^a	c	0.01	0.95	0.01	0.5	0.01	0.01
	d	0.2	0.05	0.2	0.5	0.2	0.99
P ($D_P = 0.25$) ^a	e	0.5	0.8	50	0.15	500	0.05
	f	n.a.	n.a.	1.0	0.4	1.0	0.4
	g	n.a.	n.a.	50	0.4	500	0.4
	h	0.5	0.2	50	0.05	500	0.15
L	i	0.5	1.0	50	1.0	1000	0.9
	j	n.a. ^b	n.a.	n.a.	n.a.	infinite	0.1

^a Deposition fractions for AMAD = 1 μm .

^b n.a. = not applicable.

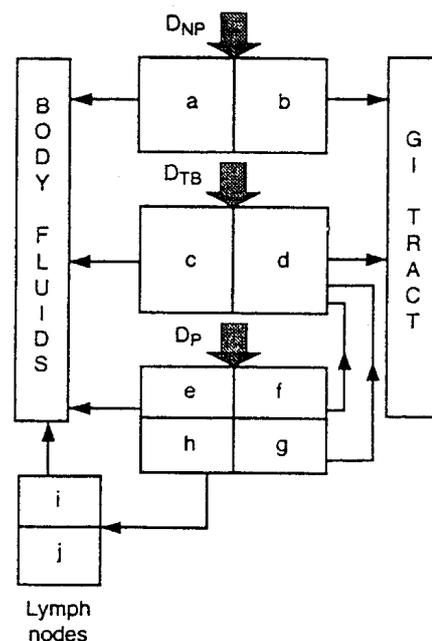


Рисунок А2. Итоги транспортной модели, показывающие характерное время растворения аэрозоля в жидкостях тела: дни (D), недели (W) или годы (Y). Символы Т и F обозначают, соответственно, биологическое время в днях (в течение которого интенсивность процесса уменьшится в два раза) и долевого коэффициента – эти символы относятся к указанной ячейке. Обозначения: а) класс растворимости, б) область (описание обозначений на рис.А1), в) ячейка, г) жидкости тела, д) желудочно-кишечный тракт, е) лимфатические узлы. В примечании (а) сказано, что приведенные доли соответствуют эффективному размеру аэрозоля один микрон; примечание (б) – неприменим к данному случаю.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. H.Caldicott, M.Kaku, J.Gould, and R.Clark, *Metal of Dishonor: How Depleted Uranium Penetrates Steel, Radiates People and Contaminates the Environment* (New York: International Action Center, 1997); G.Bukowski, D.A.Lopez, and F.M.McGehee, "Uranium Battlefields Home & Abroad: Depleted Uranium Use by the U.S. Department of Defense." (Reno, N.V: Citizen Alert, March 1993); F.Arbutnot, et al. "Depleted Uranium: A Post-War Disaster for Environment and Health" (Amsterdam: Laka Foundation, May 1999); Rob Edwards, "Too Hot to Handle", *New Scientist*, 5 June 1999; Bill Messler, "The Pentagon's Radioactive Bullet", *The Nation*, 21 October 1996, "Pentagon Poison: The Great Radioactive Ammo Cover Up", 26 May 1997, and "The Gulf War's New Casualties", 14 July 1997.
2. "Оружие из обедненного урана – это неприемлемая угроза жизни, нарушение международного закона и оскорбление человеческого достоинства. Чтобы защитить будущее человечества, мы призываем к безоговорочному международному запрету на исследования, производство, испытания, перевозку, владение и применение обедненного урана для военных целей", – так заявил Рамсей Кларк в международном призыве к запрету использования оружия из обедненного урана. Ему вторит Михаил Горбачев в статье "Яд в воздухе: надо раскрыть цену конфликта в Косово для окружающей среды", опубликованной в июне 1999 г. в лондонской газете "Гуардиан": "Мы должны запретить те виды оружия, использование которых может иметь особенно опасные и долговременные последствия для здоровья и окружающей среды. По-моему, оружие с обедненным ураном должно стать одним из первых для запрещения."

