

И. Г. БЕРЗИНА, М. Ю. ГУРВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОРИЯ В МИНЕРАЛАХ И ГОРНЫХ ПОРОДАХ
ПО СЛЕДАМ ОТ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ**

(Представлено академиком Г. Н. Флеровым 21 X 1971)

При облучении исследуемых объектов в ядерном реакторе в результате захвата ядрами тория и урана нейтронов и последующего деления составного ядра образуются осколки деления, которые могут быть зарегистрированы твердыми детекторами. Если к исследуемой поверхности горной породы, приготовленной в виде аншлифа или спрессованной в таблетки, приложить специальный детектор, то в процессе (n, f) -реакции при облучении изучаемого объекта в спектре нейтронов ядерного реактора детектор будет регистрировать суммарную плотность следов осколков деления от всех естественных изотопов ядер урана и тория ⁽¹⁾.

В настоящей статье описывается метод выявления пространственного распределения тория и определения его концентрации в минералах и горных породах.

Для определения концентрации и пространственного распределения тория исследуемый объект необходимо облучать со сменой детекторов дважды. Одно облучение следует проводить в обычном для вертикальных каналов реакторов спектре нейтронов, второе — с кадмиевым или борным фильтром соответствующей толщины для максимально возможного уменьшения вклада в общее число следов от осколков деления от урана-235, поскольку ядра кадмия и бора поглощают тепловые нейтроны.

Так, например, кадмиевый фильтр толщиной 0,43 г/см² уменьшает число актов деления на ядрах U²³⁵ примерно в 175 раз. Это видно из следующих значений вклада в суммарную плотность треков (отн. ед.) следов от осколков деления урана и тория при облучении без фильтра (I), с кадмиевым фильтром толщиной 0,43 г/см² (II) и с фильтром В.С (III, толщина фильтра 4 мм порошка) при $C_{Th} : C_U = 1$:

	U ²³⁸	U ²³⁵	Th ²³²
I тип облучения	1040	17	3
II » »	6	8	2
III » »	12	8	2

Из приведенных данных также следует, что при облучении без фильтра в реакторе на тепловых нейтронах вклад в суммарную плотность следов от осколков деления от изотопа U²³⁵ составляет 98% (что хорошо согласуется с данными ⁽²⁾), облучение же в фильтре, содержащем Cd или В, дает соизмеримые вклады в общую плотность следов от осколков деления от каждого из трех изотопов.

Общая плотность следов от осколков деления (ρ), зарегистрированная детектором, может быть записана в следующем виде:

$$\rho = \frac{N_0 e R}{2} \sum_{jk} \frac{C_{R^I_{jk}}}{\mu_j} \int_{E_0}^{E_j} n(E) \sigma_{jk}(E) dE, \quad (1)$$

где N_0 — число Авогадро; ϵ — эффективность выявления осколков деления детектором; R — эффективный пробег осколков деления в исследуемом объекте; C_K — концентрация соответствующего элемента; I_{jk} — изотопическая доля делящегося изотопа данного элемента; μ_j — молекулярный вес делящегося изотопа; $n(E)$ — интегральный поток нейтронов; $\sigma_{jk}(E)$ — дифференциальное сечение деления соответствующего изотопа; E_0, E_1 — пределы изменения энергии нейтронов, вызывающих деление.

Из вышеприведенных данных следует, что при облучении в реакторе на тепловых нейтронах и при $C_{Th} : C_U = 1$ в формуле (1) основной вклад в общее число следов от осколков деления будут вносить следы осколков деления ядер U^{235} . Членами, относящимися к делению U^{238} и Th^{232} , можно заведомо пренебречь. При экранировании же исследуемых образцов кадмиевым фильтром в формуле (1) необходимо вести суммирование по всем трем изотопам.

