

Обращение с обедненным ураном

Рассмотрены эффекты радиологического и токсического воздействия обедненного урана на организм людей, образование радиоактивных аэрозолей, учет урана-236 в составе обедненного урана, влияние мощных источников бета-излучений при распаде урана-238. Проанализированы риски использования оружия с обедненным ураном.

Ключевые слова: обедненный уран, состав, аэрозоли, воздействие на людей, применение.

В. В. Токаревський

Поводження із збідненням ураном

Розглянуто ефекти радіологічного й токсичного впливу на організм людей збідненого урану, утворення радіоактивних аерозолів, наявність урану-236 у складі збідненого урану, вплив потужних джерел бета-випромінювань при розпаді урану-238. Проаналізовано ризики використання зброї із збідненням ураном.

Ключові слова: збіднений уран, склад, аерозолі, вплив на людей, застосування.

Природный уран представляет собой смесь трех изотопов: ^{234}U (0,0055 %, $T_{1/2}=2,45\cdot 10^5$ лет), ^{235}U (0,720 %, $T_{1/2}=7,04\cdot 10^8$ лет), ^{238}U (99,2745 %, $T_{1/2}=4,47\cdot 10^9$ лет) [1]. Перераспределение изотопного содержания природного урана происходит либо естественным путем за счет радиоактивного распада или ядерных реакций под действием нейтронов, либо искусственно — в процессе изотопного разделения на специальных установках для производства так называемого обогащенного урана. Методик изотопного обогащения существует много (диффузионное, магнитное, лазерное, центрифугирование и др.). Обогащенный уран характеризуется более высоким содержанием изотопов 234 , ^{235}U , причем ^{235}U является основным материалом для изготовления ядерного топлива атомных электростанций и, в зависимости от величины обогащения, может использоваться как основной компонент ядерного оружия. Обращение с обогащенным ураном находится под строгим международным контролем.

Обедненный уран (ОУ) является смесью новых изотопов, в отличие от состава природного урана. ОУ характеризуется наличием основного изотопа ^{238}U , увеличением процентного весового содержания нового изотопа ^{236}U ($T_{1/2}=2,34\cdot 10^7$ лет) и уменьшением количества легких изотопов 234 , ^{235}U при обогащении по сравнению с содержанием в природном уране. В частности, при получении ОУ в США с уменьшением содержания 234 , ^{235}U предполагается, что содержание изотопов будет следующим: ^{234}U — 0,0006 %, ^{235}U — 0,2 %, ^{236}U — 0,0003 %, ^{238}U — 99,8 % [2].

Передаваемый в Россию из США обедненный уран с обогащением ^{235}U на уровне 0,25—0,40 % используется с целью обогащения до уровня 4—5 % для АЭС [3]. Присутствие ^{236}U в обогащенном уране достаточно неожиданно. Его содержание в природном уране незначительно. Пределы изменения процентного содержания ^{236}U в измеряемых образцах проб природного урана зависят от условий сохранения урана в окружающей среде (минеральный состав, присутствие примесей, наличие воды и т. п.), а также от наличия нейтронов и их спектра энергий. Процесс образования ^{236}U происходит при альфа-распаде ^{240}Pu ($T_{1/2}=6353$ года) и есть маловероятным. Обычно рассматривают два процесса образования ^{236}U : в радиационном захвате на тепловых нейтронах $^{235}\text{U}(n, \gamma)^{236}\text{U}$ и в реакциях на быстрых нейтронах $^{238}\text{U}(n, 3n)^{236}\text{U}$ (при термоядерных испытаниях). По оценкам [4, 5, 6], количество ^{236}U находится на уровне $1\cdot 10^{-9}$ % в старых рудовых образцах, а по новым оценкам (после новых испытаний ядерного оружия) — на уровне порядка $1\cdot 10^{-5}$ % [4, 7, 8, 9] к количеству ^{238}U в смеси.

ОУ — побочный продукт изотопного обогащения урана; он не имеет статуса ядерного материала или радиоактивных отходов, обращение с ним не регулируется специальными правилами. Стоимость ОУ тем меньше, чем меньше содержание в нем изотопа ^{235}U , что послужило основанием классифицировать ОУ как отходы атомной промышленности. Вместе с тем, ОУ служит сырьем для наработки трансурановых элементов, прежде всего ^{239}Pu , например в ядерных реакторах. В этом смысле ОУ наряду с торием является перспективным ядерным сырьем будущей атомной энергетики.

Кроме того, ОУ применяется как материал для изготовления противорадиационной защиты (в том числе контейнеров источников ионизирующих излучений) и боеголовок бронебойных снарядов. Работы по изготовлению танковой брони и противотанкового проникающего вооружения были начаты в 1970 году. ОУ применялся в военных событиях в Кувейте и Ираке в 1991 и 2003 годах [10,

11, 12], Боснии (1994-1995), Косово, Сербии и Черногории (1999) [13, 14, 15], Афганистане (2001—2003) [16]. При этом ОУ наиболее потенциально опасен для здоровья человека ввиду образования большого количества аэрозолей [17, 18].

Каждый изотоп природного урана является родоначальником достаточно длинного радиоактивного ряда [19]. В частности, семейство ^{234}U состоит из 15 членов и заканчивается стабильным изотопом ^{206}Pb . Семейство ^{235}U состоит из 16 членов и заканчивается ^{207}Pb — стабильным изотопом. ^{236}U испытывает альфа-распад и образует ^{232}Th (практически стабильный нуклид). Наконец, семейство ^{238}U содержит 19 продуктов распада, среди которых встречаются как короткоживущие (например, ^{214}Po с периодом полураспада 164,3 мс), так и долгоживущие (например ^{234}U и ^{230}Th с периодом полураспада 75 380 лет). Процесс радиоактивного распада урана сопровождается испусканием рентгеновского излучения, гамма-квантов, альфа- и бета-частиц, а также незначительного количества нейтронов (1 кг природного урана испускает в 1 с примерно 12 нейтронов). Физические свойства урана при нормальных условиях (металл): плотность — 18,95 г/см³, температура плавления — 1132 °С, температура кипения — 3818 °С [1].

Природный уран — неотъемлемый фактор среды обитания человека, как правило, не оказывающий непосредственного вредного радиационного влияния на здоровье людей. Известно, что внутри человеческого организма находится в среднем около 330 мкг ($33 \cdot 10^{-5}$ г) урана [20]. Информация о стандартном содержании урана в нормальном организме человека [21] свидетельствует о крайне неравномерной концентрации урана в различных органах: от $4,5 \cdot 10^{-5}$ г на 1 г щитовидной железы до $3,2 \cdot 10^{-10}$ г на 1 г мозга. Среднее содержание на 1 г тела — $5 \cdot 10^{-9}$ г. Однако при промышленном использовании урана возникает потенциальная возможность реального ущерба здоровью персонала и населения в целом. Основным вредным фактором при добыче урана являются альфа-активные аэрозоли и радон. Радон входит в состав радиоактивного семейства распада урана-238 и, в свою очередь, является родоначальником еще четырех альфа-излучающих радионуклидов. Радон сопровождает естественный уран в природных объектах и находится в них в состоянии векового равновесия с другими членами радиоактивного семейства. Радон практически полностью отсутствует в ОУ,

поскольку в процессе обогащения при разделении изотопов вековое равновесие нарушается.

Уран легко [22, 23] окисляется на воздухе при температуре более 400 °С, в результате чего образуется большое количество соединений: двуокись UO_2 , окись UO_3 , закись-окись U_3O_8 , перекиси $\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и UO_5 . Плотность двуокиси урана — 10,97 г/см³, окиси урана — 7,30 г/см³, закиси-окиси — 8,30 г/см³ [2]. Все минеральные кислоты растворяют уран. В водных растворах уран может находиться в нескольких валентных состояниях (III, IV, V и VI).