3. Смотрите, например, *Environmental Exposure Report: Depleted Uranium in the Gulf* (адрес в Интернете: <http://www.gulflink.osd.mil/du>), 31 July, 1998 и десятки сообщений, на которые там приведены ссылки. Отличную страницу в Интернете со многими соответствующими правительственными документами, нигде более не опубликованными, поддерживает ветеран войны в Персидском заливе Крис Корнквен (<http://www.globaldialog.com/~kornkven>).
4. Обзоры по влиянию урана на здоровье опубликованы также Министерством здравоохранения и медицинскими службами США (*Toxicological Profile for Uranium, TP-90-29, 1990*) и Национальной академией наук США (*Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-emitters -BEIR IV, Washington: National Academy Press, 1998*).
5. *Health and Environmental Consequences of Depleted Uranium Use in the U.S. Army: Technical Report.* (Atlanta, U.S. Army Environmental Policy Institute, Georgia Institute of Technology, June 1995), p.79 and A-10. (<http://aepi.gatech.edu/DU/chapter4.htm>).
6. Там же.
7. *Radiation Doses and Risk to Residents from FMPC Operations from 1951-1988* (Radiological Assessments Corporation Report 1-CDC-Fernald-1998-Final, 417 Till Road, Neeses, SC 29107), Vol.II, Fig.C-6.
8. Генетические повреждения от ионизирующего излучения должны также вызвать опасные мутации в яйчиках и сперме. Но в отличие от рака, у людей пока что не установлены статистически важные эффекты. *Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR V)*, 94-97, Washington, DC: National Academy Press, 1990.
9. Доза облучения всего тела, находящегося внутри бесконечной плиты радиоактивного материала, составит (миллибэр в час) $2.13 \cdot 10^9 S \sum_i f_i E_i T_i G_i$, где S – удельная активность ($3.85 \cdot 10^{-7}$ Ки/г), E_i – энергия i-го излученного фотона (МэВ), f_i - интенсивность этого излучения (число распадов в секунду), T_i - соотношение массовых коэффициентов поглощения энергии в ткани и в уране, G_i - доля энергии фотона, поглощенная во всем теле, а $2.13 \cdot 10^9$ – число распадов-грамм-миллибэр на МэВ-Кюри-час. Основную часть гамма-дозы дает излучение с энергией 1 МэВ от Pa-234m, для которого $f = 0.0059$, $T = 0.71$, а $G = 0.62$. Один бэр равен 0.01 Зв.
10. N.Harley, E.Foulkes, L.Hilborne, et al. 1999. *A Review of the Scientific Literature As It Pertains to Gulf War Illnesses; Vol.7 of Depleted Uranium, MR-1018/7-OSD.* (Santa Monica: RAND, 1999), tables G.1, G.2.
11. *Exposure of the Population of the United States and Canada from Natural Background Radiation*, Report No.94 (Bethesda, MD: National Council on Radiological Protection, 1987), p.148.
12. Коэффициенты перехода от дозы к ЭЭД для U-234, U-235, U-236 и U-238 с учетом вклада короткоживущих продуктов распада, находящихся в равновесии, составляют $1.20 \cdot 10^{-6}$, $7.42 \cdot 10^{-4}$, $9.43 \cdot 10^{-7}$ и $1.12 \cdot 10^{-4}$ бэр/с на Ки/м², соответственно. Смотрите работу Стива Феттера “Internal Dose Conversion Factors for 19 Target Organs and 9 Irradiation Times and External Dose-Rate Conversion Factors for 21 Organs for 144 Radionuclides” (Idaho Falls: EC&G, Inc., September 1991), p.135. Если умножить на удельные активности и на концентрации, приведенные в табл.1, получим 1.3 миллибэр в года на г/м² ОУ. Это соответствует облучению от однородно загрязненной бесконечной плоской почвы. Экранировка особенностями местности уменьшит среднюю дозу до значений ниже одного миллибэра в год.
13. Смотрите (11), стр.69.
14. Раздел 10 Свода федеральных правил США, Часть 20: Стандарты защиты от излучения, параграф D.20.1301: Предельные дозы для отдельных лиц.
