

Радиоэкологические последствия применения боеприпасов с обедненным ураном (ОУ) и методы их оценки

Дан обзор радиационных характеристик современных боеприпасов, содержащих обедненный уран, проведен анализ их радиационной опасности. Приведен перечень методов и отечественных методик радиационного контроля, которые могут быть использованы для радиационно-экологической оценки загрязненных обедненным ураном объектов и территорий.

Ключевые слова:

обедненный уран, боеприпасы, радиоэкология, радиационная опасность, радиационные характеристики, радиационное загрязнение, дезактивация, методы радиационного контроля.

А.В.Стародубов (ФГБУ «ВИМС», г. Москва)

С.В.Байдаков (АО «СОФТЭКСПЕРТ», г. Москва)

Летом 1999 года в радиоаналитическую лабораторию Всероссийского института минерального сырья были доставлены пробы почв и грунтов из Югославии, в которых было обнаружено радиоактивное загрязнение, характерное для последствий боевого применения боеприпасов, содержащих обедненный уран (ОУ). По результатам альфа-спектрометрического исследования с радиохимической подготовкой были выявлены пробы с повышенными значениями активности ^{238}U и, одновременно, с аномально пониженным до 0,6 изотопным отношением $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, характерным для загрязнения ОУ.

В настоящий момент возникла вероятная перспектива получить радиоактивное загрязнение ОУ уже на территории Российской Федерации и сопредельных территориях вследствие использования данного вида боеприпасов против вооруженных сил России [1,7].

Табл.1. Типичный РН состав ОУ в бронебойных сердечниках [14,22].

Изотопы	Период полураспада (T _{1/2}), лет	Массовая доля, %	Удельная активность, Бк/г	Вклад в активность, %
Уран-234	2,455E+05	0,0007	2301	6
Уран-235*	7,038E+08	0,2	160	1
Уран-236	2,342E+07	0,003	7	0,02
Уран-238**	4,468E+09	99,8	12408	93

* в состоянии радиоактивного равновесия с ²³¹Th;

** в состоянии радиоактивного равновесия с ²³⁴Th, ^{234m}Pa.

Учитывая неминуемые серьезные радиологические последствия применения таких боеприпасов, руководствуясь действующими санитарно-гигиеническими нормативами и своим опытом работ с загрязненными радионуклидами (РН) объектами окружающей среды, в данной статье мы хотим изложить свой взгляд на необходимый комплекс методов и методик анализа для оценки загрязнения окружающей среды ОУ, а также дать обзор ключевым аспектам применения ОУ в современных видах вооружений.

Из-за высокой эффективности в уничтожении бронированных целей и дешевизне, с 70-х годов XX века ОУ нашел широкое применение как материал для изготовления бронебойных снарядов. В настоящее время наиболее часто используется сплав, обозначаемый «U-0.75Ti», по процентному содержанию 0,75% титана в уране [2].

РН состав ОУ, используемого в бронебойных сердечниках, в зависимости от источника ОУ, может варьироваться. Ключевым требованием министерства обороны США к ОУ является содержание изотопа урана-235 менее 0,3%, что обеспечивает невозможность поддержания цепной реакции в ядерном реакторе [14]. Наиболее типичным является состав, приведенный в табл.1. Сведения о возможности использования ОУ, полученного в результате переработки облученного в ядерном реакторе урана, приведены в [3,8,14]. В этом случае в РН состав ОУ будет входить уран-236, а также возможно присутствие трансураниевых

элементов (изотопов плутония, нептуния, америция) и продуктов деления.

Значения удельной активности ОУ в разных литературных источниках варьируют от 15 [14] до 45 [4] МБк/кг. Если просуммировать значения активности приведенных в табл.1 РН с учетом дочерних продуктов распада ²³⁸U – ²³⁴Th, ^{234m}Pa и ²³⁵U – ²³¹Th, получится около 40 МБк/кг.

