

УДК 550.423 + 54-722 + 551.521.9+ 550.84.094.1

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД НА “БЕЗОБИДНЫЙ” ДЕПЛЕТИРОВАННЫЙ УРАН

© 2023 г. С. М. Жмодик^{1,*}, В. А. Пономарчук¹

Представлено академиком РАН Н.П. Похиленко 06.06.2023 г.

Поступило 06.06.2023 г.

После доработки 14.07.2023 г.

Принято к публикации 15.07.2023 г.

По данным альфа-авторадиографии на толстослойных ядерных фотоэмульсиях А-2 визуализировано взаимодействие альфа-излучения от микро- и наночастиц UO_2 (уранинита) с веществом. Сферическая область воздействия альфа-частиц вокруг микрозерен UO_2 , размерами до 100 микрон, представляет собой глубоко преобразованное вещество, с высокой плотностью радиационных дефектов. Трансляция этих результатов на живой организм приводит к выводу о специфическом виде воздействия микро- и наночастиц обедненного урана, при котором продолжительное внутреннее облучение в малых дозах всего организма сочетается с катастрофически высокими дозами альфа-излучения в локальных зонах, вблизи микро- и наночастиц UO_2 .

Ключевые слова: уран, деплетированный, обедненный уран, альфа-авторадиография, толстослойная ядерная фотоэмульсия, альфа-частицы

DOI: 10.31857/S2686739723601229, **EDN:** LESZAP

ВВЕДЕНИЕ

Прошло почти 25 лет со времени бомбардировок в период первой (1990–1991 гг.) и второй (2003 г.) Персидских войн, а также Югославии (1996 г.), снарядами с деплетированным (обедненным) ураном (DU) в результате “гуманитарной” интервенции западных стран и вновь весь мир заговорил о возможности и полезности или о крайне негативных последствиях применения DU. Во многих статьях снаряды, бомбы и ракеты с DU рассматриваются как атрибут обычного вооружения, ничем не отличающегося по своим воздействиям от снарядов, например, с вольфрамом. В целом сделан вывод, что основным поражающим фактором воздействия DU на здоровье людей являются не столько радиационные эффекты, сколько химическая токсичность урана, но она также невелика и снаряды с DU – “стандартный компонент бронированных боеприпасов” ([1–5] и др.). Эти данные абсолютно противоречат результатам, полученным ранее [6].

Международная коалиция по запрещению уранового оружия (ICBUW) оспаривает используемую модель радиационного облучения и оцен-

ки дозы, лежащую в основе исследования Комитета по статье 31, утверждая, что оружие с DU представляет собой совершенно новый источник загрязнения окружающей среды, который может прямо или косвенно воздействовать на людей и саму окружающую среду. Утверждается, что последствия для здоровья, которые могут быть вызваны применением оружия, содержащего DU, требуют дополнительных всесторонних научных оценок [3, 5]. Появились исследования, в которых показано, что излучение альфа-частиц играет значительную роль в токсических эффектах DU, вызывая индуцированные DU: неопластические трансформации; мутагенность; хромосомное повреждение; геномную нестабильность *in vitro* и оказывая лейкемогенное и генотоксичное воздействие [7, 8].

В течение многих лет авторы данной работы применяли метод авторадиографии, для исследования минералого-геохимических особенностей урана в различных объектах окружающей среды, в том числе в породах и рудах щелочных массивов и карбонатитов [9]. Трансляция этих результатов на живые организмы позволила обратить внимание на очень важный фактор, слабо учитываемый или вообще не обсуждаемый в исследованиях по воздействию DU на живые организмы, в частности, проникновение микро- и наночастиц DU внутрь организма (легкие, желудочно-кишечный тракт и другие) и катастрофическое воздействие радиоактивного излучения от таких частиц в ло-

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

*E-mail: zhmodik@igm.nsc.ru

Таблица 1. Содержание и активность изотопов NU и DU

Изотоп*	YA, Бк/мг**	T/2, годы***	Природный уран			Деплетируемый уран		
			Мас., %	P****	P, %	Мас., %	P*****	P, %
^{238}U	12.4	4.51×10^9	99.284	12.4	48.8	99.8	12.4	83.7
^{235}U	80	7.13×10^8	0.711	0.57	2.4	0.2	0.16	1.1
^{234}U	2.31×10^5	2.45×10^5	0.0053	12.4	48.8	0.001	2.26	15.2
Общее				25.37			14.82	

* — вес изотопа относительно ^{16}O ; ^{238}U — 238,12493, ^{235}U — 235.11704, ^{234}U — 234.11379; ** — YA — удельная активность изотопа, Бк/мг; *** — T/2 — период полураспада изотопа, годы; **** — активность изотопа в 1 мг NU, в Бк; ***** — активность изотопа в 1 мг DU, в Бк.