Радиологическое действие обедненного урана. Радиологическое действие любого радионуклида определяется энергией, которая может быть передана продуктами распада облучаемому объекту. ОУ является источником радиационной опасности как следствие дозы бета- и гамма-излучения, а дозы альфа-частиц из распада в семействе 234 , 235 , 236 , ^{238}U полностью экранируются наружным слоем кожи человека. Ситуация изменяется, когда уран попадает внутрь организма человека. Радиологическое воздействие ОУ в этом случае зависит как от путей его поступления в организм человека, так и от растворимости его химических соединений.

Основными продуктами альфа-распада ^{238}U есть первый дочерний бета-излучатель ^{234}Th и два следующих бета-излучателя $^{234\text{m}}\text{Pa}$ (99,87%) + ^{234}Pa (0,13 %), которые в дальнейшем образуют ^{234}U . Для ^{235}U основные радиоактивные продукты — ^{231}Th и ^{231}Pa . Через примерно 6 мес после изготовления ОУ наступает вековое равновесие количества дочерних короткоживущих продуктов с количеством распадов родителей. Следовательно, излучение дочерних продуктов нужно добавлять к излучению родителей. Кстати, ключевую роль играет жесткое бета-излучение с энергией 2,29 МэВ из $^{234\text{m}}\text{Pa}$, который вносит до 40 % поглощенной дозы [24]. Вклад этих бета-излучений в риски от распада ОУ необходимо учитывать, причем еще на этапе разработки соответствующих нормативных документов. Альфа-активность ОУ составляет около 60 % активности природного урана по причине уменьшения весового процентного количества самых легких изотопов урана 234 , ^{235}U .

В табл. 1 приведены данные для сравнения радиационного воздействия природного урана и ОУ применительно к фракции массой 1 мг [2]. В последней колонке указан радиационный взвешивающий фактор W_R

Таблица 1. Данные для сравнения радиационного воздействия природного урана и ОУ применительно к фракции массой 1 мг

Нуклид	Период полураспада $T_{1/2}$	Энергия излучения альфа- и бета-частиц, МэВ	Природный уран массой 1 мг		Обедненный уран массой 1 мг		Радиационный взвешивающий фактор W_R
			% (масс.) изотопа	Активность, Бк	% (масс.) изотопа	Активность, Бк	
^{234}U	2,44E5 лет	4,77	0,0055	12,35	0,0006	2,31	20
^{235}U	7,04E8 лет	4,40	0,72	0,58	0,20	0,16	20
^{236}U	2,43E8 лет	4,49	≈ 0	≈ 0	0,0003	0,007	20
^{238}U	4,47E9 лет	4,20	99,2745	12,35	99,8	12,42	20
Альфа-активность от массы 1 мг				25,3		14,9	20
^{234}Th	24 дней	0,2	99,2745	12,35	99,8	12,42	1
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1,17 мин	2,29	99,1445	12,33	99,67	12,40	1
^{234}Pa	6,7 ч	0,47	0,13	0,02	0,13	0,02	1
Активность бета-частиц от массы 1 мг				24,7		24,84	1

для альфа- и бета-частиц [25] от аэрозолей (мелкодисперсных частиц с размерами меньше 10 мкм). Аэрозоли ОУ имеют в 20 раз более сильное влияние альфа-излучателей по сравнению с бета-излучателями. Объем сферической фракции массой 1 мг составляет около $5 \cdot 10^{+7}$ мкм³. Для крупноразмерных фракций аэрозолей с аэродинамическим диаметром (медианным по активности) большим, чем пробег альфа-частиц во фракции, радиационный взвешивающий фактор уменьшается, стремясь к единице для бета-частиц. Поверхностный слой аэрозолей с толщиной меньшей, чем пробег альфа-частицы, характеризуется радиационным взвешивающим фактором $W_R = 20$. Для той доли фрагмента ОУ, из которой альфа-частицы не выходят и тормозятся внутри фрагмента, эффект дозового альфа-излучения отсутствует. В случае реальных размеров осколка ОУ (например, шрапнели от взрыва оружия) суммарная активность осколка ОУ в соответствии с табличными данными будет равна сумме короткоживущих членов векового равновесия и радиационного воздействия альфа-излучателей от поверхности осколка. Эквивалентные, эффективные и коллективные дозы воздействия на организм от применения вооружений с ОУ рассматриваются в [26].

Существуют следующие пути поступления ОУ в организм: ингаляционный (дыхание в атмосфере, содержащей в том или ином виде ОУ), пероральный (употребление пищи или воды, содержащих ОУ) и тактильный (всасывание через кожу). Растворимые соединения ОУ быстро всасываются в кровь и разносятся по органам и тканям. Характер распределения ОУ в организме зависит от валентности урана [22]. Шестивалентный уран всасывается через кожу, проникает через клеточные мембраны и накапливается, в основном, в почках и скелете, совсем незначительно — в печени. Четырехвалентный уран, напротив, депонируется преимущественно в печени и селезенке (до 50 %), в меньшей степени (до 20 %) — в костях и почках. По данным [23], при однократном пероральном поступлении наиболее критическим органом в течение первых нескольких часов являются почки. Максимальное содержание урана в организме наблюдается через 3 ч и составляет менее 1 % общего поступления. Затем в течение 4 сут идет накопление урана в скелете. Через 16 сут начинается медленное выведение урана из организма с полупериодом выведения 150—200 сут. В отдаленные сроки критическим органом становятся кости, которые содержат при этом более 90 % всего депонированного в организме урана. При ингаляционном поступлении соединений $UO_2 + U_3O_8$ полупериод выведения из легких составляет 118—150 сут, из почек (данные по почкам собаки) — 16 сут, из скелета — 450 сут. Независимо от путей поступления урана в организм его выведение происходит преимущественно с мочой для растворимых соединений, а для нерастворимых — преимущественно с калом.

Химическое действие обедненного урана. В атомной промышленности, включая металлургическое и химическое производства с ураном, возникают не только радиологические, но и токсикологические риски, уменьшение которых требует специальных контрмер.

Известно [27, 28], что уран в водном растворе находится обычно в шестивалентной форме, т. е. вокруг него существует довольно сильное электростатическое поле, которое может деформировать и даже разрывать молекулы воды, а также иные окружающие его органические молекулы. Результатом такого воздействия является, с одной стороны, возникновение новых физических агрегатов (комплексов

или даже сеток связей с включением гидроксильных групп, появившихся из-за разрыва молекул воды), а с другой — быстрое локальное повышение кислотности вследствие высвобождения многочисленных протонов (остатки молекул воды). Следовательно, подобный комплекс может действовать как сильный окислитель, искажающий функции деления клеток и способствующий появлению раковых заболеваний. Важно отметить, что процесс образования комплексов в значительной степени зависит от кислотности раствора, температуры и концентрации ионов урана в растворе. При температуре и кислотности раствора, типичного для растворов живого организма, существует довольно низкое пороговое значение концентраций (порядка один ион урана на сто миллионов молекул воды), начиная с которого процесс образования комплексов идет интенсивнее, с последующим повышением кислотности раствора. В саморегулирующихся системах, каковыми являются растворы живого организма, изменение кислотности вызывает противодействие с привлечением ресурсов организма, что приводит к последующему погашению излишка протонов. Однако это противодействие, опять же, может стимулировать процесс образования комплексов, который, таким образом, приобретает устойчивый необратимый характер. Важным моментом при этом является чрезвычайно низкая пороговая концентрация урана, при которой процесс может инициироваться спонтанно.