На сегодняшний день производится и стоит на вооружении стран НАТО широкая номенклатура содержащих ОУ боеприпасов. Они применяются в различных калибрах, начиная от ручного стрелкового оружия калибра 15,2 мм (калибр сердечника 5,5 мм) до снарядов для танковых пушек калибра 120 мм. Автоматические пушки на бронетехнике и авиации (20, 25, 30 мм) также имеют снаряды с ОУ в номенклатуре. Основные их виды и сведения о радиоактивности перечислены в табл.2.

Бронебойный сердечник из ОУ представляет собой стержень, длину и массу которого увеличивают по мере совершенствования боеприпаса. Так, принятый на снабжение в 2003 году бронебойный сердечник танкового боеприпаса калибра 120 мм M829A3 имеет длину порядка 790 мм и массу около 7,2 кг, а разработанный в 2014 году M829A4 (рис.1) имеет длину уже около 840 мм и, соответственно, еще большую массу. Европейские страны также постоянно совершенствуют свои снаряды с ОУ: KE2020Neo (Германия), 120OFLEF2 (Франция) и др. Их тактико-

технические характеристики близки к снарядам США.

По данным из открытых источников, типичный, содержащий ОУ, бронебойный сердечник для танковой пушки 120 мм имеет массу около 5 кг и активность $nE+07 - nE+08$ Бк. В нестреляном боеприпасе сердечник с ОУ находится внутри оболочки из нерадиоактивных материалов, а открытый наконечник сердечника покрыт защитным лаком. Таким образом, нестреляный боеприпас представляет из себя закрытый источник ионизирующего излучения (ЗРИ), при операциях с которым воздействие на оператора ограничивается внешним фотонным облучением с энергией до 1 МэВ и бета-излучением с граничной энергией 2290 кэВ от ^{234m}Pa . Характерно, что практически

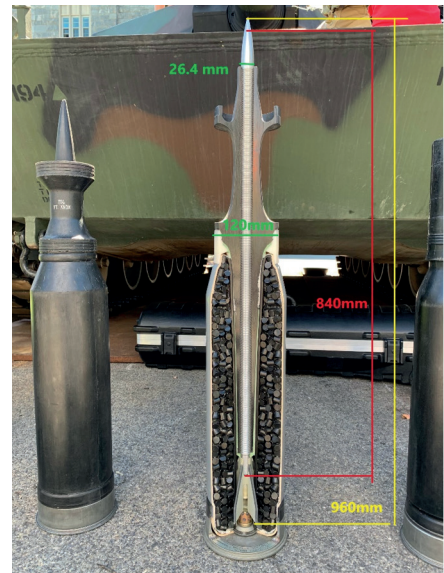


Рис.1. Принципиальное устройство бронебойного оперенного подкалиберного снаряда M829A4 (120 мм, США) [9].

Табл.2. Основные типы содержащих ОУ боеприпасов*.

Калибр, мм	Вид вооружения, страна производства	Номенклатура боеприпаса	Вес ОУ в боеприпасе, кг	Ориентировочная активность, приведенная к группе А, Бк (в соотв. с [5,6])
15,2/5,5	Снайперский комплекс Steyr IWS 2000, Австрия	15,2 мм Steyr APFSDS,	0,02—0,03	1,0E+05
20	Авиационные пушки M197, M61, корабельные артиллерийские комплексы Phalanx, США	Mk 149 Mod 0, 2Mk 149 Mod 2	Нет данных	$nE+05$
25	Штурмовик AV-8B Harrier II, США	PGU-20	0,15	6,0E+05
	БМП Bradley, США	M919	0,98	3,92E+06
30	Штурмовик A-10 Thunderbolt, США	PGU-14	0,298	1,19E+06
105	Танк M1 Abrams, США	M900	3,83	1,53E+07
120	Танк M1A1, США	M829	3,94	1,58E+07
		M829A1	4,64	1,86E+07
	Танк M1A2, США	M829A2	4,74	1,90E+07
		M829A3	7,2	2,88E+07
		M829A4	Нет данных	$nE+07$
	Танк Challenger 2, Великобритания	L26A1	4,85	1,94E+07
	Танк Leopard 2, Германия	KE2020Neo	Нет данных	$nE+07$
	Танк Leclerc, Франция	OFL 120 F2	4,5	1,8E+07
120 OFLE F2		Нет данных	$nE+07$	

* по данным из открытых источников.