15. Если транспортное средство было поражено двумя пенетраторами диаметром 120 мм, то в близлежащей зоне площадью 100 кв.м может находиться 10 кг осколков ОУ. Доза над бесконечной плоскостью, загрязненной ОУ с плотностью 100 г/м², составит 130 миллибэр в год; в данном случае ограниченное оседание уменьшит дозу примерно в четыре раза. Для сравнения отметим, что расчетное накопившееся осаждение урана от завода по производству делящихся материалов составляет около одного г/м² на расстоянии более нескольких км. Вблизи центра завода уровень осаждения был в сто раз выше (RAC Report, Fig.O-2).

16. Bureau of Radiological Health, *Radiological Health Handbook* (Rockville, MD: U.S. Department of Health, Education, and Welfare, January 1970), p.204. Поверхностная доза от бета-лучей для ОУ фактически такая же, что и для естественного урана, так как дочерние продукты распада U-238 являются основными бета-излучателями. Электрон с энергией 1 МэВ облетает пробегом в ткани, равным примерно 0.5 см.
17. Временная потеря волос наступает в результате краткосрочных доз облучения кожи около 300 бэр; постоянная потеря волос и ожоги первой степени появляются после кожных доз 600 бэр; ожоги второй степени соответствуют дозам от 1000 до 2000 бэр. {*Reactor Safety Study* (Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1975), p.F-13,14.} Оценки основаны на дозах, полученных в течение нескольких дней или менее. Доза от прямого контакта с ОУ настолько мала (менее 40 бэр в неделю), что даже непрерывный контакт с незащищенной кожей вряд ли вызовет любой из указанных симптомов по той же причине, что и в случае с загоранием на солнце, когда два часа загара в день образуют ожог, а две минуты загара в течение 60 дней ничего не образуют.
18. Оцениваемый рост клеток обычно несмертельных раковых новообразований кожной и чешуйчатой ткани при кожной дозе 100 бэр составляет $7.1 \cdot 10^{-6}$ см² на тех участках кожи, которые не подвергались солнечному облучению, и $3.3 \cdot 10^{-5}$ см² там, где облучение проходило. [*Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR V)* (Washington, DC: National Academy Press, 1990), p.327.] Таким образом, тот, кто сохраняет постоянный контакт с куском ОУ, приложенным к участку кожи площадью около 6 см², приобретет добавочный риск заболевания раком кожи порядка 0.1-0.5% на год облучения.
19. Как сказано в работе Хартли¹⁰, "Среди 18 869 белых мужчин, нанятых на работу в период между 1943 и 1947 гг. на завод по переработке и обогащению урана в Окридже (Теннесси), вплоть до 1974 г. не наблюдалось повышенной заболеваемости раком...В ряде других опубликованных эпидемиологических исследований рабочих на заводах по дроблению и металлической обработки урана либо не было обнаружено повышенной заболеваемости раком, либо указывалось на наличие других причин заболевания раком легких (радон и продукты его распада, курение сигарет), отличных от урана". Повышенная заболеваемость раком легких, наблюдаемая у рабочих на урановых шахтах, связывается с облучением газовым продуктом распада урана – радоном-222, и его короткоживущими продуктами распада, чьи концентрации нарастают в непроветриваемых шахтах.
20. Это справедливо, даже если существует порог (доза, ниже которой риск не нарастает) и пока он не превышает естественную фоновую дозу.
21. *Recommendations of the International Commission on Radiation Protection, Report No.60* (Oxford: Pergamon Press, 1991). Национальная академия наук США рекомендовала взвешенный по населению коэффициент риска в одну смерть от рака на 2500 человек-бэр при сроках облучения в несколько недель или месяцев. *Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR V)*, p.6.
22. Смотрите [11].
23. Основная часть внешней дозы от ОУ связана с гамма-излучением (с энергией 1 МэВ), которое образуется в 0.7% распада Pa-234m – продукта распада U-238. Экранирование складками местности может поначалу уменьшить дозу для населения в 2-4 раза. Со временем экранирование возрастает в результате погодных условий и обработки почвы. Пока большая часть массы ОУ будет находиться в обломках размерами менее 1 см, что кажется вероятным, самоэкранирование незначительно уменьшит дозу.
24. Кинетическая энергия снаряда диаметром 120 мм составит 5.6 МДж (при массе 5 кг и скорости 1500 м/с). Напомним, что при взрыве 1 кг тротила выделяется около 4 МДж.