Считается, что токсичность химического элемента возрастает с увеличением атомной массы [29]. Следует отметить и то, что в описанном сценарии (который можно с некоторыми модификациями применить и к другим тяжелым металлам) определяющим фактором является не радиоактивное воздействие урана (все изотопы урана в подобном процессе ведут себя идентично), а, скорее, его способность к формированию высоковалентных соединений в растворе. В общих чертах предложенный механизм позволяет объяснить определенные особенности послевоенных заболеваний, зафиксированных в литературе. В том числе большой период биологического полураспада аэрозольных слабо растворимых форм ОУ объясняет длительные последствия и предполагает поздние рецидивы заболеваний. Указанный механизм может объяснить увеличение количества случаев лейкемии у ветеранов и населения пораженных районов, позволяет понять определенные отличия в статистике заболеваний рабочих урановых приисков и перерабатывающих предприятий.

Поскольку ²³⁸U является самым тяжелым природным химическим элементом, разумно предположить его высокую токсичность. Из доступной литературы (например [30]) известно, что острая и хроническая урановая интоксикация характеризуется политропным действием урана на различные органы и системы. Растворимые и нерастворимые соединения урана вызывают однотипный характер поражения, разница состоит лишь в скорости развития интоксикации и степени тяжести поражения. В ранние сроки воздействия преобладает химическая токсичность урана. Радиационный фактор играет существенную роль в более поздние периоды времени. В клинике уранового отравления наряду с обширной патологией различных органов и систем ведущим является нарушение функции почек. В растворимой форме химическая токсичность урана становится определяющей для проявления дисфункции почек в тех случаях, когда поступление урана за год превышает установленные пределы. При ингаляционном воздействии различных соединений урана наблюдаются

выраженные симптомы легочной патологии. При длительном поступлении в организм труднорастворимых соединений урана может развиваться хроническая лучевая болезнь.

При оценке токсичности соединений урана необходимо учитывать также дисперсность частиц [31]. Токсичность труднорастворимых соединений урана при ингаляционном поступлении значительно возрастает с увеличением мелкодисперсных аэрозолей во вдыхаемом воздухе.

Образование аэрозолей из обедненного урана. Образование аэрозолей из ОУ не должно существенным образом отличаться от механизма образования аэрозолей других тяжелых металлов. Важно отметить, что физико-химические свойства вещества в твердых телах и в диспергированном виде сильно отличаются [31]. Наиболее известный пример — изменение свойств железа: монолитный кусок очень чистого железа устойчив к атмосферной коррозии, а мелкодиспергированный порошок железа является пиррофорным — он воспламеняется на воздухе, т. е. окисление происходит мгновенно. Установлено, что изменение физико-химических свойств металлов начинается с размеров частиц порядка 0,02—0,03 мкм, т. е. когда протяженность частицы составляет несколько сотен межатомных расстояний. Такие частицы принято называть кластерами, поскольку они содержат сравнительно небольшое количество атомов или молекул (меньше нескольких десятков тысяч). Скорее всего, кластеры образуются непосредственно из парогазовой фазы вещества за счет коллективных дальнедействующих сил. Кластеры по своим физико-химическим свойствам отличаются от свойств твердых тел прежде всего тем, что они быстрее растворяются; быстрее спекаются друг с другом при контакте; имеют значительно более низкую температуру плавления (кластеры с размером 0,001 мкм плавятся при комнатной температуре); вещество в кластерном состоянии способно вступать в химические реакции, в которые оно не вступает ни в виде пара или газа, ни в виде жидкости или твердого тела; кластеры могут обладать аномально высокой каталитической активностью.

Кластерное состояние вещества, как справедливо отмечается в [31], можно рассматривать как новое агрегатное состояние вещества в дополнение к четырем общеизвестным состояниям — твердому, жидкому, газообразному и плазменному. Механизм образования кластеров и кластерное состояние вещества сравнительно мало изучены. Это направление должно быть отнесено к числу новых научных дисциплин.

Рассмотрим более подробно механизмы образования урановых аэрозолей. Очевидно, что механизмы образования аэрозолей из обогащенного урана, природного урана и ОУ в одних и тех же химических состояниях должны быть практически одинаковыми. Частицы аспирационной дисперсной фазы ОУ должны образовываться при окислении, горении и высокотемпературном распылении металлического урана. Источником высокой температуры может быть взрыв, мощный энергетический импульс (например, механический удар), интенсивный световой пучок (например, сфокусированный солнечный свет или луч мощного лазера), пожар в присутствии определенных химических соединений или ядерный инцидент. Возможны и другие пути образования урановых аэрозолей, например из растворов или вторичного подъема мелкодисперсной фазы осадка после испарения.

Первичные аэрозоли урана могут прикрепляться к поверхности других частиц, образуя так называемые акцессории. В частности, при исследовании аэрозолей объекта

«Укрытие» Чернобыльской АЭС были обнаружены акцессории урана, размер которых обычно составлял менее 0,1 мкм [32]. Ожидаемая плотность аспирационных частиц может зависеть от плотности чистого урана и достигать нескольких грамм на кубический сантиметр для «капелек», которые конденсируются на первичных диспергированных частицах ОУ или окислов урана. При средней плотности аспирационных частиц 8 г/см³ и размерах в диапазоне 1—3 мкм средняя скорость седиментации в атмосфере при обычных условиях составляет 0,1—2 см/с [33].

Седиментация частиц субмикронных размеров происходит с существенно меньшей скоростью. Такие частицы практически не осаждаются и могут переноситься в атмосфере Земли на очень большие расстояния. Можно утверждать, что субмикронные аэрозоли в определенных ситуациях служат источником глобальной опасности. Важным фактором вторичного загрязнения атмосферы является превращение осевших частиц снова в аэрозоли. Например, в [33] показано, что в случае образования дисперсионных радиоактивных аэрозолей поверхностная загрязненность 1 ед./м² создает концентрацию радионуклидов в воздухе до 10⁻³ ед./м³ даже при отсутствии внешнего воздействия. При наличии возмущений эта величина может возрасти на один-два порядка.

Отметим в заключение еще один возможный вторичный источник образования урановых аэрозолей, исследованный в работе [34]. Установлено, что при испарении водных растворов солей уранила UO₂⁺⁺, которые характеризуются высокой растворимостью в воде, в определенных условиях происходит кристаллизация с образованием вторичных урановых минералов карбонатного, сульфатного и хлоридного типов. Вновь образованные кристаллы урановых минералов в нормальных атмосферных условиях самопроизвольно разрушаются из-за дегидратации, образуя чрезвычайно мелкодисперсные частицы размером менее 0,1 мкм, так называемые наночастицы. Малейшее возмущение среды поднимает наночастицы в воздух, образуя аэрозоли нового поколения. Наночастицы коагулируют с другими частицами дисперсной фазы, образуя на их поверхности акцессории. Таким образом, стандартные и сравнительно безвредные кремнеземные, алюмосиликатные и другие аэрозоли воздуха становятся переносчиками наночастиц урана или его соединений. В итоге снова может образоваться аспирационная дисперсная фаза аэрозолей, содержащих уран.