при любой конфигурации и массе объекта из металлического обедненного урана, за счет самопоглощения гамма-, характеристического и тормозного рентгеновских излучений, мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы (МАЭД) фотонного излучения на поверхности составляет около 14 мкЗв/час. МАЭД внутри танка с загруженным боекомплектом снарядов из ОУ составляет порядка 2 мкЗв/ч [15]. Персоналу, работающему с боеприпасами с ОУ, предписывается контролировать индивидуальную дозу при помощи термолюминесцентных дозиметров и не находиться в танке более чем 80 суток в году.

Будучи отстрелянным, боеприпас с ОУ переходит из разряда ЗРИ в разряд открытого РН источника (ОРИ) за счет ряда эффектов, возникающих при взаимодействии движущегося с большой скоростью сердечника и материала преграды. Условно различают «твердые» материалы целей (тяжелая бронетехника) и «мягкие» (небронированная или легко бронированная техника, грунт).

При взаимодействии сердечника из ОУ с «твердой» целью из-за низкой теплопроводности урана возникает эффект «абляционно-го срезания», благодаря которому сердечник, пробивая преграду, постепенно «срезается»

или «срабатывается», что вызывает эффект «самозатачивания», обеспечивая высокий уровень бронепробиваемости. В процессе разрушения поверхностного слоя броневой сердечника, сопровождающегося уносом массы вещества, происходящего при значительных перепадах температуры (до сотен тысяч градусов на миллиметр слоя по глубине), ОУ переходит в неконденсированное состояние и уносится [2]. Затем диспергированный и разогретый уран проявляет пирофорный эффект, вступая в химическую реакцию с кислородом воздуха. Данная реакция является экзотермической и самоподдерживающейся [11]. Пирофорный эффект обеспечивает мощное запреградное действие, создавая пожар и наполняя внутренний объем цели токсичными аэрозолями.

Степень диспергирования и фрагментации снаряда после выстрела зависит от ряда факторов, таких как масса снаряда, скорость столкновения с преградой, материал преграды, угол столкновения и т. п. Натурные испытания показали, что до 70% броневой сердечника может перейти в аэрозольную форму [14]. Результаты моделирования пробития танковой брони снарядом 120 мм танковой пушки, представленные на рис.2, показывают,