кальных зонах организма, особенно относящихся к репродуктивным. В данной статье наглядно показан характер взаимодействия альфа-излучения от микро- и наночастиц уранинита (UO_2) с веществом на примере ядерной фотоэмульсии, и результаты такого взаимодействия, позволяющие оценить масштабы аномальной деструкции живых тканей.

ДЕПЛЕТИРОВАННЫЙ (DU) И ПРИРОДНЫЙ УРАН (NU)

Уран — металл плотностью 19.05 г/см³ состоит из трех изотопов — ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U с содержаниями, которые меняются в редких случаях. Массовые доли природных изотопов урана, их периоды полураспада и удельная активность представлены в табл. 1. В NU активность, без продуктов радиоактивного распада, определяется распадом изотопов урана (^{234}U , ^{235}U и ^{238}U) и составляет 25.37 Бк/мг. С учетом продуктов распада — членов радиоактивных семейств ^{238}U , ^{234}U и ^{235}U , которые также являются альфа-излучателями, удельная активность природного урана почти на порядок выше.

В результате частичного извлечения из природного урана изотопов ^{235}U и ^{234}U , а также удаления продуктов распада ^{238}U , ^{235}U и ^{234}U , оставшаяся часть называется деплетируемым или обедненным ураном (DU) (табл. 1). В DU, как и в NU

изотопы являются альфа-излучателями, а эмиссия бета-частиц и гамма-излучения низка [3].

В табл. 2 показаны средние энергии на одно преобразование, испускаемые ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U . Длина пробега альфа-частиц с энергией 5 МэВ составляет примерно 4–5 см в воздухе и 50 мкм в мягких тканях [10]. Поэтому DU представляет радиационную опасность при его поступлении внутрь организма, прежде всего при вдыхании или проникновении в желудочно-кишечный тракт. Кроме того, в пенетраторах с DU выявлены следы альфа-излучателей ^{236}U , ^{239}Pu и ^{240}Pu , Am, Np и Tc [3].

Потенциальные радиологические эффекты, связанные с поступлением U и DU как при вдыхании, так и при приеме внутрь, были оценены различными международными экспертными организациями [3]. Со временем появилось все больше свидетельств того, что уран, в том числе деплетируемый, является гораздо более опасным, чем предполагалось, т.е. существует какое-то аномальное свойство (качество), которое вызывает большое количество генетических повреждений в клетках при очень низких общих дозах. Кроме того, имеются факты применения необедненного, фактически природного урана, в бомбах и ракетах при проведении военных действий странами НАТО [11].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фиксирование следов альфа-частиц от распада ядер урана в соединении UO_2 — уранините, осуществлено автордиографическим методом с использованием пластинок с толстослойной ядерной фотоэмульсией типа А-2 (НИКФИ) для регистрации альфа-частиц. При прохождении альфа-частиц через ядерную фотоэмульсию вдоль трека образуются ионно-электронные пары, на каждую из которых затрачивается в среднем 34 электронвольта. При исходной энергии альфа-частиц 4.26 МэВ (табл. 2) число пар составляет более 125 000. Кроме того, использовался пластиковый твердотельный трековый детектор

Таблица 2. Средние энергии на превращение, испускаемые изотопами урана

Изотоп	Средняя энергия, излучаемая за один распад, МэВ/Бк		
	Альфа	Бета	Гамма
^{238}U	4.26	0.01	0.001
^{235}U	4.47	0.048	0.154
^{234}U	4.84	0.0013	0.002

CR-39, также предназначенный для регистрации альфа-частиц. Образцы горных пород — урансодержащих низкотермических углеродисто-кремнистых сланцев — шлифовались и полировались для лучшего контакта образца с пластинками для ядерных исследований и детектором CR-39. Радиоактивные минералы углеродисто-кремнистого сланца представлены уранинитом (UO_2). Состав минералов изучался на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan в АЦКП ИГМ СО РАН (табл. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении локального распределения и форм нахождения урана в горных породах методом авторадииграфии было установлено широкое распространение во многих типах пород частиц-концентраторов урана микро- и наноразмера [9]. В частности, при изучении пространственного распределения урана в углеродисто-кремнистых сланцах юго-восточной части Восточного Саяна были выявлены микро- и наночастицы (зерна) уранинита (UO_2) (рис. 1, 2; табл. 3). Зерна уранинита располагаются среди тонкозернистого кварца с примесью серицита и керогена. На альфа-авторадииграммах хорошо виден характер взаимодействия альфа-частиц, излучаемых микро- и наночастицами уранинита, с ядерной фотоэмульсией (рис. 2). На авторадииграммах над зернами UO_2 фиксируется микро-участок с максимальным количеством наложенных друг на друга альфа-треков, который окружен “галом” — радиально расположенными альфа-треками. Размеры такого “гало” (“солнца”) превышают 100 мкм, в случае точечного источника излучения размерами от 2 до 10 микрон (рис. 1 а–г). Полученное изображение воздействия альфа-частиц от микрозерен природного UO_2 на ядерную фотоэмульсию можно рассматривать как своеобразный эксперимент, который демонстрирует последствия взаимодействия альфа-частиц, образующихся при распаде ядер урана, с веществом (в данном случае — ядерной фотоэмульсией). Очевидно, что характер взаимодействия альфа-частиц, возникших при распаде изотопов DU, не отличается от NU, с различием лишь в удельной активности.

