

УДК 546.791+536.45

Экспресс-методы определения плотности загрязнения местности ураном-238

На основе анализа радиометрических свойств обедненного урана (урана-238) предлагаются экспресс-методы определения параметров загрязнения местности. Методы основаны на регистрации собственного излучения урана-238, приводятся результаты экспериментальной отработки этих методов. Приводятся предложения по аппаратуре измерений параметров радиоактивного загрязнения местности обедненным ураном.

Л. Ф. Беловодский, Д. И. Полев

Введение

Уран, обедненный по изотопу U-235 до 0,3–0,4 % (далее по тексту уран-238, обедненный уран), широко используется в различных отраслях промышленности, науки и военной техники. В настоящее время в различных регионах мира образовались значительные территории, загрязненные ураном-238. К таким территориям относятся прежде всего открытые места хранения отходов уранового производства, а также территории, где велись военные действия с применением боеприпасов (рис. 1, 2), в состав которых входит уран-238 (например, Югославия, Ирак) [1–4]. Несмотря на то что уран-238 слабо радиоактивен по сравнению со многими другими техногенными радионуклидами, его высокая концентрация в почве и других объектах окружающей среды представляет опасность для населения, проживающего в непосредственной близости от загрязненных территорий. Традиционно содержание урана-238 в почве определяется в лабораторных условиях путем его химического выделения из пробы и последующим измерением аналитической навески различными методами (радиометрическим, колориметрическим, масс-спектрометрическим). Обследование и картографирование территорий большой площади неизбежно приводит к отбору большого количества проб. Но лабораторные работы для большого количества проб по указанной технологии требуют много времени и средств. В связи с этим разработка экспресс-методов определения параметров радиоактивного загрязнения местности (РЗМ) ураном-238 на участках большой площади является весьма актуальной задачей.



Рис. 1. 120-мм танковые снаряды с обедненным ураном производства США



Рис. 2. Последствия взрыва боеприпасов с обедненным ураном на военной базе Doha вблизи Кувейт-Сити 11 июля 1991 г.

Радиометрические свойства урана-238

Основной вклад в радиоактивность обедненного урана вносит изотоп урана-238, находящийся в равновесии с продуктами своего распада торием-234 и протактинием-234. Кроме урана-238 в состав материала входит изотоп урана-234, который также является продуктом распада урана-238. Отношение активностей этих изотопов: $U-238:U-234 \sim 2:1$. Отношение активностей изотопов урана-238 и урана-235 в составе обедненного урана: $U-238:U-235 \sim 40:1$.

Радиометрические характеристики изотопов, входящих в состав обедненного урана, представлены в табл. 1 [5]. Из-за незначительного вклада в общую активность материала изотоп урана-235 (с продуктами распада) в таблицу не включен.

Таким образом, на 1 распад обедненного урана приходится 2 β -частицы и 1,5 α -частицы. Сопутствующее гамма-излучение – низкоэнергетическое, достаточно слабое (не более 0,2 γ -кванта на распад). Активность 1 г обедненного урана составляет $1,9 \cdot 10^4$ Бк.

Радиометрические характеристики обедненного урана

Изотоп	Период полураспада	Бета-излучение		Альфа-излучение		Гамма-излучение (основные линии)		Отношение активности изотопа к U-238
		$E_{\beta_{\max}}$, кэВ	Выход на распад	E_{α} , кэВ	Выход на распад	E_{γ} , кэВ	Выход на распад	
U-238	$4,47 \cdot 10^9$ лет			4182 4135	0,77 0,23		Незначительно	1:1
Th-234	24,1 сут	103	0,35			63	0,06	1:1
		190	0,65			92,5	0,07	
Pa-234	1,2 мин	2300	~ 1				Незначительно	1:1
U-234	$2,44 \cdot 10^5$ лет			4768 4717	0,72 0,28		Незначительно	1:2

Методы определения урана-238

Под экспресс-методами понимаются радиометрические методы определения параметров РЗМ ураном-238 либо непосредственно на точке измерения (радиометрические съемки), либо в условиях мобильной лаборатории (лабораторные анализы в полевых условиях). Эти методики не требуют сложного (стационарного) аналитического оборудования, сложной подготовки проб, что значительно сокращает время получения результатов по параметрам РЗМ. Конечно, рассматриваемые экспресс-методы значительно проигрывают лабораторным методикам определения урана-238 и по чувствительности, и по точности. Но в ряде случаев оперативность получения информации по РЗМ имеет более важное значение, чем высокая точность результатов.

