

УДК 502.55:621.0397

## О ПРИМЕНЕНИИ НЕЙТРОНОВ ИЗ РЕАКЦИИ $(\alpha, n)$ И ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Андреев<sup>1</sup>, А. В. Антонов<sup>2</sup>, Б. А. Бенецкий<sup>2</sup>, Г. Б. Жданов, А. И. Исаков,  
В. И. Попов<sup>2</sup>, А. Е. Самсонов<sup>2</sup>, В. А. Тукарев

*На основании проведенных измерений нейтронных потоков от реакций  $(\alpha, n)$  на легких элементах окружающей среды и запаздывающих нейтронов деления сформулированы рекомендации по экспрессному обнаружению делящихся материалов в среде и на пунктах контроля.*

Интенсивное развитие атомной энергетики, производство оружия, применение ядерно-энергетических установок (в том числе космического базирования), а также зачастую бесконтрольное распространение ядерного горючего требуют разработки и внедрения эффективных методов экспрессного обнаружения скрытых и рассеянных делящихся материалов. Значительная часть территории бывшего СССР в настоящее время является загрязненной [1, 2] как вследствие глобальных выпадений, так и из-за локальных выбросов радионуклидов.

Одним из перспективных направлений поиска делящихся материалов может служить регистрация нейтронного излучения, создаваемого ими непосредственно в результате реакции  $(\alpha, n)$  на легких элементах окружающей среды, либо излучения, возникающего под действием внешнего облучения нейтронами.

Для исследования этих возможностей мы провели в 1992-93 гг. серию экспериментов. Первый из них - регистрация вторичных нейтронов от реакции  $(\alpha, n)$  на легких элементах окружающей среды [3]. Тяжелые нуклиды (изотопы плутония, сопутствующий им америций-241) испускают альфа-частицы с энергией, достаточной для выбивания

<sup>1</sup>ГИРЕДМЕТ.

<sup>2</sup>Институт ядерных исследований РАН.

нейтронов из легких ядер (табл. 1), в частности, из  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$  с выходом  $\sim 10^{-7}$  на одну частицу. Кроме того, на содержащемся в среде изотопе  $^{17}\text{O}$  под действием быстрых нейтронов возникают вторичные запаздывающие нейтроны с периодом полураспада 4,14 с [4]. Поскольку в грунте делящиеся вещества находятся в непосредственной близости от соединений кислорода, алюминия или кремния (вода, песок, глина), или сами по себе содержатся в форме окислов, даже небольшие количества плутония способны создать поток быстрых нейтронов  $10^3 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ . Такой поток может быть зарегистрирован на фоне нейтронов от неравномерных глобальных выпадений плутония (в среднем  $(3 - 4) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  распадов) и нейтронной компоненты космических лучей в области энергий  $\sim 1 \text{ МэВ}$ . В периоды высокой солнечной активности возможно возрастание последней в несколько, а иногда – даже в 10–30 раз в течение нескольких часов, что необходимо учитывать при разработке методики поиска [5].

Т а б л и ц а 1

Энергия альфа-частиц, испускаемых некоторыми тяжелыми нуклидами

Нуклид	$^{236}\text{Pu}$	$^{238}\text{Pu}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{242}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Энергия альфа-частиц, МэВ	5,75	5,46	5,15	5,15	4,89	5,48

Для выяснения конкретных возможностей метода в условиях, близких к реальным, мы провели измерения длительностью 80 с с помощью нейтронного счетчика СНМ-20 с образцом окиси  $^{239}\text{Pu}$  (1 г) и в той же конфигурации с нейтронным источником  $^{239}\text{Pu} + \text{Be}$  интенсивностью  $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Скорость счета нейтронов ( $\text{мин}^{-1}$ ) с калибровочным  $\text{Pu} + \text{Be}$  источником нейтронов и с образцом окиси  $\text{Pu}$  (1 г)

Источник	Образец	Фон
$56500 \pm 0,4\%$	$28 \pm 16\%$	$1,9 \pm 25\%$

При длительности около 10 мин в идентичных условиях превышение фона на уровне двух статистических ошибок будет наблюдаться при наличии 0,1 г плутония-239. Это дает оценку чувствительности, которая может быть увеличена за счет числа и эффективности детекторов. Плутоний из отработанного топлива АЭС содержит  $\text{Pu}-238$  в количестве 25–35% вместо 1–5% в свежем топливе или при глобальных выпадениях

[6]. Ввиду сильной зависимости выхода реакции  $(\alpha, n)$  от энергии альфа-частиц чувствительность метода при поиске отработанного топлива может оказаться выше, чем указанная величина 0,1г.