Жизненный цикл урановых аэрозолей можно представить следующим образом [35]. Предположим, что в результате некоторого процесса произошло высокотемпературное взрывное разрушение болванки из металлического ОУ. Возникают фрагменты различной величины, в том числе кластеры, частицы микронных и субмикронных размеров, а также различных морфологических типов — от сферических до нитевидных. Крупные фрагменты, размеры которых превышают 100 мкм, слишком велики, чтобы мигрировать в воздушных потоках на значительное расстояние. Поэтому они достаточно быстро оседают, по существу — в месте их образования. Микронные и субмикронные частицы, включая кластеры, участвуют одновременно в нескольких процессах: седиментации, коагуляции, взаимодействии с компонентами воздушной среды, переносе. После седиментации возможны два варианта: либо вторичный подъем, либо растворение с последующим образованием ураносодержащих химических соединений (минералов). Как уже указывалось, кристаллоподобные

минералы испытывают саморазрушение с образованием субмикронных и микронных фрагментов, которые, поднимаясь в воздух, снова образуют ураносодержащие аэрозоли. Таким образом, совершается круговорот диспергированного урана в природе.

Особого внимания заслуживает вопрос о взаимодействии наночастиц урана с компонентами воздушной среды — водяным паром, озоном, окислами азота и серы, с аэрозолями других типов.

Ингаляционное воздействие аэрозолей из обедненного урана. Известно, что вдыхание аэрозолей с ОУ может представлять серьезную угрозу для здоровья [17, 36, 37]. Наиболее опасны наночастицы с размерами менее десятых долей микрометра. Они проникают в наиболее важную часть легких — альвеолы, которые выполняют основную дыхательную функцию, снабжая организм кислородом. Более 50 % наночастиц, попавших в альвеолы, остаются там навсегда, выстилкая поверхность и препятствуя нормальной работе легких. Растворимые наночастицы оказывают двойное действие: с одной стороны, они блокируют альвеолы, с другой — служат долговременным источником поступления в кровь растворимой токсичной части. Наночастицы аэрозолей аккумулируются в легких и являются источником большого числа заболеваний: силикоза (кварцевые наночастицы), асбестоза (асбестовые наночастицы), антракоза (угольные наночастицы) и др.

Аэрозольные частицы, в первую очередь наночастицы и кластеры оксидов металлов, способны катализировать превращение низших окислов азота и серы в высшие. В конечном итоге происходит образование серной и азотной кислот. Облачные и дождевые капельки коагулируют с такими аэрозолями, в результате чего возникают кислотные дожди, наносящие серьезный ущерб окружающей природной среде. Другим печально известным примером является образование смога в крупных городах: капельки обычного естественного тумана захватывают аэрозольные частицы, сорбируют сернистый газ, другие вредные вещества. Под каталитическим действием наночастиц тяжелых металлов образуется серная кислота. Концентрация серной кислоты в смоге может многократно превышать допустимые концентрации, что проявляется в сильном раздражении слизистых оболочек и глаз. Очень опасны, по-видимому, синергические эффекты, связанные с одновременным воздействием нескольких разнородных вредных факторов.

Оценить ингаляционную опасность аэрозолей можно в том случае, когда известны распределение аэрозолей по размерам (фракциям); элементный состав; химический состав; радионуклидный состав; морфология аэрозолей; аэродинамические свойства аэрозолей; растворимость химических соединений, образующих аэрозоль; объемная концентрация аэрозолей; период полувыведения различных химических фракций; активности различных фракций.

Только часть аэрозолей, находящихся в атмосферном воздухе, попадает внутрь организма при дыхании и депонируется в жизненно важных органах. Наибольшую опасность в этом смысле представляют субмикронные аэрозоли с размерами от 0,001 мкм до 0,1 мкм, т. е. наночастицы. Общий ущерб здоровью человека от дыхания в атмосфере, содержащей наночастицы, равен сумме химического вреда и радиационного вреда с учетом синергических эффектов.

Химический (в том числе и биохимический) вред от вдыхания наночастиц различных химических элементов или их соединений является предметом изучения

в специальной отрасли медицины. Вдыхание радиоактивных аэрозолей, как уже говорилось, приводит к внутреннему облучению организма человека в течение длительного времени. Особую опасность представляют так называемые горячие частицы [38], образующиеся при тяжелых ядерных авариях типа Чернобыльской катастрофы либо при ядерных взрывах.

Для населения Нормами радиационной безопасности Украины [25] установлены следующие допустимые уровни поступления радионуклида ^{238}U : через органы дыхания — 6 Бк/год или 480 мкг/год, через органы пищеварения — 3000 Бк/год или 240 мг/год. Эти же нормы устанавливают допустимые концентрации ОУ: в воздухе — $3 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³ или 0,24 мг/м³, в питьевой воде — $1 \cdot 10^4$ Бк/м³ или 800 мг/м³.

Синергические эффекты, или сочетательное (комбинированное) воздействие комплекса разнородных вредных факторов, — проблема малоизученная. Весьма вероятно, что лейкозы чувствительнее к синергизму, чем другие виды рака. При малых дозах облучения меняется чувствительность организма к действию других факторов. В специальной литературе [39, 40] есть указания на то, что лейкозы возникают раньше при малых радиационных дозах в результате совместного действия нескольких факторов. Химические канцерогены в отдаленные сроки могут увеличивать количество опухолей, индуцированных радионуклидами. С другой стороны, при малых радиационных дозах радиационное воздействие играет роль синергического фактора, повышающего выход опухолей, вызываемых химическими канцерогенами. Известно [30], что диоксид серы, а также окислы азота в присутствии паров воды следует рассматривать как факторы, усиливающие повреждающее действие радионуклидов. При ингаляции возможно усиление накопления радионуклидов в легких, вполне вероятно изменение хемотоксикологии и распределения по критическим органам.

Обратим внимание еще на один эффект, обнаруженный в зонах повышенной ионизации воздуха [41]. При ионизации воздуха в нем образуются положительные и отрицательные ионы, которые стимулируют протекание различных химических реакций. В частности, образуются окислы азота, которые взаимодействуют с присутствующими в атмосфере парами воды и образуют азотную кислоту. В свою очередь азотная кислота конденсируется на субмикронных аэрозолях, в результате чего воздух насыщается микрокапельками азотной кислоты. Вдыхание такого воздуха может вызвать заболевание органов дыхания человека, а седиментация может угнетающим образом воздействовать на экосистемы. Причиной ионизации воздуха могут быть электрические разряды, продукты распада радиоактивных материалов, мощное импульсное выделение энергии и некоторые другие факторы. Известно, что персонал, который работал при ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы в зоне отчуждения, страдал от воспаления верхних дыхательных путей. Определяющим вредным фактором при этом, скорее всего, было воздействие азотной кислоты, а не радиационный ожог.

Практически не изученными или малоизвестными в силу военного применения остаются образование и последующие превращения субмикронных аэрозолей при проникновении урановых сердечников через броню или другие преграды и при взрывах различных боезарядов (за исключением ядерных) [42, 43]. Разумно предположить, что при обычных взрывах боезарядов, содержащих ОУ, наряду с субмикронными частицами урана возникнут также

мелкодиспергированные частицы стандартных взрывчатых веществ и других материалов. Коагуляция микрочастиц, конденсация на них паров продуктов взрыва, взаимодействие с другими компонентами атмосферного воздуха могут оказать неблагоприятное как мгновенное, так и долгосрочное воздействие на экологическую обстановку в зоне взрыва.