Физическая сущность механизма взаимодействия альфа-частиц с веществом, в частности ядерной эмульсии, детально рассмотрена в специальной литературе [12]. Перемещение альфа-частицы в веществе приводит к возникновению ион-электронных пар.

Сферическая область вокруг микрозерен UO_2 , возникающая при воздействии альфа-частиц на ядерную фотоэмульсию, представляет собой глубоко преобразованное вещество, с высокой плотностью радиационных дефектов (рис. 1 а–г).

Таблица 3. Выборочные химические составы уранинита (UO_2) (мас. %) в углеродисто-кремнистых сланцах юго-восточной части Восточного Саяна

№ анализа	UO_2	ThO_2	PbO
05_19_5a	93.78		6.22
05_19_5b	93.57		6.43
05_19_8	93.61		6.39
12_01_(1_2)	93.42		6.58
12_05_(1_3)	94.24		5.76
12_05_4	93.68		5.94
12_05_5	93.29		6.71
12_05_6	92.99		7.01
12_05_10	93.94		6.06
12_05_12	93.22		6.03
12_05_13	93.54	0.30	5.95
12_05_15	93.69		6.31

Отсутствие данных — ниже предела обнаружения; по причине малых размеров (первые микрон, рис. 2) частиц UO_2 , в анализы не включены содержания SiO_2 , Al_2O_3 и K_2O от вмещающих кварца и серицита.

В нашем случае в ядерной фотоэмульсии А-2 фиксируется дефектная область с треками радиусом до 50 микрон (рис. 2 а–г). Учитывая возрастающую интенсивность ионизации во второй половине трека (кривая Брэгга), удельная ионизация в дефектной области становится более равномерной.

Можно предполагать, что в веществе (например, легочной живой ткани) с низкой плотностью, близкой к 1 г/см^3 , дефектная область вокруг частицы UO_2 будет иметь величину не менее 50 мкм. Очевидно, что морфология дефектной области в живой ткани вокруг микро- и наночастиц DU не будет отличаться от приведенных альфа-авторадииграмм. Об этом свидетельствуют данные, полученные в Радиационной лаборатории Лоуренса (Беркли, Калифорния, 20 сентября 1982 г.) при фиксации частицы плутония (размером первые микрон) в легочной ткани обезьяны со следами альфа-частиц в виде “звезды” (дефектной области) размером около 50 микрон с разрушением более 10000 клеток [13].

Совершенно иной тип воздействия альфа-частиц на окружающее вещество фиксируется в случае равномерного пространственного распределения урана, т.е. не в виде микро- и наночастиц, а в виде атомарно рассеянной формы. Рассеянная форма урана в сланцах связана с углеродистым веществом — керогеном. На авторадииграммах (рис. 2 д, е) регистрируются отдельные разноразмерные треки альфа-частиц, отражающие рассеянную форму нахождения урана. При общих равных содержаниях (активностях, дозе)