Другим методом обнаружения делящихся веществ может быть регистрация запаздывающих нейтронов при облучении импульсным нейтронным потоком [7]. Среди осколков деления небольшую долю (0,7%) составляют бета-активные изотопы, продуктами распада которых являются нейтронно-избыточные ядра, испускающие быстрые нейтроны [8]. Их можно разбить на несколько групп с характерными эффективными периодами полураспада и относительными выходами, указанными в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Периоды полураспада и относительные вклады бета-активных осколков урана и плутония с  $T_{1/2} > 5$  с

Группа осколков	Период полураспада, с		Выход, % от общего числа вторичных нейтронов	
	Уран-235	Плутоний-239	Уран-235	Плутоний-239
1	$6,22 \pm 0,23$	$5,60 \pm 0,10$	0,125	0,135
2	$22,72 \pm 0,71$	$23,04 \pm 1,67$	0,140	0,191
3	$55,12 \pm 1,28$	$54,28 \pm 2,34$	0,021	0,024

С точки зрения фоновых условий при иницировании деления импульсным источником быстрых нейтронов удобно использовать запаздывающие нейтроны от осколков второй группы. Эти нейтроны сравнительно легко отделить от фона, формируемого нейтронной компонентой космических лучей, а также запаздывающими нейтронами, возникающими при облучении кислорода в среде вследствие реакции  $^{17}\text{O}(n, p)^{17}\text{N}$ . При этом ядро  $^{17}\text{N}$  распадается в возбужденное состояние  $^{17}\text{O}$  с периодом 4,14 с, а переход  $^{17}\text{O}$  в основное состояние  $^{16}\text{O}$  сопровождается вылетом нейтрона. Близость периодов полураспада ядер  $^{17}\text{N}$  к первой группе осколков в табл. 3 определяет выбор временных интервалов измерений при поисках делящихся материалов в средах с высоким содержанием кислорода.

С помощью нейтронного детектора, подключенного к временному анализатору, были проведены измерения потоков запаздывающих нейтронов при облучении делящихся веществ нейтронами 14 МэВ от импульсного генератора Т-400. При регистрации запаздывающих нейтронов от урана-235 в установке использовали свинцовый конвертор

Т а б л и ц а 4

Условия и результаты измерений. Интервал измерений 20 – 100 с после выключения генератора

Исследованный образец	Время облучения, с	Выход нейтронов от генератора, $\text{с}^{-1}$	Число зарегистрированных нейтронов	Фон за 80 с	Измеренный период полураспада, с
Уран-235 фольга 12 г	15	$1 \cdot 10^{10}$	3200	65	$22,3 \pm 1$
Тот же, но без конвертора	120	$8 \cdot 10^{10}$	1150	175	$20,6 \pm 2$
Уран естественный 10 г в водном растворе солей	240	$1 \cdot 10^{11}$	840	110	$23 \pm 2$
Тот же + + песок 25 кг	180	$1 \cdot 10^{11}$	890	40	$13 \pm 5$
Плутоний-239, 1 г	250	$(3 - 5) \cdot 10^{10}$	750	210	$23 \pm 1$

Приведенные в последнем столбце табл. 5 предельно обнаружимые концентрации соответствуют 0,1 ПДК по урану и  $2 \cdot 10^3$  ПДК по плутонию<sup>3</sup>. Эта чувствительность может быть заметно повышена за счет увеличения числа счетчиков и их эффективности. Как видно из сравнения результатов, для плутония метод регистрации запаздывающих нейтронов не дает преимуществ по сравнению с регистрацией нейтронов, генерируемых в реакции  $(\alpha, n)$ .

<sup>3</sup>Предлагаемый метод – экспрессный и не должен сравниваться с методами лабораторного радиохимического анализа.