Риски от применения вооружений с обедненным ураном. Известно, что около 400 т вооружений с ОУ было применено в Ираке и Кувейте, около 13 т — на Балканах. Восемнадцать стран обладают оружием с ОУ и шесть стран производят его. Этому вопросу посвящено значительное количество работ [2, 11, 18, 26, 39, 40, 44, 45, 46, 47]. Основной вред участникам военных действий от применения вооружений с ОУ наносят шрапнели от осколков оружия и радиоактивные аэрозоли. Как правило, боеприпасы с ОУ применяются вместе с примесями титана (0,75 % Ti), молибдена или скандия, которые существенно увеличивают проникающую способность сквозь защитную оболочку. Значительная часть объема проникающего снаряда (до 30 %, а при определенных свойствах защиты от боеприпасов — до 70 %) испаряется, образуя аэрозоли с двуокисью урана внутри закрытого пространства, например в танке. Типичные размеры аэрозолей составляют менее 5 мкм и обладают высокой подвижностью.

Нет никаких сообщений о влиянии радиационного воздействия аэрозолей и металлических осколков и его отрицательных последствиях, связанных с раковыми заболеваниями. Однако уран и ОУ обладают химической активностью, как любой тяжелый элемент, поэтому аэрозоли и металлические осколки представляют собой реальную угрозу, прежде всего для почек. Всемирная организация здоровья установила норму потребления урана 0,5 мкг на 1 кг массы человека в день [48] (приблизительно в 16 раз менее нормы, приведенной в [25]).

Было проведено сравнение [49] радиологического, химического, биологического и токсичного воздействия боевого оружия с ОУ с воздействиями всех типов иных вооружений. Принято, что ОУ не относится к радиационно опасным материалам. Он в такой же степени токсично опасен, как и другие изделия с тяжелыми металлами, из-за образования большого количества аэрозолей. Поэтому актуальна проблема образования дисперсных аэрозолей при военном использовании любых типов боеприпасов. Тем не менее, вооружения с ОУ в соответствии с существующими международными законами о разоружении не подлежат запрещению [50].

Однако отрицательное отношение к использованию вооружений с ОУ в боевых условиях и относительно гражданского населения существует. Неоднократно ставился вопрос о введении моратория на применение вооружения с ОУ. В 2007 году Генеральная Ассамблея ООН впервые приняла решение [51] об угрозах для здоровья при использовании вооружений, содержащих ОУ. После этого Генеральная Ассамблея ООН четырежды рассматривала, причем последний раз в 2014 году [52], резолюцию об эффектах влияния вооружений и боеприпасов, содержащих ОУ. Только 150 стран поддержали резолюцию, четыре страны (США, Великобритания, Франция и Израиль) голосовали против и 27 стран воздержались. Европарламент в 2008 году ввел мораторий [53] на использование оружия, содержащего ОУ, в государствах Европейского Союза и НАТО с предложением на введение всеобщего запрета на такое оружие.

Выводы

Рассматривая воздействие ОУ на окружающую среду и здоровье человека, можно сделать следующие выводы.

ОУ отличается от природного урана в составе трех изотопов ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U возникновением четвертого изотопа — ^{236}U . Это является следствием обогащения ОУ более тяжелыми изотопами урана; содержание изотопа ^{236}U составляет $3 \cdot 10^{-4} \%$.

ОУ и природный уран относятся к радиоактивным веществам и токсичным химическим соединениям. Токсичность химического элемента возрастает с ростом порядкового номера химического элемента, она максимальна для природного урана. Потребление ОУ в больших пропорциях способствует увеличению вероятности некоторых раковых заболеваний, в частности легочного рака и, возможно, лейкемии.

Радиационным воздействием ОУ в крупноразмерной форме можно пренебречь, за исключением поступления в организм шрапнелей. При длительном нахождении в организме осколков боеприпасов с ОУ возрастает вероятность рака кожи вследствие облучения альфа-частицами. Ингаляционное поступление ОУ в форме микро- и наночастиц представляет серьезную радиологическую и токсическую опасность. Поступление ОУ через органы дыхания наиболее вероятно в атмосфере, содержащей наночастицы урана, особенно внутри замкнутого пространства, например танка. Показано, что наночастицы урана могут находиться в виде свободных аэрозолей, центров конденсации других химических соединений (например, окислов, кислот) или акцессориев.

Химическое и биохимическое воздействие может оказаться существенным при поступлении внутрь организма ОУ в растворимой форме. Токсичное воздействие от потребления ОУ в растворимой форме на почки аналогично потреблению природного урана и его химических соединений.

Возражения на запрет вооружений как с ОУ, так и природным ураном, приводят к увеличению загрязнения природной среды соединениями урана. Решение о запрете вооружений с ОУ поддержано Европарламентом. Это является сдерживающим моральным фактором, призванным служить длительному и устойчивому развитию человеческого сообщества в условиях радиационного и токсичного загрязнения.

Автор выражает благодарность А. М. Гринько и Г. А. Лобачу за полезные советы и обсуждение материалов настоящей работы.

Список использованной литературы

1. Nuclear Wallet Cards. National Nuclear Data Center. — Brookhaven National Laboratory, 1990.
2. Depleted Uranium-Human Exposure Assessment and Health Risk Characterization in Support of the Environmental Exposure Report "Depleted Uranium in the Gulf" of the Office of the Special Assistant to the Secretary of Defense for Gulf War Illnesses, Medical Readiness and Military Deployments (OSAGWI). Health Risk Assessment Consultation. No. 26-MF-7555-00D. 15 September 2000.
3. Uranium and Depleted Uranium (Updated September 2014). World Nuclear Association. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.world-nuclear.org/info/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/uranium-and-depleted-uranium/>
4. ^{236}U in Uranium Minerals and Standards / Berkovits D., Feldstein H., Ghelberg S., Hershkowitz A., Navon E., Paul M. //