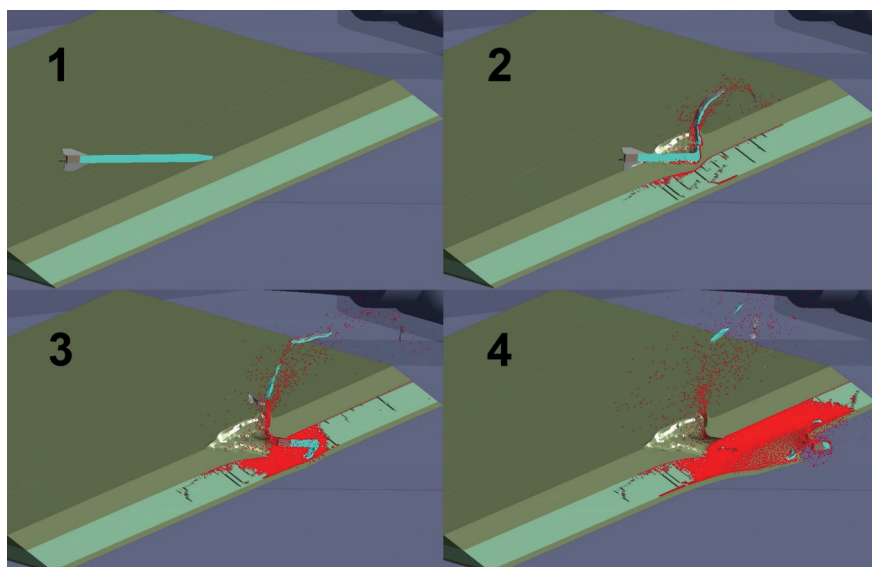


Рис.2. Последовательная визуализация моделирования пробития фронтальной композитной брони танка Т-72/Т-64 120 мм танковым снарядом М829 с сердечником из ОУ длиной 58,93 см, диаметром около 2,5 см и массой 3,94 кг, движущимся со скоростью 1670 м/с [10].

Табл.3. Известные факты применения ОУ в боевых действиях [13,24].

Место применения	Годы конфликта	Применившая сторона	Масса ОУ, попавшая в окружающую среду, тонн
Ирак, Кувейт	1991	США, Великобритания	286
Сомали	1992–1993	США	Нет данных
Босния и Герцеговина	1994–1995	США	3,2
Сербия, Косово, Черногория	1999	США	9,5
Ирак	2003	США	1000–2000
Афганистан	2001–2003	США	Нет данных
Сирия	2015	США	1,6
Россия, Украина	2022–2023	Украина	?

что сердечник будет разрушен практически полностью. При пробитии стальной плиты 1–2% массы сердечника PGU-14 30-мм авиационной пушки переходит в аэрозольное состояние с внешней стороны плиты и около 20% – с внутренней [12].

При взаимодействии сердечника из ОУ с «мягкой» целью меньшая часть снаряда переходит в состояние аэрозоли, большая часть сердечника сохраняется. Так, при попадании PGU-14 в мягкий грунт сердечники, имеющие существенно меньшую массу и скорость (298 г и 800 м/с соответственно), чем танковые, зачастую не подвергаются значительной деформации и могут быть извлечены из почвы практически целиком [8].

Общее количество ОУ, попавшего в окружающую среду в результате применения содержащих его боеприпасов, составляет тысячи тонн (табл.3). Так, например, при вторжении в Ирак в 2003 году было выстреляно порядка 2 тыс. тонн ОУ за 5 недель боевых действий.

В результате в окружающую среду попадают оксиды урана U_3O_8 , UO_2 и UO_3 , оказывая впоследствии неизбирательное поражающее действие за счет химического и радиационного токсических эффектов.

Согласно действующим в РФ гигиеническим нормативам [5,6], обращение с ОРИ, эквивалентной активности даже одного отстрелян-

ного танкового снаряда ($nE+06 - E+07$ Бк), приведенной к классу А радиотоксичности, соответствует второму классу работ с открытыми источниками излучения. Для защиты персонала от внутреннего облучения при втором классе работ должен соблюдаться целый ряд требований [5] к рабочим местам, вентиляционным системам, средствам индивидуальной защиты и т. д.

В современном представлении о механизме токсического и радиотоксического действия ОУ на организм человека критическими органами являются легкие и почки, при этом токсический эффект и доза зависят от дисперсности и растворимости соединений урана [3,16]. Растворимые соединения оказывают главным образом токсический эффект как соединения тяжелых металлов, а нерастворимые – радиотоксическое действие как источники внутреннего облучения альфа-частицами.

Наиболее опасным является аэрозольный тип поступления. Так, до 70% общей массы ОУ сердечника формируют оксиды урана в мелкодисперсной фазе с размером частиц 0,5–10 мкм, от 57 до 83% из которых являются нерастворимыми [14]. Аэрозольные частицы размером более 10 мкм задерживаются в верхних дыхательных путях, откуда они могут быть выведены из организма. Аэрозольные частицы размером менее 10 мкм проникают глубоко в бронхиолы и альвеолы легких,



Рис.3. Реконструкция обстрела здания Министерства планирования в Багдаде 08.04.2003 года из 30 мм авиационной пушки. Желтым цветом показаны места попадания содержащих ОУ боеприпасов, красным – фугасно-зажигательные снаряды [16].