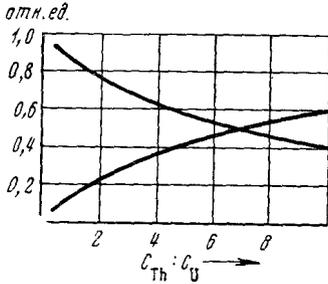


Рис. 1. Вклад в суммарную плотность треков следов от осколков деления урана и тория при различных соотношениях $C_{Th} : C_U$

Воспользовавшись приемом определения нейтронных потоков, аналогичным описанному в работе (3), получим формулу для определения концентрации тория:

$$C_{Th} = \left(\frac{2\rho}{R} - C_U \frac{\rho_{i-U}}{m_{i-U}} \right) \frac{m_{i-Th}}{\rho_{i-Th}},$$

где C_U определяется при облучении исследуемого образца без фильтра, поглощающего тепловые нейтроны; ρ_{i-U} / m_{i-U} ; ρ_{i-Th} / m_{i-Th} — количество следов от осколков деления на

детекторе, отнесенное к единице массы соответствующего элемента на мишени при облучении исследуемого объекта с фильтром.

Для выяснения минимального соотношения $C_{Th} : C_U$, при котором возможно определять концентрацию Th по описываемой методике, нами были проведены экспериментальные исследования вклада треков от деления ядер тория в общее число следов от осколков деления при различных соотношениях $C_{Th} : C_U$. Результаты проведенных экспериментов (для кадмиевого фильтра) представлены в виде графика на рис. 1.

Исследования показали, что определение концентрации тория в горных породах по данной методике возможно проводить при соотношениях $C_{Th} : C_U \geq 0,5$.

Чувствительность метода определения концентрации тория по следам от осколков деления составляет $n \cdot 10^{-7}$ г/г и ограничена максимально возможным интегральным нейтронным потоком ($\sim 5 \cdot 10^{16}$ н/см²), при котором используемый детектор не разрушается.

В табл. 1 для сравнения приведены результаты определения концентрации урана и тория в образцах, полученные различными методами. Определения методом треков проведены со статистической ошибкой $\sim 3\%$.

Следует заметить, что хорошее согласие в определениях концентрации урана и тория, проведенных различными методами, получается только при равномерном распределении указанных элементов по исследуемому объекту.

Для выявления пространственного распределения тория, так же как и для определения его концентрации, необходимо двойное облучение исследуемого объекта: в потоке нейтронов всего энергетического спектра и в потоке надкадмиевых нейтронов. Сравнение распределения следов от осколков деления на обоих детекторах позволяет однозначно выявить пространственное распределение урана и тория. Так, например, в торите картина распределения тория по образцу (отображенная треками на детекторе) будет полностью воспроизводиться дважды: экранирование при облу-