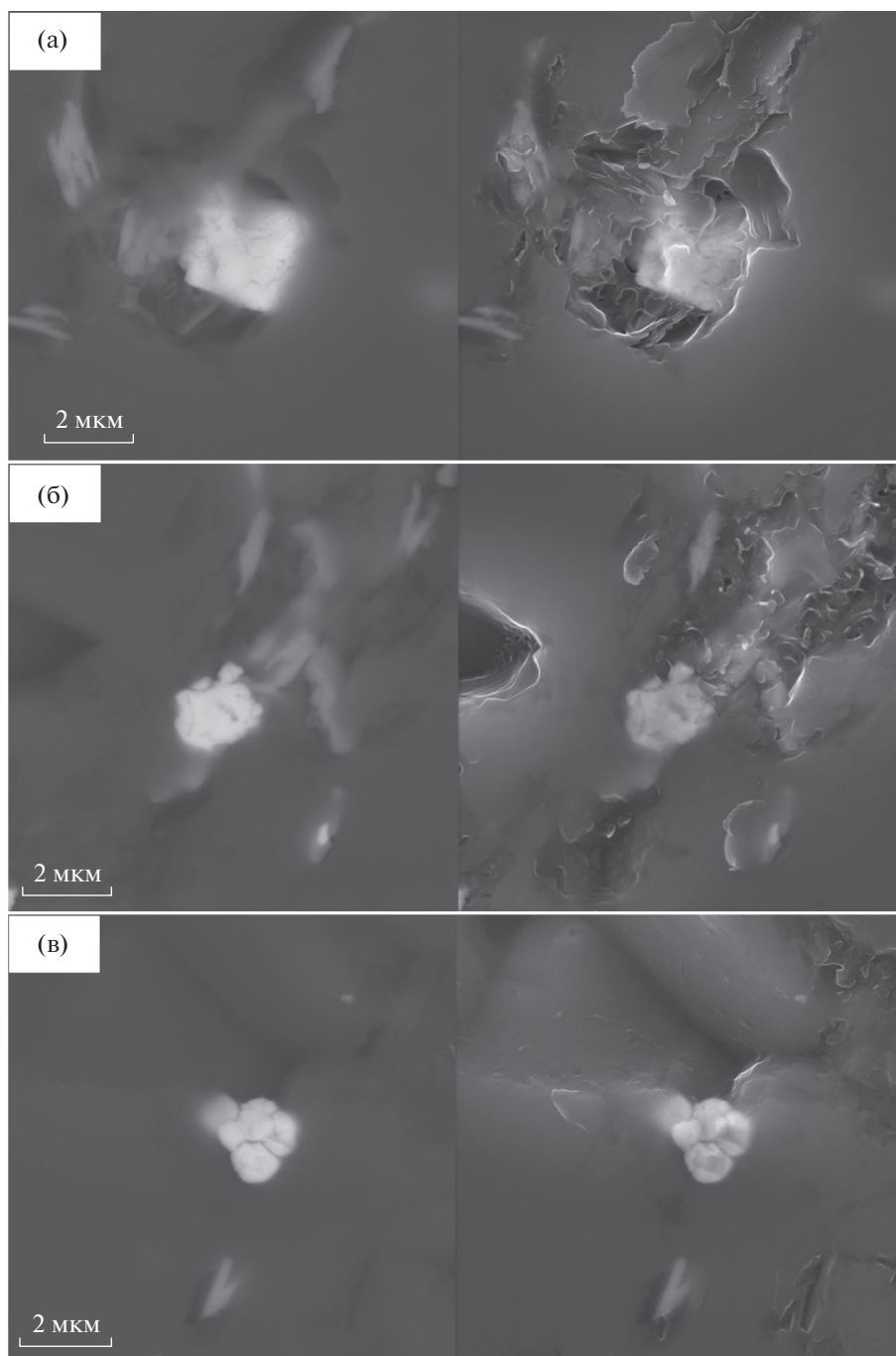


Рис. 1. Зерна уранинита разной морфологии среди кварца, с мусковитом и керогеном в углеродисто-кремнистых сланцах: а — кристалл; б — изометричная; в — коллоидная. Слева — BSE; справа — SE.

урана, находящегося в рассеянной форме и в виде микро-и наночастиц, эффект воздействия на окружающее вещество в локальных участках абсолютно несопоставим. Как справедливо было отмечено [14], растворимые соединения радионуклидов могут равномерно распределяться и создавать в организме равномерную дозу, подобно внешнему гамма- и рентгеновскому облучению.

Оценка риска в этих случаях существенно не отличается от риска длительного облучения от внешних источников с низкой линейной передачей энергии, при котором одновременно с облучением могут происходить репарация и восстановление радиационных повреждений в организме.

Нерастворимые соединения радионуклидов характеризуются тем, что при их инкорпорации