находятся там длительное время (до нескольких лет), подвергая легочную ткань и лимфатические узлы радиационному облучению.

Расчетные значения, основанные на моделях Международного комитета по радиационной защите (МКРЗ, ICRP), показывают, что аэрозольные соединения урана в «нерастворимой» форме в 3 раза более радиотоксичны, чем аэрозоли в «умеренно растворимой» форме, и в 31 раз более химически токсичны для почек [3].

Таким образом, поскольку физический период полувыведения ОУ из организма из-за длительного периода ядерно-физического полураспада ^{238}U является фактически бесконечным, ключевым компонентом является биологический период полувыведения, который для нерастворимых соединений ОУ значительно дольше, что приводит к большей накопленной организмом дозе в результате увеличения времени воздействия.

Практика показывает, что наиболее интенсивные боевые действия происходят на урбанизированных территориях, где применение боеприпасов с ОУ ведется массированно и по различным видам целей (табл.3, рис.3), поэтому население пострадавших территорий

подвергается воздействию ОУ на протяжении долгих лет после завершения вооруженного конфликта.

Таким образом, применение боеприпасов с ОУ требует последующего проведения дезактивации территорий и техники. Например, на полигоне Джефферсон (JPG, Индиана, США) было выпущено по «мягким» целям 92,5 т ОУ, из которых впоследствии было найдено и собрано для переработки лишь менее 22 т ОУ (24% от общего количества). Специалисты из США отмечают, что наличие неразорвавшихся боеприпасов и густой растительности затрудняет процесс поиска отстрелянных сердечников из ОУ. Для полноценной рекультивации и дезактивации полигонов предлагается снять около полуметра верхнего слоя грунта, однако отмечается, что это связано с угрозой загрязнения сопредельных почв ОУ из-за усиления процесса эрозии. На каждом из загрязненных ОУ полигонов на территории США Лос-Аламосская национальная лаборатория (LANL) ведет радиационный мониторинг для оценки влияния долговременного загрязнения ОУ на окружающую среду и население [14].

Позиция США, применяющих боеприпасы с ОУ на территории других стран, звучит как: «Исторически сложилось так, что принимающая страна несет ответственность за устранение последствий битвы» [14]. Однако финансовые и научные возможности стран после вооруженного вторжения не позволяют в достаточной мере заниматься реабилитацией загрязненных территорий, что ведет к отсутствию системного подхода в выявлении влияния загрязнения окружающей среды ОУ на население. Имеются свидетельства о том, что население и военнослужащие впоследствии подвержены массовым заболеваниям неясной этиологии, выражающейся в комплексе симптомов: активация канцерогенеза и повышение частоты новообразований, нарушения со стороны сердечно-сосудистой системы, органов дыхания, аллергические реакции, угнетенное состояние и других [17-19]. В то же время, исследования МАГАТЭ (IAEA) не установили радиоло-

гической опасности для населения Кувейта и Ирака от последствий применения боеприпасов с ОУ [20,21].

Следует отметить, что в РФ в настоящее время установлены нормативы по объемной активности радиоизотопов урана в питьевой воде: ^{238}U до 3 Бк/кг (до 1,2 Бк/кг в эквиваленте химической токсичности [24]), ^{235}U , ^{236}U до 2,9 Бк/кг, ^{234}U до 2,8 Бк/кг [6]. В то же время отсутствуют нормативы по содержанию или уровню активности изотопов урана в почве. В США Комиссия по ядерному регулированию (NRC) допускает неограниченное использование почв при загрязнении ОУ менее 1295 Бк/кг [14].

Предварительная оценка показывает, что один снаряд типа М829А3 способен привести к загрязнению около 13 м³ почвы до установленного для ОУ в США норматива (при переходе 70% массы снаряда в аэрозольную форму) [14]. Это составит около 65 м²

Табл.4. Основные характеристики испускаемого ионизирующего излучения РН ОУ [22].