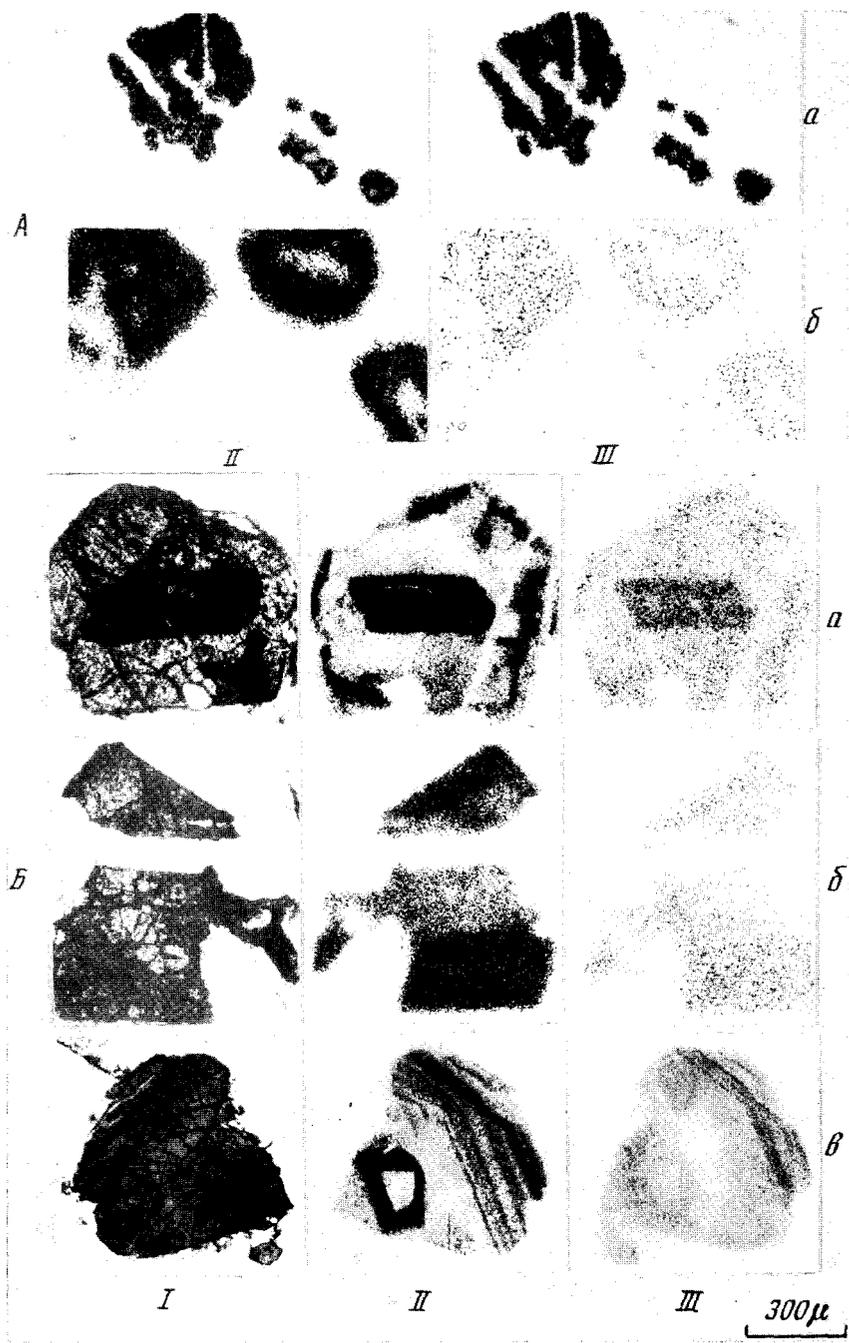


Рис. 2. А — детекторы, прилегавшие во время облучения к ториевому (а) и урановому (б) минералу. В — микрофотографии зерен пирохлора и двух детекторов, прилегавших к зернам пирохлора во время облучения (объяснение а — в — в тексте). I — зерна пирохлора, II — облучение потоком нейтронов всего энергетического спектра, III — облучение потоком надкadmиевых нейтронов

чении образца не сказывается на количестве актов деления ядер тория (рис. 2А, а). Для сравнения с ториевым минералом приведем пример изменения интенсивности проявления картины распределения урана в урановом минерале (рис. 2А, б), облучавшемся одновременно с указанным выше ториевым минералом. После облучения с фильтром в этом случае интенсивность проявления треков значительно снижается.

Задача выявления пространственного распределения тория может быть рассмотрена применительно к минералам и горным породам в следующих направлениях: 1) ториевые минералы; 2) уран-ториевые породы и мине-

Таблица 1

Содержание урана и тория в горных породах, определенные разными методами (10^{-4} вес. %)

№№ п.п.	Уран			Торий			$C_{Th} : C_U$ по f-радиограф.
	f-радиогр.	радио-метр.	химич.	f-радиогр.	радио-метр.	химич.	
1	2,7	3,5	2,6	35	33	37	12,9
2	6,2	6,4	6,1	50	56	53	8,1
3	8,3	8,6	7,8	38	35	26	4,6
4	8,4	8,6	9,8	32	46	42	3,8
5	12,4	12,9	12,7	47	41	47	3,8

ралы; 3) горные породы и минералы, где торий находится в кларковых количествах.