К параметрам РЗМ ураном-238, которые определяются с помощью полевых экспресс-методов, можно отнести:

- плотность загрязнения почвы;
- плотность выпадения радионуклида;
- весовое содержание радионуклида в почве (или удельная активность радионуклида в грунте).

Как видно из табл. 1, уран-238 предпочтительнее регистрировать по α - и β -излучению. Однако из-за малого пробега α -частиц (около 3 см в воздухе) и других факторов (влажность воздуха, осадки, запыленность и т. д.) количественные определения параметров РЗМ в полевых условиях по α -излучению практически невозможны.

Методы, основанные на регистрации β -излучения, являются наиболее чувствительными для определения параметров РЗМ ураном-238 в полевых условиях, поскольку бета-излучение урана наиболее интенсивное из всех видов излучения и обладает достаточной проникающей способностью (полный пробег в воздухе β -частиц с энергией 2300 кэВ составляет ~ 12 м, с энергией 190 кэВ ~ 30 см).

Из-за небольшой интенсивности γ -излучения обедненного урана применение γ -съемки ограничено при небольших значениях параметров РЗМ. Оценено, что при измерении гамма-излучения значение превышения мощности дозы над фоном в 15 мкР/ч обусловлено значением поверхностной плотности обедненного урана ~ 10^{-4} г/см². В принципе можно использовать полевые гамма-методы для определения весового содержания (удельной активности) и плотности за-

загрязнения почвы ураном-238 при его содержании в почве не менее 1 г/кг. При применении γ -спектрометрической съемки чувствительность возрастает в несколько раз, но также увеличивается и время измерения в одной точке.

Таким образом, в качестве экспресс-методов определения параметров РЗМ ураном-238 можно рассматривать следующие:

– бета-методы определения параметров РЗМ как непосредственно на месте загрязнения, так и в условиях полевой лаборатории;

– гамма-метод в модификации пешеходной γ -съемки и γ -спектрометрической съемки для определения весового содержания (удельной активности) или плотности загрязнения почвы при достаточно высоком содержании урана-238.

Очевидно, что главной задачей для любого экспресс-метода является установление экспериментальной зависимости зарегистрированной скорости счета от фактического значения параметра РЗМ. Здесь большую роль играет тип используемых детекторов: их размеры, эффективность регистрации частиц различных энергий, собственный фон счетчиков и т. д. При разработке методик под конкретную аппаратуру эти и другие факторы следует учитывать в процессе калибровки. Для этих целей требуется изготовление калибровочных моделей, имитирующих измерение параметров РЗМ ураном-238 в полевых условиях. В процессе разработки методик определения параметров РЗМ это является, пожалуй, наиболее трудоемким и сложным этапом.

Результаты экспериментальной отработки экспресс-методов

Ниже приводятся результаты экспериментальной отработки экспресс-методов определения урана-238, полученные в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Методики, основанные на регистрации бета-излучения в полевых условиях, разрабатываются довольно давно. В частности, установлена экспериментальная зависимость между содержанием урана-238 в слое почвы толщиной 1 см (геометрия "толстого" слоя) и регистрируемой плотностью потока β -частиц для радиометра РУП-1 (с детектором на основе газоразрядного счетчика СБТ-10):

$$Q = (5,5 \pm 2,1) N_{\beta},$$

где Q – содержание урана в почве, мг/кг; N_{β} – интенсивность β -излучения, измеряемая прибором РУП-1, част./($\text{мин} \cdot \text{см}^2$).

На основании этой зависимости предложена методика определения содержания обедненного урана в почве по интенсивности β -излучения с помощью прибора РУП-1. На рис. 3 представлены расчетный (гистограмма) и экспериментальный (сплошная линия) спектры альфа-излучения обедненного урана. Экспериментальный спектр получен для геометрии "толстого" слоя. Наблюдается хорошая сходимость между расчетным и экспериментальным спектрами по форме, а также по интенсивности для основных линий альфа-излучения.