25. Масса снаряда диаметром 30 мм составляет около 0.4 кг (из которых 0.3 кг ОУ, а остальная масса относится к стали и алюминию), а его скорость – около 1 км/с; кинетическая энергия эквивалентна примерно 50 г тротила.
26. Пенетратор диаметром 120 мм имеет длину около 0.5 м, так что его кинетическая энергия может выделиться примерно за 0.3 мс (при скорости 1500 м/с). Соответствующее время для 30-мм снаряда равно $(0.1 \text{ м}) / (1000 \text{ м/с}) = 0.1 \text{ мс}$
27. Смотрите доклады 6, 10, 22, 24 и 26 в "Research Report Summaries," Tab L, *Health and Environmental Consequences of Depleted Uranium Use in the U.S. Army*.

28. Там же, доклады 12, 16 и 24.
29. МКРЗ предполагает, что 12 и 0.052% урана, содержащегося в крови, попадают в почки, где они задерживаются со средним временем жизни 6 и 150 дней, соответственно; 20 и 2.3% попадают в кости и остаются там на 20 и 5000 дней, а 12 и 0.052% равномерно распределяются по всем остальным тканям и остаются в них в течение 6 и 1500 дней. См. "Limits for Intakes of Radionuclides by Workers", *ICRP Publication 30, Part 1* (Oxford: Pergamon Press, 1978), p.102-103. Более усложненная модель с параметрами для разных возрастных групп приведена в другой публикации МКРЗ "Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides", *ICRP Publication 71* (Oxford: Pergamon Press, 1995). Мы использовали параметры МКРЗ-30, поскольку мы в основном сосредоточены на солдатах, где в подавляющем большинстве находятся взрослые мужчины, и поскольку поправки на пол и возраст не нужны для наших оценок дозы для населения по порядку величины.
30. В докладе комиссии по радиологическим оценкам (табл.К-2) приведен расчет, из которого следует, что наиболее облучающийся житель вблизи завода по производству уранового топлива в Ферналде (Огайо) проживает в 1.7 км к северо-востоку от центра завода и за 42 года он получит ЭЭД около 5 бэр.
31. Человек должен вдохнуть по крайней мере 20 г аэрозоля ОУ, чтобы получить дозу, достаточную для ухудшения дыхательной деятельности, и гораздо большие количества ОУ, чтобы начали проявляться другие эффекты, например, тошнота или временное бесплодие. Ухудшение дыхания возможно при дозе в легких более 3000 бэр. Вдыхание 1 грамма нерастворимого аэрозоля ОУ приведет к дозе в легких порядка 30-160 бэр в течение первого года в зависимости от размера частичек аэрозоля. Тошнота и рвота наблюдались при облучении всего тела дозами свыше 25 бэр в день или 75 бэр в неделю; вдыхание одного грамма ОУ будет соответствовать облучению всего тела дозой 0.05 бэр в течение первой недели. Временное бесплодие наблюдалось при однократном облучении дозами менее 10 бэр или дозами менее 25 бэр в неделю; вдыхание одного грамма ОУ приведет к дозе в менее 0.01 бэра в течение первой недели. Эти соотношения взяты из сборника *Reactor Safety Study*, pp.9-11 – 9.20; коэффициенты преобразования доз вычислены авторами на основе модели МКРЗю
32. *Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-emitters (BEIR IV)* (Washington, DC: National Academy Press, 1988), p.283.
33. Пределы облучения эквивалентны среднему темпу вдыхания 0.34 мг/день растворимых урановых соединений или 1.7 мг/день нерастворимых. В соответствии с моделью МКРЗ до 60% вдыхаемого растворимого уранового аэрозоля и 10% нерастворимого попадают в кровь. Поэтому в обоих случаях скорость поступления в кровь составит около 0.2 мг/день. Затем 12 и 0.052% попавшего в кровь урана оседают в почках со средним временем пребывания 6 и 1500 дней. Таким образом, равновесная концентрация растворимых соединений урана в почках составит 0.4 мг: $0.2(0.12 \cdot 6 + 0.00052 \cdot 1500) / \ln(2)$. Если разделить эту величину на массу почек (310 г для стандартного взрослого мужчины), получим равновесную концентрацию урана 1.3 мкг/г. Однократное облучение, приводящее к максимальной концентрации урана 1 ppm, должно быть менее опасным, чем длительное облучение, вызывающее такую же концентрацию. В любом случае за исключением одного (вдыхание очень мелкого – порядка 0.2 мкм – нерастворимого аэрозоля) максимальная концентрация достигается через 1.5-2.5 дня после вдыхания или проглатывания и удерживается на этом уровне только в течение примерно одного дня.