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 2000. — V. 172. — P. 372—376.
5. Heavy Ion AMS with a “small” Accelerator / Steier P., Golser R., Kutschera W., Priller A., Valenta A., Vockenhuber C., Liechtenstein V. // VERA Laboratory, Institute for Isotopic Research and Nuclear Physics, University of Vienna, Austria // Seventh European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (ECAART), Guildford, UK, August 21-25, 2001.
6. Analysis and Application of Heavy Isotopes in the Environment / Steier P., Dellinger F., Forstner O., Golser R., Knie K., Kutschera W., Priller A., Quinto F., Srncik M., Terrasi F., Vockenhuber C., Wallner A., Wallner G., Wild E. M. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 2010. — V. 268. — P. 1045—1049.
7. Boulyga S. F. Improved Abundance Sensitivity in MC-ICP-MS for Determination of $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ Isotope Ratios in the 10^{-7} to 10^{-8} Range / Boulyga S. F., Klotzli U., Prohaska T. // J. Anal. At. Spectrom. — 2006. — V. 21. — P. 1427—1430.
8. Rokop D. J. U-236/U-238 Measurements in Three Terrestrial Minerals and One Processed Ore / Rokop D. J., Metta D. N., Stevens C. M. // Int. J. Mass. Spectrom. Ion Phys. — 1972. — V. 8. — P. 259—264.
9. Detection of Naturally Occurring U-236 in Uranium Ore / Zhao X. L., Nadeau M.-J., Kilius L. R., Litherland A. E. // Earth and Planetary Letters. — 1994. — V. 124. — P. 241—244.
10. Gulf War and Health: Volume 1. Depleted Uranium, Pyridostigmine Bromide, Sarin, and Vaccines / Carolyn E. Fulco, Catharyn T. Liverman, Harold C. Sox, Editors; Committee on Health Effects Associated with Exposures During the Gulf War; Division of Health Promotion and Disease Prevention. — Washington, DC: National Academy Press, 2000. — 436 p.
11. Response to the Royal Society Report on the Health Hazards of Depleted Uranium (DU) Munitions:
Part I [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.cadu.org.uk/cadu/articles/art_140.html
Part II [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://royalsociety.org/policy/publications/2002/health-uranium-munitions-ii/>
12. Radiological Conditions in Areas of Kuwait with Residues of Depleted Uranium : Report by an International Group of Experts. Radiological Assessment Reports Series. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2003.
13. Balkans Task Force Final Report, The Kosovo Conflict — Consequences for the Environment & Human Settlements, United Nations Environment Programme and United Nations Centre for Human Settlements (Habitat). — 1999. — ISBN 9280718011.
14. The Expert Committee to Examine Balkan Veteran Exposure to Depleted Uranium. Effects of Exposure to Depleted Uranium. The Minister for Veterans' Affairs Commonwealth of Australia. — August 2001. — 143 p.
15. Liolios T. E. Assessing the Risk from the Depleted Uranium Weapons Used in Operation Allied Force // Science and Global Security. — 1999. — Vol. 8. — P. 163—181.
16. Quantitative Measurements of Uranium Isotope ^{236}U in War Zones of Afghanistan / A. Durakovic, F. Klimaschewski, T. Weyman, I. Zimmerman // Annual Congress of the European Association of the Nuclear Medicine. October 18–22, 2014, Gothenburg, Sweden.
17. Valdes M. Estimating the Lung Burden from Exposure to Aerosols of Depleted Uranium // Radiation Protection Dosimetry. — 2009. — Vol. 134. — No. 1. — P. 23—29.
18. Bleise A. Properties, Use and Health Effects of Depleted Uranium (DU): a General Overview / Bleise A., Danesi P. R., Burkart W. // Journal of Environmental Radioactivity. — 2003. — № 64. — P. 93—112.
19. Гусев Н. Г. Радиоактивные цепочки : Справочник / Гусев Н. Г., Дмитриев П. П. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 112 с.
20. Тепловыделение в ядерном реакторе [Е. С. Глушков, В. Е. Демин, Н. Н. Покомарев-Степной, А. А. Хрулев]; Под ред. Н. Н. Пономарева-Степного. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 160 с.
21. Шевченко И. Н. Природная бета-радиоактивность растений, животных и человека / И. Н. Шевченко, А. И. Даниленко. — К. : Наук. думка, 1989. — 208 с.
22. Ильин Л. А. Вредные химические вещества. Радиоактивные элементы / Л. А. Ильин. — Ленинград : Химия, 1990. — 463 с.
23. Химия урана // Сб. науч. трудов под ред. Б. Н. Ласкорина, Б. Ф. Мясоедова. — М. : Наука, 1989. — С. 446.
24. Fairlie I. Depleted Uranium: Properties, Military Use and Health Risks / I. Fairlie // Medicine, Conflict and Survival. — 2009. — Vol. 25, No. 1. — P. 41—64.
25. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97); Государственные гигиенические нормативы. — К. : Отдел полиграфии Укр. центра госсанэпиднадзора М-ва здравоохранения Украины, 1998. — 134 с.
26. Marshall A. C. An Analysis of Uranium Dispersal and Health Effects Using a Gulf War Case Study. Sandia National Laboratories, Sandia Report. SAND2005-4331, Printed July 2005. — 208 p.
27. Макрокомпонентный и радионуклидный состав вод объекта «Укрытие» / М. С. Ходоровский, А. Я. Абрамис, В. А. Синицын, В. В. Токаревский, Е. П. Скоробогатько, А. К. Чебуркин, И. Я. Симоновская, Д. А. Кулик, Н. И. Проскура // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. — К. : Наук. думка. — 1998. — Вып. 5. — С. 120—131.
28. Проблеми взаємодії води з паливовмісними масами в об'єкті «Укриття» ЧАЕС / І. Р. Юхновський, О. Є. Кобрин, В. В. Токаревський, М. В. Токарчук // Журнал фізичних досліджень. — 1997. — Т. 1, № 2. — С. 169—180.
29. Кист А. А. Биологическая роль химических элементов и периодический закон / А. А. Кист. — Ташкент : Изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1973. — 73 с.
30. Журавлев В. Ф. Токсикология радиоактивных веществ / В. Ф. Журавлев. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 336 с.
31. Петрянов-Соколов И. В. Аэрозоли / И. В. Петрянов-Соколов, А. Г. Сутугин. — М. : Наука, 1989. — 142 с.
32. Аэрозоли объекта «Укрытие» / А. С. Вишневский, А. Г. Гонтарь, А. Е. Кузьмина, В. Н. Ткач, В. В. Токаревский. — К. : Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 1997 — 32 с. — (Препринт / Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины).
33. Басманов П. И. Легкие респираторы / П. И. Басманов, Б. И. Петрянов. — М. : Мир, 1974. — 213 с.
34. Экспериментальные исследования радиоактивных новообразований объекта «Укрытие» / А. С. Вишневский, И. Е. Кузьмина, В. Н. Ткач, В. В. Токаревский // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. — 1995. — Вып. 3. — С. 215—223.
35. Tokarevsky V. Impact on the Environment of the Airborne Depleted Uranium. Control of U-238 under condition of terrorism: Problems and way of their solution / V. Tokarevsky // CRDF-sponsored workshop, Arlington, Virginia, USA July 25-26, 2002.
36. Andersson K. G. Airborne Radioactive Contamination in Inhabited Areas / Kasper G. Andersson. — Elsevier, 2009. — 350 p. — (Radioactivity in the Environment, Vol. 15).
37. Papastefanou C. Radioactive Aerosols. — Elsevier Sciercer, 2008. — 187 p. — (Radioactivity in the Environment, Vol. 12). — ISBN: 0080440754, 9780080440750.
38. Рузер Л. С. Радиоактивные аэрозоли : Измерение концентраций и поглощение доз / Л. С. Рузер. — М. : Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1968. — 190 с.
39. Gulf War and Health. — Vol. 2 : Insecticides and Solvents / Committee on Gulf War and Health. — Washington, DC : National Academy of Sciences, 2003. — 617 p.
40. Review of Toxicologic and Radiologic Risks to Military Personnel from Exposure to Depleted Uranium During and After Combat / Committee on Toxicologic and Radiologic Effects from Exposure to Depleted Uranium During and After Combat, Committee on Toxicology, National Research Council. — Washington, DC, The National Academies Press, 2008. — 172 p.
41. Смирнов И. Н. Фоновая изменчивость аэрозольного и ионного состава приземного слоя воздуха / И. Н. Смирнов // Сб. «Мониторинг фонового загрязнения природной среды». — Л. : Гидрометеиздат, 1982. — С. 137—147.
42. Depleted Uranium: Sources, Exposure and Health Effects / Department of Protection of the Human Environment; World Health Organization. — Geneva, April 2001. — 211 p.
43. Dietz L. A. Contamination of Persian Gulf War Veterans and Others by Depleted Uranium // July 19, 1996 (last updated

Feb. 21, 1999) [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.wise-uranium.org/dgvd.html> или <http://stgvisie.home.xs4all.nl/ContaminationByDepletedUranium.html#R11>

44. *Fahey D.* Depleted Uranium and its Use in Munitions. Avril McDonald, Jann K. Kleffner and Bridgit C.A. Toebes (eds.), The International Legal Regulation of the Use of Depleted Uranium Weapons: A Cautionary Approach. Den Haag: Asser Press, 2008 [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.danfahey.com/uploads/Fahey_DU_and_use_in_munitions_2008.pdf

45. Effects of the use of armaments and ammunitions containing depleted uranium : Report of the secretary-general A/63/150. — United Nations General Assembly, 2008.