В последнее время отрабатывались радиометрические экспресс-методы измерения плотности выпадения урана-238. В одном из опытов проводились измерения плотности потока β -частиц (β -радиометрический метод) и скорости счета в области энергий γ -излучения урана-238 (γ -спектрометрический метод) до и после опыта. В качестве измерительных средств использовались радиометр САВ с блоками детектирования на основе счетчиков Гейгера – Мюллера (производство Франции) и гамма-спектрометр SM-512 (производство Германия) со сцинтилляционными блоками детектирования NaI(Tl).

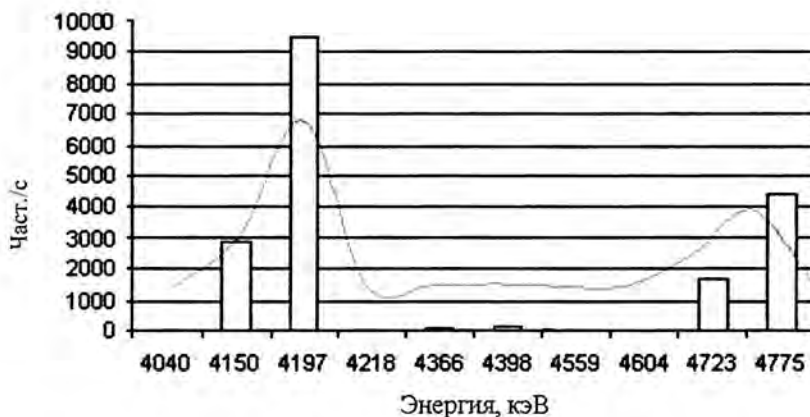


Рис. 3. Расчетный (гистограмма) и экспериментальный (сплошная линия) спектры альфа-излучения обедненного урана. Расчетный спектр нормирован на массу 1 г

Разница в результатах измерений до и после опыта должна соответствовать плотности выпадения урана-238, которая определялась по планшетной съемке лабораторными методами. Результаты радиометрических измерений и последующего сопоставления с лабораторными анализами показали, во-первых, хорошую сходимость данных β -радиометрических и γ -спектрометрических измерений, а во-вторых, устойчивую корреляцию между полевыми радиометрическими измерениями и данными лабораторных анализов.

На рис. 4 приведена корреляционная зависимость плотности выпадения урана и разницы интенсивности бета-излучения до и после опыта. Коэффициент корреляции составляет 0,7. Приведенное на рисунке уравнение линейной регрессии, полученное по методу наименьших квадратов, безусловно, не должно рассматриваться как окончательное, так как получено для относительно небольшого числа значений. Тем не менее полученная достаточно устойчивая корреляционная связь свидетельствует о том, что радиометрические методы можно использовать для оценки плотности выпадения урана-238.