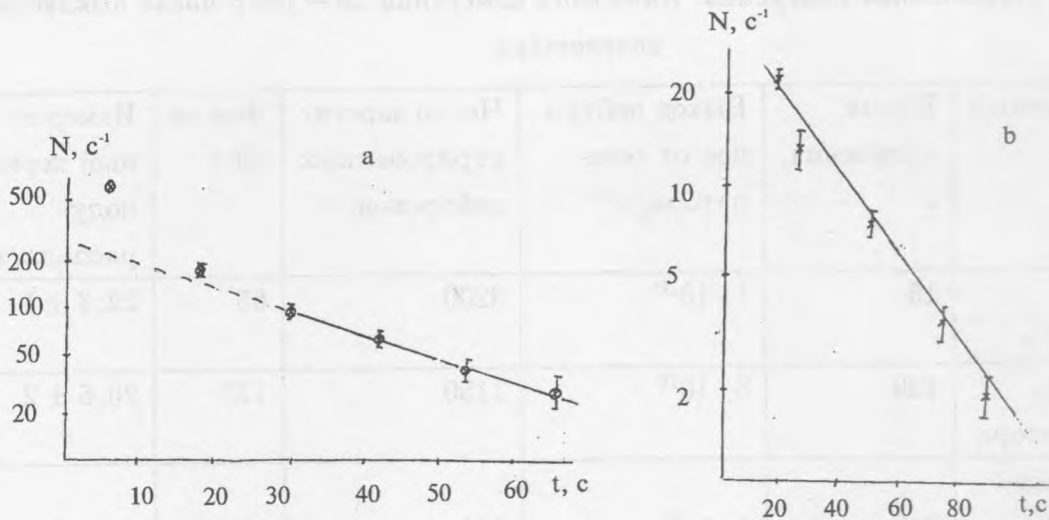


Рис. 2. Временная зависимость потока термализованных запаздывающих нейтронов. а) Счет от образца уран-235 массой 12 г; экспериментальное значение периода полураспада  $22,3 \pm 1,0$  с. б) Счет от образца естественного урана массой 10 г в виде водного раствора солей; экспериментальное значение периода полураспада  $23 \pm 2$  с.

Т а б л и ц а 5

Оценки чувствительности обнаружения делящихся веществ за время измерения 10 мин

Элемент	Мощность источника, $c^{-1}$	Пределы обнаружения	
		по массе, г	по концентрации в грунте, г/г*
Уран-235, обогащение 90%	$10^{10}$	0,2	$4 \cdot 10^{-6}$
Уран естественный	$10^{11}$	0,5	$1 \cdot 10^{-5}$
Плутоний-239	$10^{11}$	0,1	$2 \cdot 10^{-6}$

\* Предполагается, что облучаемый генератором участок грунта имеет объем  $3 \times 3 \times 3$  дм<sup>3</sup> при плотности  $2,5$  г/см<sup>3</sup>.

Описанные в работе способы обнаружения делящихся веществ могут обеспечить экспрессное (за время до 10 мин) обнаружение радиоактивных загрязнений как в полевых условиях, так и в пунктах контроля с чувствительностью не хуже  $10^{-5} - 10^{-6}$  г/г по концентрации в грунте и 1 г по массе образца.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лебедев И. А. и др., Атомная энергия, **72**, вып. 6, 593 (1992).
- [2] Воронцов Н. Н., Природа N 9, 123 (1994).
- [3] Антонов А. В., Бенецкий Б. А., Исаков А. И. и др., Способ обнаружения изотопов плутония. (Заявка на изобретение N 94007740, приоритет от 16.03.94 г.)
- [4] Menlove H. O., Augustson V. H., Henry C. N., Nucl. Sci. Eng., N 1, 136 (1970).
- [5] Хаякава С., Физика космических лучей, ч. 1, М., Мир, 1973, с. 535.
- [6] Москалев Ю. И. и др., Проблемы радиобиологии плутония-238, М., Энергоиздат, 1990, с. 16.
- [7] Исаков А. И., Антонов А. В., Бенецкий Б. А. и др., Способ обнаружения делящихся материалов. (Заявка на изобретение N 94020227, приоритет от 1. 06. 94 г.).
- [8] Гордеев И. В. и др., Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.

Поступила в редакцию 27 января 1995 г.