34. *Bioassay Programs for Uranium: An American National Standard*, HPS N13.22-1995 (McLean, VA: Health Physics Society, October 1995). Работа процитирована в сборнике Хартли ¹⁰. Эффективный размер аэрозоля принимается равным одному микрону.
35. H.W.Church, *Cloud Rise from High Explosive Detonation* (Albuquerque, NM: Sandia National Laboratory, Report TID-4000, UC/41, 1969).
36. *Supplementary Documentation for Environmental Impact Statement Regarding the Pantex Plant: Dispersion Analysis for Postulated Accidents*, LA-9445-PNTX-D (Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 1982).
37. Дозы были вычислены с помощью программы HOTSPOT 98, версия 1.0 (Стивен Хоманн, частное сообщение 11 июня 1999 г.). S.G.Homann and D.V.Wilson, *HOTSPOT Training*

Manual: Health Physics Codes for the PC, UCRL-MA-118617 (Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1995).

38. Например, максимальная доза облучения от выброса 10 кг при наихудших условиях составит 50, 12 и 0.3 миллибэр на расстояниях 0.1, 1 и 10 км, соответственно, а при этом концентрации урана в почках окажутся равными 0.01, 0.003 и 0.00004 ppm.
39. Смотрите [5], таблица N.
40. Администрация ветеранов США провела исследование концентрации урана в моче 29 ветеранов, которые получили ранения во время случайной взаимной перестрелки с использованием ОУ. Концентрации урана измерялись в 1994 и 1997 гг. примерно через 1100 и 2300 дней после облучения. Из 29 ветеранов 14 не были ранены шрапнелью и поэтому получили дозу только при вдыхании. Самая высокая концентрация урана, измеренная у этих 14 ветеранов как в 1994 г., так и в 1997 г., составила 0.14 мкг урана на грамм креатинина у одного и того же лица; если умножить на среднюю скорость выделенного креатинина (2.2 г/день), получим скорость выделения урана через мочу, равную 0.3 мкг в день. (Концентрация урана в моче необлученной контрольной группы лежала в интервале от примерно 0.01 до 0.05 мкг на грамм креатинина.) Если применить модель МКРЗ и считать размер аэрозоля равным одному микрону, получаем, что скорость выделения через 1100 и 2300 дней после однократного вдыхания составит примерно 23 и 13 мкг/день на грамм вдыхаемого урана в случае нерастворимых соединений или 4,4 и 2.6 мкг/день для растворимых соединений. Итак, если аэрозоль был растворим на 30%, скорость выделения 0.3 мкг/день в 1994 и 1997 гг. подразумевает вдыхание 17-30 мг урана в 1991 г. Это предполагаемое количество окажется меньше (но не менее половины) для более мелкого и менее растворимого аэрозоля и до двух раз больше в случае более крупного и более растворимого аэрозоля.
41. Наиболее высокая концентрация урана в моче среди 15 ветеранов, у которых осколки ОУ остались в теле (см. предыдущую сноску), составила 31 мкг на грамм креатинина – это соответствует средней скорости выделения урана с мочой около 70 мкг/день.
42. Если оставшийся в легких материал стал единственной причиной появления урана в моче, то скорость выделения 70 мкг/день в 1997 г. подразумевает вдыхание примерно 7 г урана в 1991 г. (доля растворимого компонента 30%, размер аэрозоля 1 мкм). Вдыхание столь большого количества уранового аэрозоля приведет к смертельной концентрации урана в почках – до 300 ppm, что в 100 раз выше опасного порога через два дня после облучения. Тот факт, что наивысшая концентрация урана у ветеранов с осколками ОУ в теле более, чем в сто раз, превысила наивысшую концентрацию у облученных ветеранов, не раненых осколками ОУ, также наводит на мысль, что именно осколки ОУ, а не вдыхаемый аэрозоль послужили источником появления урана в моче.