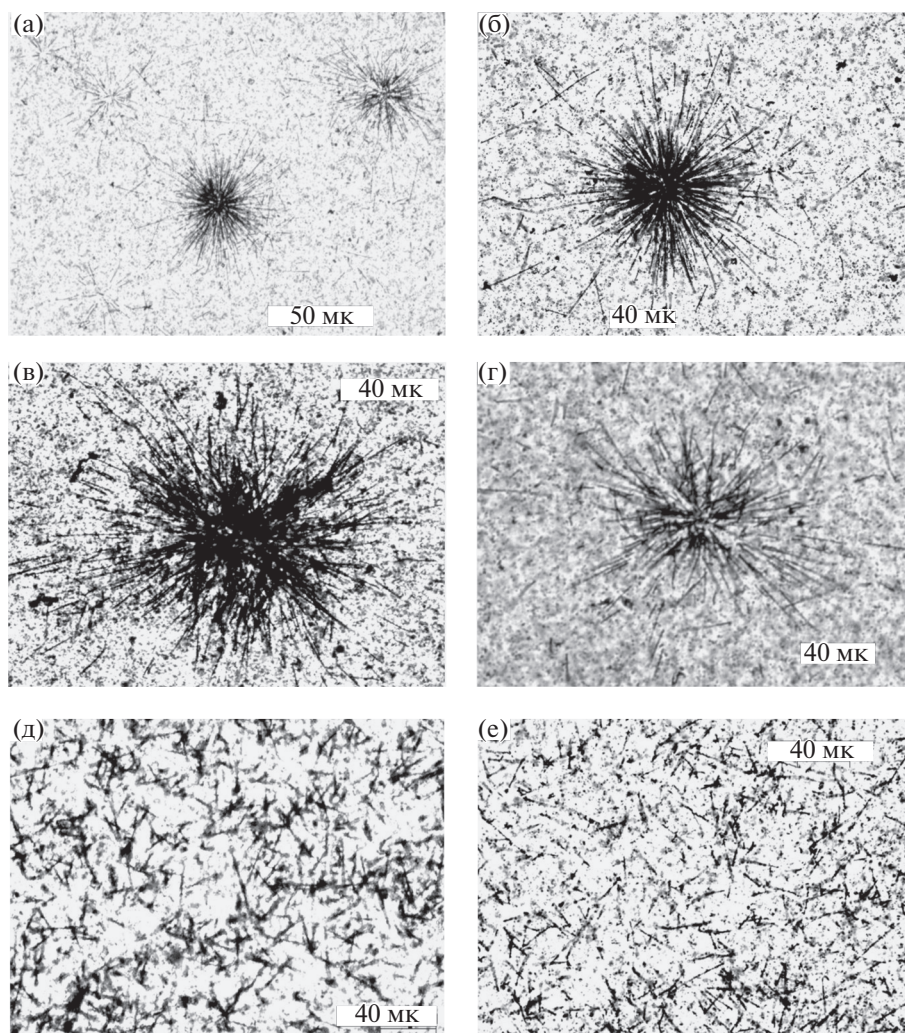


Рис. 2. Альфа-авторadiограммы, фиксирующие локализацию урана в микро- и наночастицах UO_2 (уранинита) (а–г), а также в рассеянной (“атомарной”) форме (д–е) в углеродисто-кремнистом сланце. Альфа-частицы образуют в толстослойной ядерной фотоэмульсии (тип А-2) вокруг частиц UO_2 дефектные области – “звезды”; “солнца”, размеры которых в сотни раз превышают размеры самих частиц: от 0.5 до 7 мкм (а); 7 мкм (б); 8 мкм (в); 2 частицы по 7 мкм (г). Экспозиция 10–20 сут.

не происходит общего равномерного облучения. Напротив, происходит облучение органа преимущественного депонирования, часто также неравномерное [14]. Именно такое воздействие на окружающее вещество наблюдается в случае нахождения урана в виде микро- и наночастиц.

Исходя из значений удельной активности ^{238}U было рассчитано количество альфа-распадов из DU определенной массы. Установлено (без учета самопоглощения), что микрочастица ^{238}U сферической формы диаметром 10 мкм будет генерировать порядка 383 альфа-частиц в месяц (4663 в год), а диаметром 5 мкм – 583 альфа-частиц в год. В любом случае по аналогии взаимодействия альфа-частиц с ядерной фотоэмульсией (рис. 1 а–г), следует прогнозировать, что воздействие на вещество на контакте с микрочастицей DU будет

катастрофическим. При этом общая поглощенная доза из расчета, например, на организм или отдельный орган человека может быть ничтожно малой.

Размер частиц DU в районах бомбардировок варьирует от нанометров до микрометров [2, 15], при этом уран может находиться в различных кристаллических структурах и в различных степенях окисления, прежде всего UO_2 (около 50%), U_3O_8 и смеси этих соединений [16]. По оценкам распределения частиц DU в почвах на территории Косово, после бомбардировок Югославии, преобладающим размером (более 70%) были частицы от 1 до 8 микрон, количество которых достигало сотен тысяч (до миллиона) в нескольких мг загрязненной DU почвы [17].