РН	Энергия альфа-частиц, кэВ	Выход частиц, %	Граничная энергия бета-частиц, кэВ	Выход частиц, %	Энергия гамма-квантов, кэВ	Квантовый выход, %		
^{238}U	4151	20,9	-----		49,55	0,064		
	4198	79,0			113,5	0,0102		
^{234}Th	-----		86,27	1,5	63,29	3,7		
			106,28	6,4	92,38	2,13		
			106,7	14,0	92,80	2,10		
			198,5	78,0				
^{234m}Pa	-----		1224,38	1,002	766,42	0,317		
			1458,96	0,948	1003,03	0,842		
			2290,0	97,56				
^{234}U	4722,4	28,42	-----		53,2	0,123		
	4774,6	71,38			120,9	0,034		
^{235}U			-----		143,76	10,96		
					4364,3	18,92	163,356	5,08
					4395,4	57,73	185,715	57,0
							205,316	5,02
^{231}Th	-----		208,1	12,2	84,21	6,6		
			289,3	13				
			290,2	41				
			307,4	29				

почвы, загрязненной до средней глубины пахотного слоя в 20 см. Захоронение такого объема загрязненного ОУ грунта в РФ стоит около 750 тыс. руб. по тарифам 2023 года [25,26]. Таким образом, только захоронение загрязненного ОУ грунта в объеме югославского конфликта составило бы порядка 1 млрд. руб. В эту сумму не входят затраты на работы по освобождению местности от взрывоопасных объектов, локализации радиоактивного загрязнения на местности, извлечению и транспортированию грунта, восстановлению растительного слоя и т. д. Таким образом, применение содержащих ОУ снарядов ведет к необходимости крайне дорогостоящей и трудоемкой дезактивации и рекультивации загрязненных территорий, что является трудновыполнимой задачей с тяжело прогнозируемыми сроками выполнения.

Для реабилитации территорий от боеприпасов с ОУ требуется применение методов и методик обнаружения урана как непосредственно в виде металлических осколков, так и распределенных в различных объектах окружающей среды, загрязненных растворимыми и нерастворимыми формами соединений урана.

Высокую точность и достоверность имеют радиоизотопные методы обнаружения РН, входящих в состав ОУ (табл.1, табл.4) по испускаемому ими радиоактивному излучению (альфа-, бета-, гамма-, рентгеновскому).

Поиск и идентификация крупных осколков ОУ может осуществляться по гамма-излучению ^{235}U , ^{234}Th , ^{231}Th при помощи поисковых радиометров, сцинтилляционных и полупроводниковых гамма-спектрометров (лабораторных и портативных).

Портативные альфа-радиометры со сцинтилляционными детекторами из сульфида цинка могут применяться для инструментального обнаружения высоких уровней загрязнения ОУ твердых поверхностей (снимаемое

и неснимаемое радиоактивное загрязнение методом влажного мазка), но непригодны для непосредственного измерения в полевых условиях таких объектов как, например, почвы.

Для инструментального обнаружения высоких уровней загрязнения твердых поверхностей и грунтов могут применяться портативные радиометры с блоками детектирования бета-излучения.

Определение уровня активности РН ОУ в таких объектах окружающей среды как грунты, природные воды, атмосферный воздух производят посредством отбора проб и последующего их анализа в лаборатории по аттестованным методикам измерений.

Например, могут быть использованы аттестованные методики по измерению:

- объемной активности ^{238}U , ^{234}U , ^{235}U в водах: ФР.1.40.2013.15400; ФР.1.40.2013.15389 (номер в федеральном реестре аттестованных методик измерений);
- удельной активности ^{238}U , ^{234}U , ^{235}U в почвах, грунтах, донных отложениях: ФР.1.40.2013.15390;
- удельной активности ^{238}U , ^{234}U , ^{235}U в растительности и аэрозольных фильтрах (атмосферный воздух): ФР.1.38.2017.27709.