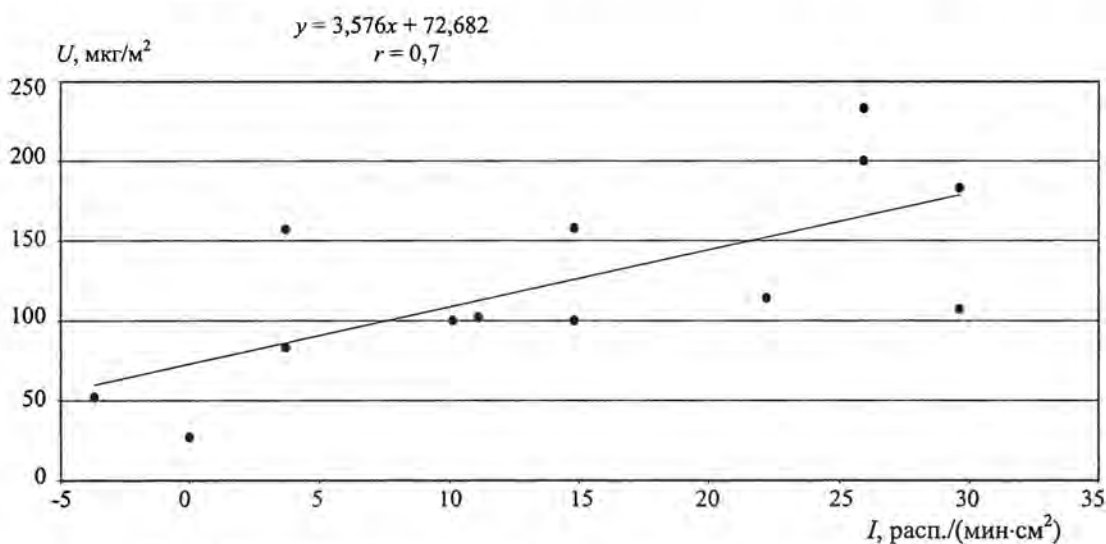


Рис. 4. Корреляционная зависимость между плотностью выпадения урана и интенсивностью бета-излучения, обусловленной выпадением урана-238

На рис. 5 приведены расчетный и экспериментально полученный спектры гамма-излучения урана-238. Наблюдается удовлетворительная сходимость расчетного и экспериментального спектров. С достаточной степенью достоверности были зафиксированы превышения средних скоростей счета над фоновыми для наиболее интенсивных по выходу гамма-квантов с энергией $E_\gamma = 63$ кэВ и $E_\gamma = 92,5$ кэВ, обусловленных Th-234.

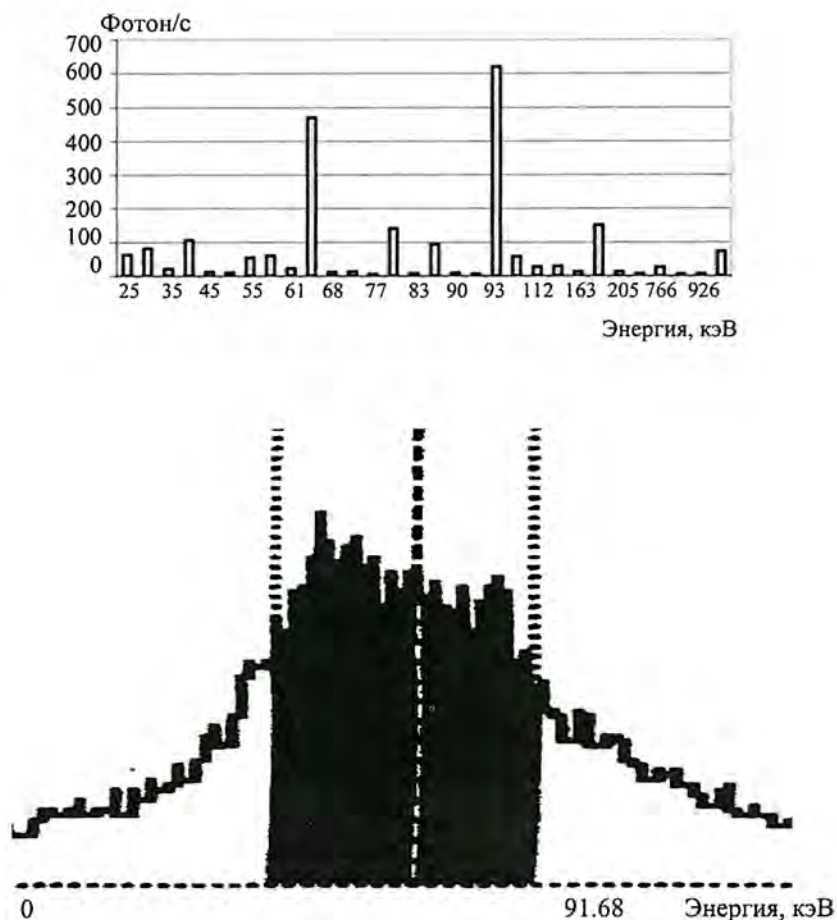


Рис. 5. Спектр гамма-излучения урана-238: вверху – расчетный спектр (нормированный на массу 1 г); внизу – измеренный спектр

Полученные значения средних скоростей счета γ -квантов хорошо согласуются с результатами измерений плотности потока β -частиц (табл. 2).