Очевидно, что высокодисперсные частицы, образующиеся при применении снарядов с DU, следует рассматривать как особый тип “горячих частиц”. Главной особенностью таких “горячих частиц” является их высокая альфа-радиоактивность, определяющая высокую степень их биологической опасности. В организм человека “горячие частицы” DU поступают пероральным и ингаляционным путем, прежде всего, осажаясь в трахеях и бронхах, легочной ткани, а также в желудочно-кишечном тракте. Приблизительно 95% вдыхаемых частиц с аэродинамическим эквивалентным диаметром более 10 мкм оседают в верхних дыхательных путях, попадая затем в желудочно-кишечный тракт. Частицы размером менее 10 мкм могут достигать более глубоких отделов легких (бронхиол и альвеол) и оставаться там в течение значительного времени [2]. Дозы облучения тканей вблизи горячих частиц приводят к возникновению зон некроза и существенно превышают значения минимальных канцерогенных доз [11]. Кроме того, высокие дозы облучения клеток могут приводить к появлению мутантных клеток, а также к патологической регенерации клеток и тканей. Фактически такие сферы возникшего и постоянно поддерживаемого альфа-частицами глубоко ионизированного дефектного вещества вокруг микро- и наночастиц DU могут явиться центром хронического воспаления и пролиферации (размножения) мутантных клеток.

Повсеместно в статьях сравнивается уровень естественной, природной радиоактивности и связанной с поступлением радиоактивной пыли от DU. Вывод такого “сравнительного анализа” — отсутствие или сопоставимый эффект негативного воздействия от DU и NU. При этом не обращается внимания на тот факт, что весь NU “консервирован” в породах и минералах. Не случайно наиболее эффективными способами изоляции радиоактивных отходов являются перевод их в керамики, помещение в высоко сорбционные глинистые отложения или шахты отработанных урановых месторождений, т.е. используются природные принципы изоляции радиоактивных элементов. DU, на площадях его применения, находится в виде аэрозоля, пыли, микрочастиц, рассеянных на поверхности почв, растений, строений. То есть частицы DU находятся в несвязанном легко мигрируемом состоянии, например, при ветровой эрозии или антропогенной деятельности и, таким образом, многократно оказываясь во взвешенном состоянии, наиболее опасном для попадания внутрь организма. Частицы DU, образующиеся при взрыве и горении, являются долгоживущими, “ведут себя как газ” и перемещаются от места взрыва на значительные расстояния, долгое время оставаясь во взвешенном состоянии в атмосфере, даже в случае их повторного извлечения из почвы [11].

Из-за высокой кинетической энергии и пирофорных свойств урана боеприпасы с DU используются с целью бронебойного действия [2]. Высокая пирофорность DU ответственна за трансформацию изделий макроскопических размеров (сердечников из DU весом от первых кг до сотен и более кг) в частицы микро- и наноразмерности [15]. В момент взрыва снарядов с DU образующиеся микро- и наночастицы DU сложной морфологии с зазубренными краями имеют на своей поверхности некомпенсированный заряд, который удерживает золь долгое время во взвешенном состоянии. Фактически, в течение определенного времени после взрыва снарядов, возникшее облако микро- и наночастиц DU можно сравнить по своим свойствам с лунной пылью, имеющей также взрывную природу [18]. Высокие левитационные и адгезионные свойства пыли, на сегодняшний день, являются одним из основных труднопреодолимых факторов при дальнейших исследованиях и освоении Луны [18].

Имеются данные о длительном сохранении горячих частиц в организме человека, в частности в легких ликвидаторов Чернобыльской аварии. Дозы, получаемые клетками в зоне локализации горячих частиц, могут в сотни тысяч раз превышать летальные [19].

Альфа-частицы DU особенно опасны тем, что при попадании в организм вызывают высокие уровни ионизации и генетическое повреждение ДНК. При внутренних облучениях вблизи микро- и наночастиц DU ионизация ДНК в сотни тысяч раз превышает допустимую поглощенную дозу, а именно плотность ионизации вблизи ДНК является ключевой величиной в любой модели риска, а не доза облучения. Существующие модели оценки радиационного риска не учитывают эти факты.

ВЫВОДЫ

1. Применение альфа-автордиографии с использованием толстослойных ядерных фотоэмульсий позволяет визуализировать механизм взаимодействия альфа-частиц от UO_2 с веществом и морфологию дефектных зон.