Для выявления в объектах окружающей среды мелких нерастворимых частиц ОУ, являющихся аналогом «горячих частиц», может быть использован радиографический метод.

Также для обнаружения ОУ могут быть применены фотоколориметрический, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) и рентгенофлуоресцентный методы анализа.

Для снижения влияния на задействованный персонал (военнослужащих) от последствий применения боеприпасов с ОУ первостепенное значение имеет защита органов дыхания от ингаляционного пути поступления.

Через Европейский парламент, ООН и другие международные организации предприни-

мались неоднократные попытки ограничить и запретить использование боеприпасов с ОУ, как обладающих неизбирательным поражающим действием на гражданское население и создающих долговременное радиоактивное загрязнение окружающей среды, однако на текущий момент никакими международными договорами его применение не ограничивается. Вместе с тем, они представляют радиационную опасность для организма человека как по российским национальным нормативам, так и по результатам современных научных исследований. В связи с этим необходимо

иметь четкий и научно обоснованный регламент действий, обеспечивающий как локализацию радиоактивного загрязнения, так и защиту персонала (военнослужащих) и населения при применении боеприпасов с ОУ в РФ и на сопредельных территориях.

Авторы выражают благодарность главному научному сотруднику ФГБУ «ВИМС» доктору геолого-минералогических наук Бахуру А.Е. и заместителю отдела урана и редких металлов ФГБУ «ВИМС» Прохорову Д.А. за ценные советы и замечания в ходе написания статьи.

Литература

1. Британия отправила Украине снаряды с обедненным ураном // РБК. URL: <https://www.rbc.ru/politics/25/04/2023/6447ff229a794713d263eb01> (дата обращения: 18.05.2023).
2. Урановые боеприпасы: Снаряды // Techincider. URL: <https://www.techinsider.ru/weapon/8464-uranovye-boeprisy-snyady/> (дата обращения: 24.05.2023).
3. Depleted uranium (DU): general information and toxicology // gov.uk. URL: <https://www.gov.uk/guidance/depleted-uranium-du-general-information-and-toxicology> (дата обращения: 24.05.2023).
4. Ordnance board «Safety precautions for operating with depleted uranium (DU) tank ammunition» от 23.06.2000. VP(P)/OB/B/6/7/2 // President's letter 03/00.
5. Санитарные правила и нормативы «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» от 26.04.2010. СП 2.6.1.2612-10 // Официальный интернет-портал правовой информации. С изм. и допол. в ред. от 16.09.2013.
6. Санитарные правила и нормативы «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» от 07.07.2009. СанПиН 2.6.1.2523-09 // Официальный интернет-портал правовой информации.
7. Biden Administration Announces Additional Security Assistance for Ukraine // U.S. Department of Defense. URL: <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3516840/biden-administration-announces-additional-security-assistance-for-ukraine/> (дата обращения: 08.09.2023).
8. R. Pollanen, T.K. Ikaheimonen, S. Klemola et al., «Characterisation of projectiles composed of depleted uranium», *Journal of Environmental Radioactivity*, no. 64, pp. 133-142. 2003.
9. Arjun Main Battle Tank (MBT) Mark II // DFI. URL: <https://defenceforumindia.com/threads/arjun-main-battle-tank-mbt-mark-ii.51358/page-109> (дата обращения: 28.06.2023).
10. 120 mm M829 APFSDS-T Vs T-72 Tank Frontal Composite Armor // Extreme Engineering Simulation. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=DT4ZziJ6NgQ> (дата обращения: 29.06.2023).
11. M.A. Patrick, J.C. Cornett. *Morphological Characteristics of Particulate Material Formed from High Velocity Impact of Depleted Uranium Projectiles with Armor Targets*, Air Force Armament Laboratory, AFATL-TR-78-117, 1978.
12. W.C. Hanson, J.C. Elder, H.J. Ettinger et al. *Particle size distribution of fragments from depleted uranium penetrators fired against armor plate targets*, Los Alamos scientific laboratory, LA-5654, 1974.
13. W. Zwijnenburg Laid to Waste. Utrecht: www.paxforpeace.nl, 2014, 35 p.
14. U.S. Army Environmental Policy Institute. Health and environmental consequences of depleted uranium use in the U.S. Army: technical report. Atlanta: 1995, 273 p.