46. Depleted and Natural Uranium: Chemistry and Toxicological Effects / Craft E. S., Abu-Qare A. W., Flaherty M. M., Garofolo M. C., Rincavage H. L., Abou-Donia M. B. // Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B. — 2004. — V. 7. — P. 297—317.

47. *Pritchard M.* Health Risks of Depleted Uranium : An Independent Review of the Scientific Literature / M. Pritchard. — University of Toronto, 2004. — P. 1—44.

48. Depleted uranium: Sources, Exposure and Health Effects/ Department of Protection of the Human Environment. World Health Organization. — Geneva. April 2001 [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.who.int/hq/2001/who_sde_phe_01.1.pdf

49. Uranium Weapons. — UNIDIR Disarmament Forum. Three, 2008. — P. 58. —ISSN/EAN: 1020-7287.

50. *Thompson R.* Radioactive Warfare: Depleted Uranium Weapons, the Environment, and International Law. Environmental Law Reporter. — NEWS & ANALYSIS, 6-2006, 36 ELR 10474 — 10486.

51. UN General Assembly Resolution 62/30 of 2007. 5Dec. UN document A/RES/ 62/30, 10 Jan 2008. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/62/30

52. Effects of the Use of Armaments and Ammunitions Containing Depleted Uranium / United Nations General Assembly. — 17 October 2014 [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/69/57

53. Global treaty to ban uranium weapons : European Parliament Resolution of 22 May 2008 on (depleted) uranium weapons and their effect on human health and the environment — towards a global ban on the use of such weapons. — (Document P6_TA(2008)0233).

References

1. Nuclear Wallet Cards. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, 1990.
2. Depleted Uranium-Human Exposure Assessment and Health Risk Characterization in Support of the Environmental Exposure Report “Depleted Uranium in the Gulf” of the Office of the Special Assistant to the Secretary of Defense for Gulf War Illnesses, Medical Readiness and Military Deployments (OSAGWI). Health Risk Assessment Consultation, No. 26-MF-7555-00D, 15 September 2000.
3. Uranium and Depleted Uranium (Updated September 2014). World Nuclear Association, available at: <http://www.world-nuclear.org/info/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/uranium-and-depleted-uranium/>
4. *Berkovits, D., Feldstein, H., Ghelberg, S., Hershkowitz, A., Navon, E., Paul, M.* (2000), “²³⁶U in Uranium Minerals and Standards”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B., V. 172, pp. 372—376.
5. *Steier, P., Golser, R., Kutschera, W., Priller, A., Valenta, A., Vockenhuber, C., Liechtenstein, V.* (2001), “Heavy Ion AMS with a “Small” Accelerator”, VERA Laboratory, Institute for Isotopic Research and Nuclear Physics, University of Vienna, Austria, Seventh European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (ECAART), Guildford, UK, August 21—25, 2001.
6. *Steier, P., Dellinger, F., Forstner, O., Golser, R., Knie, K., Kutschera, W., Priller, A., Quinto, F., Srnec, M., Terrasi, F., Vockenhuber, C., Wallner, A., Wallner, G., Wild, E. M.* (2010), “Analysis and Application of Heavy Isotopes in the Environment”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B., V. 268, pp. 1045—1049.

7. *Boulyga, S.F., Klotzli U., Prohaska T.* (2006), “Improved Abundance Sensitivity in MC-ICP-MS for Determination of ²³⁶U/²³⁸U Isotope Ratios in the 10⁻⁷ to 10⁻⁸ Range”, J. Anal. At. Spectrom., V. 21, pp. 1427—1430.

8. *Rokop, D.J., Metta, D.N., Stevens, C. M.* (1972), “U-236/U-238 Measurements in Three Terrestrial Minerals and One Processed Ore”, Int. J. Mass. Spectrom. Ion Physics, V. 8, pp. 259—264.

9. *Zhao, X.L., Nadeau, M.-J., Kilius, L.R., Litherland, A.E.* (1994), “Detection of Naturally Occurring U-236 in Uranium Ore”, Earth and Planetary Letters, V. 124, pp. 241—244.

10. *Carolyn, E. Fulco, Catharyn T. Liverman, Harold C. Sox* (2000), “Gulf War and Health: Volume 1. Depleted Uranium, Pyridostigmine Bromide, Sarin, and Vaccines”, Committee on Health Effects Associated with Exposures During the Gulf War, Division of Health Promotion and Disease Prevention, Washington, DC: National Academy Press, 436 p.

11. Response to the Royal Society Report on the Health Hazards of Depleted Uranium (DU) Munitions:

Part I, available at: http://www.cadu.org.uk/cadu/articles/art_140.html
Part II, available at: <https://royalsociety.org/policy/publications/2002/health-uranium-munitions-ii/>

12. Radiological Conditions in Areas of Kuwait with Residues of Depleted Uranium: Report by an International Group of Experts, Radiological Assessment Reports Series, Vienna : International Atomic Energy Agency, 2003.

13. Balkans Task Force Final Report, The Kosovo Conflict — Consequences for the Environment & Human Settlements, United Nations Environment Programme and United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), 1999, ISBN 9280718011.

14. The Expert Committee to Examine Balkan Veteran Exposure to Depleted Uranium. Effects of Exposure to Depleted Uranium. The Minister for Veterans’ Affairs Commonwealth of Australia, August 2001, 143 p.

15. *Liolios, T. E.* (1999), “Assessing the Risk from the Depleted Uranium Weapons Used in Operation Allied Force”, Science and Global Security, Vol. 8, pp. 163—181.

16. *Durakovic, A., Klimaschewski, F., Weyman, T., Zimmerman I.* (2014), “Quantitative Measurements of Uranium Isotope ²³⁶U in War Zones of Afghanistan”, Annual Congress of the European Association of the Nuclear Medicine, October 18—22, 2014, Gothenburg, Sweden.

17. *Valdes M.* (2009), “Estimating the Lung Burden from Exposure to Aerosols of Depleted Uranium”, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 134, No. 1, pp. 23—29.

18. *Bleise, A., Danesi, P. R., Burkart, W.* (2003), “Properties, Use and Health Effects of Depleted Uranium (DU): a General Overview”, Journal of Environmental Radioactivity, No. 64, pp. 93—112.

19. *Gusev, N.G., Dmitriev, P.P.* (1988), “Radioactive Chains: Reference Book” [Radioaktivnyye tsepochki: Spravochnik], Moscow, Energoatomizdat, 112 p. (Rus)

20. *Glushkov, Ye.S., Diomin, V.E., Ponomariov-Stepnoi, N.N., Kh-rulev, A.A.* (1985), “Heat Release in Nuclear Reactor” [Teplovydeleniye v yadernom reaktore], Moscow, Energoatomizdat, 160 p. (Rus)

21. *Shevchenko, I.N., Danilenko, A.I.* (1989), “Natural Beta-Radioactivity of Vegetation, Animals and Human” [Prirodnaia beta-radioaktivnost rastenii, zhivotnykh i cheloveka], Kyiv, Naukova dumka, 208 p. (Rus)

22. *Iiin, L.A.* (1990), “Harmful Chemical Substances. Radioactive Elements” [Vrednyie khimicheskie veschestva. Radioaktivnyie elementy], Leningrad, Khimiia, 463 p. (Rus)

23. *Laskorin, B.N., Miasoiedov, B.F.* (1989), “Uranium Chemistry” [Khimiia urana], Moscow, Nauka, 446 p. (Rus)

24. *Fairlie, I.* (2009), “Depleted Uranium: Properties, Military Use and Health Risks”, Medicine, Conflict and Survival, Vol. 25, No. 1, pp. 41—64.