2. Воздействие микро- и наночастиц DU на вещество представляет собой специфический вид воздействия, при котором продолжительное внутреннее облучение в малых дозах на весь организм, сочетается с катастрофически высокими дозами альфа-излучения в локальных зонах. Микро- и наночастицы DU, попавшие внутрь живого организма в виде аэрозоля в легкие или в органы пищеварительного тракта, представляют очень серьезную опасность как источник альфа-излучения, вокруг которого формируется сферическая дефектная область, размером до 100 мик-

рон, состоящая из ионизированного вещества с поврежденными белковыми и ДНК молекулами организма, а также массовым возникновением гидроксил-иона, за счет разложения воды живой материи. Размеры области радиационного повреждения в биологических объектах могут достигать от сотен до тысяч микрон, а мощность дозы в такой сфере значительно превышать нормы радиационной безопасности. При этом: степень радиационного воздействия (облучения) (единица измерения — грэй) альфа-частицами в 20 раз имеет больший биологический эффект (коэффициент качества), по сравнению с бета- и гамма-излучением; период полураспада изотопа ^{238}U — 4.47×10^9 лет; период полувыведения из легких при ингаляционном поступлении микро- и наночастиц изотопа ^{238}U — годы, при относительно низком коэффициенте всасывания [14]. Из одной тонны DU может возникнуть 8×10^{14} частиц диаметром 5 микрон (население Земли — 8.029×10^9 человек), а уже сейчас количество взорванного DU оценивается несколькими десятками тонн. Очевидно, что поступление даже одной микро- или наночастицы ^{238}U , например, в щитовидную железу живого организма, приведет к трагическим последствиям, несмотря на низкие величины общего облучения организма. Об этом же свидетельствуют исследования по взаимодействию микро- и наночастиц радионуклидов с ДНК [14].

3. Микро- и наночастицы DU следует рассматривать как особый тип “горячих частиц”, главной особенностью которых является высокая альфа-радиоактивность в микрообъеме частиц и ее непосредственной близости, определяющая высокую степень их биологической опасности, что представляет собой аномальное качество урана, вызывающее очень большое количество генетических повреждений в клетках при очень низких общих дозах.

4. Снаряды с обедненным ураном представляют собой “грязные ядерные бомбы” с катастрофическими отдаленными последствиями на окружающую среду и человека, из-за распыления микро- и наночастиц альфа-излучателя — DU, на значительных территориях, при сложности их детектирования и обнаружения.

5. Важна разработка новой модели радиационного облучения и оценки дозы в случае воздействия DU в виде микро- и наночастиц, в которой главное внимание будет уделено воздействию альфа-излучения на локальный объем живого вещества на контакте с микро- и наночастицами DU и биологические изменения в отдельных органах до ДНК.

6. Наиболее точная долговременная оценка последствий применения снарядов из DU может быть получена при сравнении частоты онкологических заболеваний на территории его приме-

нения с другими областями ([20] и др.), а также на территориях, подвергшихся бомбардировкам DU, до военных действий и после них.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Е.В. Айриянц, Д.К. Белянина и Н.С. Карманова за данные СЭМ. Особая благодарность академику РАН Н.П. Похиленко за поддержку исследований и рецензентам за ценные замечания.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансировании МНВО РФ по госзаданию ИГМ СО РАН (№ 122041400193-7; № 122041400171-5). Разработанный в данной работе методический подход получения автордиограмм использован при изучении распределения радиоактивных элементов в рудах Томторского REE-Nb-месторождения (проект РНФ 23-63-10017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Esposito M., Polić P., Bartolomei P., Benzi V., Martellini M., Cveticović O., Damjanov V., Simić M., Žunić Z., Živančević B., Simić S., Jovanovic V.* Survey of natural and anthropogenic radioactivity in environmental samples from Yugoslavia // J. Environ. Radioactivity. 2002. V. 61. P. 271–282.
2. *Bleise A., Danesi P.R., Burkart W.* Properties, use and health effects of depleted uranium (DU): a general overview // J. Environ. Radioactivity. 2003. V. 64. P. 93–112.
3. *Dekant W., De Voogt P., Peterlin B., Vighi M.* Opinion on the Environmental and Health Risks Posed by Depleted Uranium // SCHER (Scientific Committee on Health and Environmental Risks), Opinion on the environmental and health risks posed by depleted uranium, 18 May 2010. 41 p. http://ec.europa.eu/health/ph_risk/risk_en.htm
4. *Parrish R.R., Haley R.W.* Resolving whether inhalation of depleted uranium contributed to Gulf War Illness using high-sensitivity mass spectrometry // Sci. Reports. 2021. V. 11. № 3218. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82535-3>
5. *Hahn F.F., Roszell L.E., Daxon E.G., Guilmette R.A., Parkhurst M.A.* Radiological risk assessment of capstone depleted uranium aerosols // Health Physics. 2009. V. 96 (3). P. 352–362. <https://doi.org/10.1097/01.hp.0000318891.68749.66>
6. *Duraković A.* Undiagnosed Illnesses and Radioactive Warfare // Croatian Medical J. 2003. V. 44. P. 520–532.
7. *Miller A.C., Rivas R., Tesoro L., Kovalenko G., Kovaric N., Pavlovic P., Brenner D.* Radiation exposure from depleted uranium: The radiation bystander effect // Toxicology and Applied Pharmacology. 2017. V. 331. P. 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2017.06.004>
8. *Ran Y., Wang S., Zhao Y., Li J., Ran X., Hao Y.* A review of biological effects and treatments of inhaled depleted