43. В равновесном состоянии (это хорошее приближение спустя некоторое время после начального облучения) скорость проникновения урана в жидкости тела равна скорости его выделения (70 мкг/день) для наиболее облученных лиц. МКРЗ предполагает, что 12% попавшего в жидкости урана остаются в почках со средним временем пребывания 6 дней, а 0.052% удерживаются в почках в течение 1500 дней. Таким образом, равновесная концентрация урана в почках составит $145 \text{ мкг} : 67(0.12 \cdot 6 + 0.00052 \cdot 1500) / \ln(2)$; если разделить на массу почек, получим значение концентрации 0.47 мкг/г, или около 0.5 ppm.
44. ЭЭД за 50 лет от ОУ, растворенного в крови, составит 1.86 бэр на грамм. Значит, проникновение в кровь ОУ со скоростью 67 мкг/день приведет к годовой дозе, равной $(67 \cdot 10^{-6})(365)(1.86) = 0.046 \text{ бэр/год}$. Эта доза вряд ли останется постоянной за 50-летний период, поскольку формально она приводит к выделению из организма 1.2 г ОУ за 50 лет.
45. Почти 99% внутренней дозы от урана вызвано альфа-частицами с пробегом около 4 мкм (в металлическом уране). Если размер осколка гораздо меньше 4 мкм, что выглядит маловероятным, то практически все альфа-частицы попадут в окружающую ткань и доза R может быть вычислена следующим образом: $R = 1.87 \cdot 10^{10} \cdot SA \cdot Q \cdot E / M$, где SA - удельная активность ОУ ($3.85 \cdot 10^{-7} \text{ Ки/г}$), E – средняя энергия альфа-частицы на распад (4.2 МэВ), Q - качественный фактор (20 бэр/рад), M – масса мускульной ткани (28000 г), а $1.87 \cdot 10^{10}$ – это переводной множитель от сочетания Бк·г·рад·с к сочетанию Ки·МэВ·год. Отсюда получаем, что доза составит 22 бэр/год, или около 1000 бэр за 50 лет, если в течение этого срока осколки большей частью не растворятся. Если принять весовой множитель

0.06, то вклад дозы для мускулов в ЭЭД будет равен примерно 60 бэр. Бета-частицы с пробегом 200 мкм в уране обеспечивают всю оставшуюся дозу; если энергия электронов равна 0.87 МэВ и $Q = 1$, то $R = 0.33$ бэр/год, или примерно 10 бэр за 50 лет. Если полная масса осколков составляла поначалу один грамм, а растворение шло с постоянной скоростью 20 мг/год (55 мкг/день), то 50-летняя доза сократится вдвое. Если, что кажется очень вероятным, размер осколков превышает 4 мкм, то из них освободятся только те альфа-частицы, которые находятся в поверхностном слое толщиной 4 мкм. Доля частиц, излученных в этом слое и направленных наружу, составляет примерно $(4/r)$. Поэтому если осколки имеют форму длинных палочек радиусом r (мкм), доза примерно будет равна $1000(4/r) + 10$ бэр на грамм ОУ. Когда радиус осколка заметно превышает 200 мкм, выражение для дозы, грубо говоря, принимает вид $1000(4/r) + 10(200/r) = 6000/r$. При размерах осколка 0.1, 1 и 10 мм доза примерно составит 100, 10 и 1 бэр на грамм ОУ. ЭЭД подразумевает весовой множитель 0.06 для мускулов, а дозой для других органов можно пренебречь.

46. Основное воздействие излучения заключается в том, чтобы убивать клетки, а не причинять им вред. Смотрите рекомендации МКРЗ, *ICRP Publication 26*, (Oxford: Pergamon Press, 1977), p.8.
47. Смотрите [5], табл.Г.
48. "Report to the American Physical Society by the Study Group on Light-Water Reactor Safety," *Reviews of Modern Physics* 47 (1975), p.S45.
49. Стив Феттер и Фрэнк фон Хиппель, "Опасность рассеивания плутония при авариях с ядерными боеголовками", *Наука и всеобщая безопасность*, т.2, вып.1 (1992), стр.21-41.
50. Если быть более точным, то надо брать обратную величину от усредненной по массе обратной скорости оседания - $\langle v^{-1} \rangle^{-1}$, а не усредненную скорость.