15. S. Fettera, F.N. von Hippel, «The Hazard Posed by Depleted Uranium Munitions», *Science & Global Security*, 8, no. 2, pp. 125-161, 2000.
16. B. Zecevic, J. Terzic, A. Catovic et al., «Dispersion of PGU-14 ammunition during air strikes by combat aircrafts A-10 near urban areas», 13th Seminar «New Trends in Research of Energetic Materials», Pardubice, Czech Republic: University of Pardubice, pp. 797-814, 2010.
17. Гудков С.В., Черников А.В., Брусков В.И. Химическая и радиационная токсичность соединений урана // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2014. т. LVIII, № 3, 4. С. 73-82.
18. S. Surdyk, M. Itani, M. Al-Lobaidy et al., «Weaponised uranium and adverse health outcomes in Iraq: a systematic review», *BMJ Global Health.*, no. 6, pp. 1-15, 2021.
19. S. Surdyk, M. Itani, M. Al-Lobaidy et al., «Environmental pollution by depleted uranium in Iraq with special reference to Mosul and possible effects on cancer and birth defect rates», *Medicine, Con ict and Survival*, no. 29, pp. 7-25, 2013.
20. Report by an international group of experts Radiological conditions in selected areas of Southern Iraq with residues of depleted uranium. Vienna: International Atomic Energy Agency, pp. 90, 2010.
21. Report by an international group of experts Radiological conditions in areas of Kuwait with residues of depleted uranium. Vienna: International Atomic Energy Agency, pp. 81, 2003.
22. Donnees atomiques et nucleaires // Laboratoire National Henri Becquerel. URL: <http://www.lnhb.fr/donnees-nucleaires/donnees-nucleaires-tableau/> (дата обращения: 01.09.2023).
23. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.1315-03. М: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения РФ, 2003, 154 с.
24. The United States Used Depleted Uranium in Syria // ForeignPolicy. URL: <https://foreignpolicy.com/2017/02/14/the-united-states-used-depleted-uranium-in-syria/> (дата обращения: 05.09.2023).
25. Приказ ФАС России от 11.10.2022 № 732/22 «Об установлении тарифов на захоронение радиоактивных отходов 1, 2, 3, 4, 5, 6 классов на период с 2023 по 2027 годы». Официальный интернет-портал правовой информации.
26. Классы РАО. ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». URL: <https://www.norao.ru/waste/classification/class/> (дата обращения: 09.09.2023).

Radioecological Consequences of Depleted Uranium (DU) Ammunition Use and Methods of their Impact Assessment

Starodubov Aleksey (FSBI «VIMS», Moscow, Russia),
Baidakov Sergey (LLC «SOFTEXPERT», Solnechnogorsk, Moscow reg., Russia)

Abstract. A review of the radiation characteristics of modern munitions containing depleted uranium has given, and an analysis of their radiation hazard has made. A list of methods and Russia's developed measurement techniques, which can be used for the radiation-ecological assessment of contaminated with depleted uranium objects and territories, has given.

Key words: *depleted uranium, DU, ammunition, radioecology, radiation hazard, radiation characteristics, radiation contamination, decontamination, radiation monitoring methods.*

А.В. Стародубов (к.г.-м.н., с.н.с., нач.сл.РБ) – ФГБУ «ВИМС», г. Москва.

Контакты: тел. +7 (495) 950-33-79, e-mail: starodubov@vims-geo.ru.

С.В. Байдаков (вед.спец.) – ООО «СОФТЭКСПЕРТ», г. Солнечногорск Московской обл.

Контакты: тел. +7 (499) 214-07-83, e-mail: baidakovS@yandex.ru.