- uranium aerosol // J. Environ. Radioactivity. 2020. V. 222. № 106357.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106357>
9. Жмодик С.М. Геохимия радиоактивных элементов в процессе выветривания карбонатитов, кислых и щелочных пород. Новосибирск: Наука, 1984. 167 с.
 10. Булдаков Л.А. Радиоактивные вещества и человек. М.: Энергоатомиздат, 1990. 160 с.
 11. Busby C. Uranium weapons: why all the fuss? // In.: Uranium weapons. Eds: K. Vignard; J. Linekar; V. Com-pagnion. Geneva: UNIDIR. 2008. P. 25–33.
 12. Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д. Исследование элементарных частиц фотографическим методом. М.: ИЛ, 1962. 625 с.
 13. Closing the Circle on the Splitting of the Atom. The Environmental Legacy of Nuclear Weapons Production in the United States and What the Department of Energy is Doing About It. The U.S. Department of En-ergy: Office of Environmental Management. 1996. 106 p. <https://www.energy.gov/em/articles/closing-circle-splitting-atom>
 14. Булдаков Л.А., Калистратова В.С. Радиоактивное излучение и здоровье. М.: Информ-Атом, 2003. 165 с.
 15. Lind O.C., Tschiersch J., Salbu B. Nanometer-microm-eter sized depleted uranium (DU) particles in the envi-ronment // J. Environ. Radioactivity. 2020. V. 211. № 106077.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106077>
 16. Salbu B., Janssens K., Lind O.C., Proost K., Danesi P.R. Oxidation states of uranium in DU particles from Kosovo // J. Environ. Radioactivity. 2003. V. 64. P. 167–173.
 17. Danesi P.R., Markowicz A., Chinea-Cano E., Burkart W., Salbu B., Donohue D., Ruedenauer F., Hedberg M., Vogt S., Zahradnik P., Ciurapinski A. Depleted uranium particles in selected Kosovo Samples // J. Environ. Radioactivi-ty. 2003. V. 64. P. 143–154.
 18. Захаров А.В., Зеленый Л.М., Попель С.И. Лунная пыль: свойства, потенциальная опасность // Аст-рономический вестник. 2020. Т. 54. № 6. С. 483–507.
<https://doi.org/10.31857/S0320930X20060079>
 19. Абрамовская А.К., Якубеня О.Н., Лавор З.В., Тама-шакина Г.Н., Лейнова С.Л., Соколик Г.А., Суркова Л.К. “Горячие частицы” в бронхоальвеолярном смыве у больных, страдающих некоторыми заболеваниями органов дыхания // Медицинские новости. 1995. № 7. С. 56–60.
 20. Иванов В.К., Кащеев В.В., Чекин С.Ю., Максю-тов М.А., Туманов К.А., Кочергина Е.В., Шукина Н.В., Цыб А.Ф. Заболеваемость и смертность участников ликвидации последствий аварии на Чернобыль-ской АЭС: оценка радиационных рисков, период наблюдения 1992–2008 гг. // Радиационная гигие-на. 2011. Т. 4. № 2. С. 40–49.

GEOCHEMICAL VIEW ON “INOFFENSIVE” DEPLETED URANIUM

C. M. Zhmodik^{a,*} and V. A. Ponomarchuk^a

^aV.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

*E-mail: zhmodik@igm.nsc.ru

Presented by Academician of the RAS N.P. Pokhilenko June 6, 2023

The interaction of alpha radiation from UO₂ micro- and nanoparticles (uraninite) with the substance was vi-sualized using alpha-autoradiography data on A-2 thick-layer nuclear photographic emulsions. The spherical area of action of alpha particles around UO₂ micrograins, up to 100 microns in size, is a deeply transformed substance with a high density of radiation defects. The translation of these results on a living organism leads to the conclusion about the specific type of impact of micro- and nanoparticles of depleted uranium, in which prolonged internal irradiation in small doses of the whole organism is combined with catastrophically high doses of alpha radiation in local zones, near micro- and nanoparticles UO₂.

Keywords: uranium, depleted, depleted uranium, alpha-autoradiography, thick-layer nuclear emulsion, alpha particles