Проведенные исследования показали, что в первом случае пространственное распределение тория четко выявляется при облучении минерала дважды: с фильтром и без него. Во 2-м и 3-м случаях, кроме необходимости двухкратного облучения, для выявления пространственного распределения тория (на фоне выявляющегося урана) необходимо выполнение следующих условий: а) соотношения концентрации тория и урана должны удовлетворять неравенству $C_{Th} : C_U \geq 0,5$; б) распределение урана и тория по минералу или породе должно быть неравномерно хотя бы по одному из указанных элементов; в) неравномерности в распределении урана и тория не должны повторять друг друга по конфигурации.

В случае невыполнения пунктов б) и в) можно определять среднюю концентрацию тория в исследуемом объекте. В случае невыполнения пункта а) в настоящее время указанным способом не представляется возможным проводить ни качественный, ни количественный анализ содержания тория.

Ниже приведено несколько микрофотографий (рис. 2Б), на которых показано пространственное распределение урана и тория в зернах пирохлора. Как следует из этих иллюстраций, в пирохлоре может наблюдаться неравномерное распределение урана, приуроченное к внутренней части минерала, к его краевым частям и некоторым трещинкам, в то время как торий распределен по всей поверхности минерала равномерно (рис. 2Б, а, б, III).

В некоторых зернах пирохлора (рис. 2Б, в) отчетливо видны две формы нахождения тория (рис. 2Б, в, III): равномерное и неравномерное, приуроченное к некоторым зонам роста минерала. Видна также (рис. 2Б, в, II) приуроченность урана к зонам роста минерала.

На рис. 2Б, б представлено зерно пирохлора, где, видимо, имеет место равномерное распределение урана и тория, приуроченное к разным, но близким по составу минералам, границы между которыми при просмотре шлифов не выявляются.

В представленной породе содержания урана и тория на несколько порядков меньше, чем во включениях, поэтому на детекторах в местах прилегания их к породе треков нет.

Приведенные фотографии далеко не исчерпывают всех возможных случаев, какие могут встречаться при выявлении пространственного распределения тория в породе и уран-ториевых минералах, а являются лишь примерами, показывающими некоторые возможности метода.

Наши исследования позволили разработать высокочувствительный метод определения концентрации и пространственного распределения тория в минералах и горных породах. Чувствительность метода для выявления пространственного распределения тория составляет $n \cdot 10^{-6}$ г/г. Основное и самое существенное ограничение — условие $C_{Th} : C_U \geq 0,5$. Однако при проведении несерийных определений для уменьшения вклада от деления ядер урана на тепловых нейтронах можно воспользоваться либо реактором на быстрых нейтронах, либо реакцией (γ, f) на микротроне. В этом случае условие $C_{Th} : C_U \geq 0,5$ может быть сдвинуто в сторону меньших значений.

Изложенный метод позволяет обнаружить неравномерности в распределении тория по породе, определять концентрацию тория как по породе в целом, так и в отдельных включениях, выявлять формы нахождения тория в отдельных минералах: приуроченность к зонам роста, краевым частям и трещинам минералов; сопоставлять распределение тория и урана в минералах и породе, выявлять наложенные процессы, в результате которых происходит привнос урана и тория, и т. д. и т. п., а также может быть применен для изучения распределения микросодержаний урана и тория в металлах и сплавах.

Всесоюзный научно-исследовательский
институт ядерной геофизики и геохимии
Москва

Поступило
4 X 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. Г. Берзина, И. Б. Берман и др., Атомная энергия, 23, 6, 520 (1967).
² К. Бекурд, К. Виртц, Нейтронная физика, 1968, стр. 300. ³ И. Г. Берзина и М. Ю. Гурвич и др., Ядерная геофизика, 4, 1969, стр. 215.