Таблица 2

Соотношение скорости счета γ -квантов и плотности потока β -частиц

фон, γ_ϕ	Скорость счета γ -квантов		Плотность потока β -частиц		β_ϕ/γ_ϕ	β/γ
	обусловленная попаданием U-238, γ	фон, β_ϕ	обусловленная попаданием U-238, β	фон, β_ϕ		
2,05	4,77	33,3	59,2	16,2	12,4	
1,54	2,75	22,2	37	14,4	13,5	

Из сравнения отношений скоростей счета γ -квантов и плотностей потока β -частиц Q_2/Q_1 для одноименных точек видно, что различие прироста измеряемых характеристик не превышает 20 %.

По результатам исследований были разработаны рекомендации по выбору средств измерения параметров РЗМ ураном-238. Характеристики этих средств представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики средств измерения параметров РЗМ ураном-238

Тип прибора	Измеряемый параметр	Детектор	Энергетический диапазон	Диапазон регистрации
МКС-01Р1	Плотность потока β -частиц на местности и на планшетах	Сцинтиллятор антрацен, $S_{\text{окна}} = 37 \text{ см}^2$	0,05–3 МэВ $E_{\beta\text{max}}$	$1-3 \cdot 10^7$ част.мин ⁻¹ ·см ⁻²
С.А.В.	Плотность потока β -частиц на местности и на планшетах	Пропорциональный счетчик GM 3В17СМ, $S_{\text{окна}} = 20 \text{ см}^2$	0,25–3 МэВ $E_{\beta\text{max}}$	$4-3,7 \cdot 10^7$ част.мин ⁻¹ ·см ⁻²
СРП-98	Плотность потока β -частиц на местности и на планшетах	БДБГА-01 (сцинтилляционный NaI(Tl))	0,1–3 МэВ $E_{\beta\text{max}}$	0,01–120 част.с ⁻¹ ·см ⁻²
ДРБП-03	Плотность потока β -частиц на местности и на планшетах	Газоразрядные счетчики	0,15–3,5 МэВ $E_{\beta\text{max}}$	$0,1-10^3$ част.с ⁻¹ ·см ⁻²
SM-512 (512-канальный анализатор)	γ -спектрометрические измерения	NaI(Tl) 76 × 76 мм; NaI(Tl) 76 × 10 мм	0,05–2,6 МэВ; 5–300 кэВ	Макс. скорость счета в канале – 130000 имп./с
БДБ2-02-И2	Плотность потока β -частиц на планшетах	Пропорциональные счетчики СИ8Б, $S_{\text{окна}} = 150 \text{ см}^2$	0,15–2,5 МэВ $E_{\beta\text{max}}$	$4-4 \cdot 10^3$ част.мин ⁻¹ ·см ⁻²

Заключение

Наилучшими возможностями обладают методы, основанные на регистрации β -излучения обедненного урана как в модификации полевой β -съемки, так и в условиях полевой лаборатории. Метод, основанный на регистрации α -излучения, можно применять в условиях полевой лаборатории. Применение γ -методов для определения параметров РЗМ обедненным ураном ограничено, их можно использовать только при достаточно высоких значениях.

Список литературы

1. Blash E. B., Stuckenbroeker G., Lusky R. The use of uranium as a shielding material // Nuclear Engineering and Design. 1970. Vol. 13. P. 146–182. North-Holland Publishing Company.
2. Gunther S. H. The Gulf War Syndrome, a parallel to Chernobyl: Documentation of the aftermath's of the Gulf War // Presented at Roundtable Conference Opinion on Depleted Uranium and Cancers in Iraq, 1 Whitehall Place, London. July 1999.

3. Catalinotto J. After DU kills NATO soldiers: Pentagon's toxic damage of Balkans exposed // International Action Center, New York, 15 January 2001.
4. Eaton J. Ecological and Health Consequences of the NATO Bombing of Panchevo and other Petrochemical Industrial Complexes // International Tribunal for U.S./NATO War Crimes in Yugoslavia, 10 June 2000.
5. Новиков Г. Ф. Радиометрическая разведка. Л.: Недра, 1989.

Express Methods to Estimate the Density of Ground Contamination by Uranium-238

L. F. Belovodski, D. I. Polev

Express methods developed to estimate the parameters of ground contamination using the analysis of radiometric properties of uranium-238 are presented in the work. The methods rely on recording self-radiation of uranium-238. The results obtained from experimental validation of these methods are given. The equipment for measuring the contamination parameters is discussed.