51. *Reactor Safety Study*, table VI B-1. В докладе комиссии по радиологическим оценкам (табл. L-3, M-1) приводится оценка средней скорости оседания частичек урана, выбрасываемых при работе завода уранового топлива в Ферналде: она оказывается равной примерно 0.02 м/с при эффективном размере частичек менее 5 мкм.
52. Смотрите [49].
53. Смотрите, например, *Reactor Safety Study*, table VI E-3
54. На основе имевшихся в то время данных КАЭ США приняла в исследовании 1974 г. следующие значения параметров для населенных районов: $K_0 = 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, $K_\infty = 10^{-9} \text{ м}^{-1}$, $\tau = 0.2$ года; после интегрирования по периоду 50 лет это дает $\int K = 65 \text{ с/м}$. [*U.S. Atomic Energy Agency Proposal Final Environmental Impact Statement Liquid Metal Fast Breeder Reactor Program* (Wash-1535, 1974), appendix II-G.] В исследованиях по безопасности реакторов принимались те же значения параметров, кроме τ (для него выбрано 1,5 года), что привело к интегральному значению 470 с/м. [*Reactor Safety Study*, p.E-13.] Анспо предложил следующую зависимость $K(t) = 10^{-4} \exp(-0.15t^{0.5}) + 10^{-9}$, что приводит к значению интеграла 800 с/м. [L.R.Anspaugh et al., "Resuspension and Redistribution of Plutonium in Soils", *Health Physics*, 29:572-582].
55. *Recommended Screening Limits for Contaminated Surface Soil and Review of Factors Relevant to Site-specific Studies*, Report No.129 (Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurement, 1999); J.A.Garland, N.J.Pattenden, and Playford, "Resuspension Following Chernobyl," IAEA-TECDOC-647 (Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992).
56. Для изучения проблемы загрязнения поверхности листьев отметим, что соотношение дозы от молока и мяса к дозе от продуктов дается выражением $(Y_p/Y_f)(r_f/r_p)(F_m U_m + F_t U_t)/U_p$, где U_p , U_m и U_t - среднее ежегодное потребление продуктов, молока и мяса (кг/год), U_f - скорость поедания кормов скотом (кг/год), r_p и r_f - доли осевшего ОУ на продукты и корма, Y_p и Y_f - урожайность продуктов и кормов (кг/м²), а F_m и F_t - коэффициенты переноса в цепочках корм-молоко и корм-мясо (в единицах кг_{ОУ}/кг). Типичные значения таковы: $U_p = 200$ кг/год, $U_m = 100$ кг/год, $U_t = 100$ кг/год, $U_f = 16$ кг/день, $r_p = 0.2$, $r_f = 0.6$, $Y_p = 0.7$ кг/м², $Y_f = 0.3$ кг/м², $F_m = 3.7 \cdot 10^{-4}$ дней/кг и $F_t = 3.4 \cdot 10^{-4}$ дней/кг, что приводит к соотношению доз порядка 0.004. Доза для населения от корнеплодов дается выражением $C_{g,f} \text{Mr} [U_p V_p + U_f V_f (F_m U_m + F_t U_t)] / z_{rz} \rho_s$, где ρ_s - плотность почвы (кг/м³), z_{rz} - глубина зоны

корнеплодов (м), а B_p и B_f - коэффициенты переноса ОУ в цепочках почва-продукт и почва-корм. Типичные значения таковы: $B_p = 1.1 \cdot 10^{-3}$, $B_f = 3.1 \cdot 10^{-2}$, $\rho_s = 1600 \text{ кг/м}^3$ и $z_{tz} = 0.3 \text{ м}$. Доза для населения от зараженной воды очень приблизительно дается выражением $C_g M_p U_w / P \tau_w$, где U_w - среднегодовое потребление воды из ручьев и рек, куда смывается ОУ ($\text{м}^3/\text{год}$), P - средний годовой уровень осадков, а τ_w - время сохранения урана до растворения в стоках. Типичные значения таковы: $U_w = 0.8 \text{ м}^3/\text{год}$, $P = 1 \text{ м/год}$ и $\tau_w = 10^4 \text{ лет}$. Доза для населения от попадания почвы в желудочно-кишечный тракт дается выражением $C_g f_g M_p U_s / z_{oy} \rho_s$, где U_s - среднее годовое потребление почвы (кг/год), а z_{oy} - глубина почвы, где предполагается однородная концентрация ОУ (м). Типичные значения таковы: $U_s = 0.04 \text{ кг/год}$ и $z_{oy} = 0.1 \text{ м}$. В приведенном в тексте примере из войны в Персидском заливе цепочки потребления корнеплодов, воды и почвы привели в итоге к вкладу в дозу для населения около 0.1 человек-бэр в год. Типичные значения взяты из следующих работ: R.E.Moore et al., "AIRDOS-EPA: A Computerized Methodology for Estimating Environmental Concentrations and Dose to Man from Airborne Release of Radionuclides", EPA 520/1-79-009 (Washington: U.S. Environmental Protection Agency, December 1979); "Calculation of Annual Doses to Man from Routine Release of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Appendix I," Regulatory Guide 1-109 Revision 1 (Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, October 1977); and Y.C.Ng, "A Review of Transfer Factors for Assessing the Dose from Radionuclides in Agricultural Products," *Nuclear Safety* 23(1): (January-February 1982).