25. Radiation Safety Standards of Ukraine (NRBU-97); State Health and Safety Regulations of Ukraine [Normy radiatsionnoi bezopasnosti Ukrainy (NRBU-97); Gosudarstvennyie gigiyenicheskie normativy], Kyiv, 1998, 134 p. (Rus)

26. *Marshall, A. C.* (2005), “An Analysis of Uranium Dispersal and Health Effects Using a Gulf War Case Study”, Sandia National Laboratories, Sandia Report, SAND2005-4331, 208 p.

27. *Khodorovskiy, M.S., Abramis, I.Ya., Sinitsin, V.A., Tokarevskiy, V.V., Skorobogatko, Ye.P., Cheburkin, A.K., Siminovskaia, I.Ya.,*

- Kulik, D.A., Proskura, N.I.* (1998), “Macrocomponent and Radionuclide Composition of the Shelter Water” [Makrokomponentnyi i radionuklidnyi sostav vod obiekta Ukrytiie], Problems of Chornobyl Exclusion Zone, Kyiv, Naukova dumka, Ed. 5, pp. 120–131. (Rus)
28. *Yukhnovskii, I.R., Kobrin, O.Ye., Tokarevsky, V.V., Tokarchuk, M.V.* (1997), “Problems of Water Interaction with Fuel Containing Masses in the Shelter” [Problemy vzaiemodii vody z palyvovmisyntymy masamy v obiekty Ukryttaa], Physical Research Journal, V. 1, No. 2, pp. 169–180. (Ukr)
29. *Kist, A.A.* (1973), “Biological Role of Chemical Elements and Periodic Law” [Biologicheskaiia rol' khimicheskikh elementov i periodicheskii zakon], Tashkent, FAN Publizing House, Uzbek SSR, 73 p. (Rus)
30. *Zhuravliov, V.F.* (1990), “Toxicology of Radioactive Substances” [Toksikologiiia radioaktivnykh veschestv], Moscow, Energoatomizdat, 336 p. (Rus)
31. *Petrianov-Sokolov, I.V., Sutugin, A.G.* (1989), “Aerosols” [Aerologii], Moscow, Nauka, 142 p. (Rus)
32. *Vishnevskii, A.S., Gontar, A.G., Kuzmina, A.Ye., Tkach, V.N., Tokarevsky, V.V.* (1997), “The Shelter Aerosols” [Aerologii obiekta Ukrytiie], Kyiv, V. Bakul Institute for Superhard Materials, NASU, 32 p. (Rus)
33. *Basmanov, P.I., Petrianov, B.I.* (1974), “Light Respirators” [Legkiiie respiratory], Moscow, Mir, 213 p. (Rus)
34. *Vishnevskii, A.S., Kuzmina, A.Ye., Tkach, V.N., Tokarevsky, V.V.* (1995), “Experimental Research of Newly Generated Radioactive Substances of the Shelter” [Eksperimentalnyie issledovaniiaradioaktivnykh novoobrazovaniia obiekta Ukrytiie], Problems of Chornobyl Exclusion Zone, Ed. 3, pp. 215–223. (Rus)
35. *Tokarevsky V.* (2002), “Impact on the Environment of the Airborne Depleted Uranium. Control of U-238 under condition of terrorism: Problems and Way of Their Solution”, CRDF-Sponsored Workshop, Arlington, Virginia, USA, July 25–26, 2002.
36. *Andersson, K. G.* (2009), “Airborne Radioactive Contamination in Inhabited Areas”, Elsevier, 350 p. (Radioactivity in the Environment, Vol. 15).
37. *Papastefanou, C.* (2008), “Radioactive Aerosols”, Elsevier Science, 187 p. (Radioactivity in the Environment, Vol. 12). — ISBN: 0080440754, 9780080440750.
38. *Ruzer, L.S.* (1968), “Radioactive Aerosols: Measuring of Concentrations and Dose Absorption” [Radioaktivnyie aerologii: Izmereniie kontsentratsii i pogloscheniie doz], Moscow, Committee of Standards, Measures and Measuring Equipment, USSR, 190 p. (Rus)
39. Gulf War and Health. — Vol. 2 : Insecticides and Solvents / Committee on Gulf War and Health. — Washington, DC : National Academy of Sciences, 2003. — 617 p.
40. Review of Toxicologic and Radiologic Risks to Military Personnel from Exposure to Depleted Uranium During and After Combat / Committee on Toxicologic and Radiologic Effects from Exposure to Depleted Uranium During and After Combat, Committee on Toxicology, National Research Council. — Washington, DC, The National Academies Press, 2008. —172 p.
41. *Smirnov, I.N.* (1982), “Background Change of Aerosol and Ion Concentration of Surface Air” [Fonovaia izmenchivost aerologii i ionnogo sostava prizemnogo sloia vozdukh], Monitoring of Background Contamination of the Environment, Gidrometeoizdat, pp. 137–147. (Rus)
42. Depleted Uranium: Sources, Exposure and Health Effects / Department of Protection of the Human Environment; World Health Organization. — Geneva, April 2001. — 211 p.
43. *Dietz, L. A.* “Contamination of Persian Gulf War Veterans and Others by Depleted Uranium”, July 19, 1996 (last updated Feb. 21, 1999), available at: <http://www.wise-uranium.org/dgvd.html> or <http://stgvisie.home.xs4all.nl/ContaminationByDepletedUranium.html#R11>
44. *Fahey, D.* “Depleted Uranium and its Use in Munitions. Avril McDonald, Jann K. Kleffner and Bridgit C.A. Toebe (eds.), The International Legal Regulation of the Use of Depleted Uranium Weapons: A Cautionary Approach. Den Haag: Asser Press”, 2008 available at: http://www.danfahey.com/uploads/Fahey_DU_and_use_in_munitions_2008.pdf
45. Effects of the Use of Armaments and Ammunitions Containing Depleted Uranium: Report of the Secretary-General A/63/150, United Nations General Assembly, 2008.
46. *Craft, E. S., Abu-Qare, A. W., Flaherty, M. M., Garofolo, M. C., Rincavage, H. L., Abou-Donia, M. B.* (2004), “Depleted and Natural Uranium: Chemistry and Toxicological Effects”, Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, V. 7, pp. 297–317.
47. *Pritchard, M.* (2004), “Health Risks of Depleted Uranium: An Independent Review of the Scientific Literature”, University of Toronto, pp. 1–44.
48. Depleted Uranium: Sources, Exposure and Health Effects/ Department of Protection of the Human Environment. World Health Organization, Geneva, April 2001, available at http://www.whqlibdoc.who.int/hq/2001/who_sde_phe_01.1.pdf
49. Uranium Weapons, UNIDIR Disarmament Forum. Three, 2008, 58 p. —ISSN/EAN: 1020–7287.
50. *Thompson, R.* “Radioactive Warfare: Depleted Uranium Weapons, the Environment, and International Law. Environmental Law Reporter”, NEWS & ANALYSIS, 6–2006, 36 ELR 10474 — 10486.
51. UN General Assembly Resolution 62/30 of 2007. 5 Dec. UN Document A/RES/ 62/30, 10 Jan 2008, available at: http://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/62/30
52. Effects of the Use of Armaments and Ammunitions Containing Depleted Uranium, United Nations General Assembly, 17 October 2014, available at: http://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/69/57
53. Global Treaty to Ban Uranium Weapons: European Parliament Resolution of 22 May 2008 on (Depleted) Uranium Weapons and Their Effect on Human Health and the Environment, Towards a Global Ban on the Use of Such Weapons. — (Document P6_TA(2008)0233).

Получено 12.02.2015.