57. 57) Для вывода уравнения (9) смотрите работу Steve Fetter, "Radiological Hazards of Fusion R Reactors: Models and Comparisons," (Ph.D Diss., University of California, Berkeley, 1985).
58. Смотрите [54].
59. Если заражение обедненным ураном произошло как раз перед сбором урожая, то выражение $[1 + v \int K]$ в уравнении (9) надо заменить на $[\tau_v^{-1} + v \int K]$; если заражение происходит в период между урожаями, следует заменить на $v \int K$.
60. По расчетам комиссии по радиологическим оценкам (табл.К-2), занимавшейся дозами от выброса урана с завода уранового топлива в Ферналде, дозы от заглатывания зараженной пищи составят только несколько процентов от дозы при вдыхании.
61. Доза от естественного урана (на грамм) выше, чем от ОУ, из-за присутствия тория-230 - продукта распада урана-238 (период полураспада тория-300 равен 80 000 лет), и следующего продукта распада - радия-226 с периодом полураспада 1600 лет. Почти каждый из последующих короткоживущих продуктов распада (свинец-214, висмут-214 и висмут-210) испускает гамма-лучи высокой энергии. Напротив, гамма-лучи с энергией 1 Мэв, которые отвечают за значительную часть внешней дозы от ОУ в течение первой сотни лет после его производства, выделяются только примерно при 0.6% распадах Pa-234m. [C.M.Lederer and V.S.Shirley, Table of Isotopes, seventh edition (John Wiley & Sons, 1978)]. Впрочем, результирующую дозу при заданном уровне урана в почве нельзя подсчитать простым путем благодаря различию в химии урана, тория и радия в почве и, что более важно, из-за того, что радиоактивный газ радон-222 с периодом полураспада 4 дня отделяет торий-230 от свинца-214, висмута-214 и висмута-210, позволяя им переходить в воздух.
62. *Table of Radioactive Isotopes*, Edgardo Browne and Richard Firestone; Virginia S. Shirley, ed. (John Wiley & Sons, 1986).
63. При 99.6% распада Pa-234m идет прямой переход на основной уровень U-234.
64. L.T.Dillman, "Absorbed Gamma Dose Rate for Immersion in a Semi-Infinite Radioactive Cloud," *Health Physics*, 27(1974):571.
65. J.H.Hubbell, "Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV," NSRDS-NBS 29 (Washington, DC: National Bureau of Standards, August 1969).
66. Четверть материала, осевшего в легочной области со средним временем пребывания там 500 дней, выделяется через легочные лимфатические узлы (они в целях радиологической защиты рассматриваются как часть легких), где удерживается 90% со средним временем пребывания 1000 дней (среднее время полного удержания составит 4 года), а

10% удерживаются на бесконечный срок (при расчете 50-летней дозы время удержания в этой ячейке принимается равным 50 годам). Таким образом, время удержания этого материала в легких составит $[2 + 0.25(0.9 \cdot 4 + 0.1 \cdot 25)] = 4.15$ лет.