

Б-487

Ат.энерг., 1967, т. 23, в. 6,  
с. 520-527

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 3159



И.Г. Берзина, И.Б. Берман, М.Ю. Гурвич,  
Г.Н. Флеров, Ю.С. Шимелевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ УРАНА  
И ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
В РАЗЛИЧНЫХ МИНЕРАЛАХ И ГОРНЫХ ПОРОДАХ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

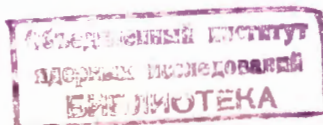
1967.

P13 - 3159

И.Г. Берзина, И.Б. Берман, М.Ю. Гурвич,  
Г.Н. Флеров, Ю.С. Шимелевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ УРАНА  
И ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
В РАЗЛИЧНЫХ МИНЕРАЛАХ И ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Направлено в журнал "Атомная энергия".



5081/2 нр.

Берзина И.Г., Берман И.Б., Гурвич М.Ю., Флеров Г.Н. P13-3159  
Шимелевич Ю.С.

Определение концентрации урана и его пространственного распределения в различных минералах и горных породах

Проводились измерения низких концентраций урана и его пространственного распределения в различных веществах: спайных минералах по спонтанному и вынужденному делению ядер урана, выявленному непосредственно в этих минералах; в породах и некоторых веществах по вынужденному делению ядер урана, зарегистрированному специальными детекторами.

Показано, что сопоставление следов от спонтанного и вынужденного деления ядер урана позволяет судить о миграции урана за время существования минерала.

Для определения различных концентраций урана в исследуемых образцах даются рекомендации по практическому использованию и выбору детекторов и применяемых интегральных доз.

**Препринт Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна, 1967.**

Berzina I.G., Berman I.B., Gurevich M.Yu.,  
Flerov G.N., Shimelovich Yu.S.

P13-3159

Determination of the Uranium Concentration and its Spatial Distribution in Different Minerals and Rocks

The measurements were performed of low concentrations of  $U$  and its spacial distribution in different matters: in some minerals by spontaneous and induced fission of  $U$  nuclei revealed directly in these minerals; in rocks and some matters by induced fission of  $U$  nuclei recorded by special detectors.

It is shown that the comparison of tracks from spontaneous and induced fission of  $U$  nuclei allows to judge about the migration of  $U$  within the time of mineral existence.

Recommendations on practical use and selection of detectors and on the integral doses applied are given to determine different concentrations of  $U$  in the samples investigated.

**Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1967.**

Проводившееся ранее изучение концентрации урана в горных породах способствовало решению целого ряда важных геологических задач. Концентрация урана, определявшаяся, в основном, химическим, радиографическим и люминесцентными способами, характеризовала усредненное значение этого элемента на единице площади или объема исследовавшихся веществ<sup>/1/</sup>.

В данной работе анализируются пути определения пространственного распределения и концентрации урана в различных образцах. Возможность таких определений основана на том, что осколки спонтанно или вынужденно делящихся ядер тяжелых элементов оставляют в окружающей среде дефектную область (трек), которая может быть обнаружена с помощью агрессивного травителя. Химическое травление селективно выявляет область нарушения, после чего следы от осколков хорошо просматриваются в оптический микроскоп. При этом возможное разрешение участков с различной концентрацией ядер урана, тория и других делящихся элементов имеет величину порядка размеров трека, т.е. порядка десятков микрон. Метод позволяет количественно разделить концентрацию урана и тория как во включениях, так и "фоновую". Даже предварительный анализ микронеоднородностей убедительно показывает, что они являются чувствительной функцией истории формирования и существования горной породы.

#### 1. Определение концентрации урана по следам от осколков спонтанного деления в спайных минералах

Известно<sup>/2/</sup>, что основной вклад в плотность ( $\rho_1$ ) следов от осколков спонтанного деления тяжелых элементов в минералах вносит уран-238. Величина  $\rho_1$  определяется выражением

$$\rho_1 = CN J^{238} \lambda T R \epsilon, \quad (1)$$

где  $CN$  - число атомов урана в  $1 \text{ см}^3$  вещества,

$J^{238}$  - изотопическая доля урана-238,

$\lambda$  - постоянная деления урана-238,

$T$  - время существования минерала,

$R$  - эффективный травимый след осколка деления,

$\epsilon$  - коэффициент эффективности выявления следов от осколков деления.

Формула (1) справедлива в том случае, если исследуемый минерал не подвергался в прошлом воздействию термометаморфизма и в нем не происходила преимущественной миграции урана в образец или из образца.

Значение концентрации  $C$  может быть записано на основании (1) в следующем виде:

$$C = \frac{\rho_1}{N J^{238} \lambda T R \epsilon} = A \frac{\rho_1}{T}, \quad (2)$$

где  $A$  - постоянная для данного минерала величина.

Таким образом, для определения концентрации урана в образце необходимо подсчитать плотность следов от осколков спонтанного деления. При этом предполагается, что возраст минерала известен и определен независимым способом.

Определение концентрации урана в минерале данным методом включает чрезвычайно важную, на наш взгляд, возможность выявления распределения урана по образцу. Последнее обстоятельство позволяет обсуждать такие важные качественные вопросы, как форма вхождения урана в минерал, наличие миграции урана из окружающей породы и др.

Если известен возраст исследуемого минерала, метод позволяет с большой чувствительностью определять в образце концентрацию урана. Для этого исследуемый минерал раскалывается по плоскости спайности и подвергается воздействию химического реагента, разъедающего поверхность в местах выхода следов от осколков. Форма и вид выявляемых фигур травления на следах, создаваемых осколками, позволяют судить о наличии или отсутствии в прошлом термометаморфизма <sup>3,4/</sup> и, таким образом, определить возможность применения данного метода. При отсутствии теплового воздействия ошибка в определении концентрации зависит от ошибки в определении возраста и статистики измерений.

Результаты измерения концентрации урана по данному методу и их обсуждение приведены во втором разделе.

Описываемый метод имеет ряд преимуществ перед всеми существующими. Во-первых, он отличается высокой чувствительностью, во-вторых, экспрессностью: травление слюд плавиковой кислотой определяется минутами и подсчет плотности треков может быть выполнен непосредственно в полевых условиях и, в-третьих, дает возможность обходиться микроколичествами материалов, необходимыми для определений.

К недостаткам метода следует отнести следующее. Число минералов, которые можно обработать химическим путем, ограничено: необходимым условием выявления следов от осколков деления в кристаллах является надежная идентификация треков, спайность минералов и отсутствие значительной плотности дефектов других типов, выявляемых травлением на исследуемых поверхностях. Кроме того, в ряде случаев следы от осколков деления могут исчезнуть в результате теплового воздействия на минерал.

## 2. Определение концентрации урана по следам от осколков вынужденного деления в спайных минералах

Основы метода в общем виде описаны в работе <sup>15/</sup>, где концентрация урана в минерале подсчитывается на основании формулы плотности  $\rho_2$  следов от осколков вынужденного деления, которая имеет вид:

$$\rho_2 = CN J^{235} \sigma n R \epsilon, \quad (3)$$

где  $J^{235}$  - изотопическая доля урана-235,

$\sigma$  - сечение деления урана-235 тепловыми нейтронами,

$n$  - интегральный поток тепловых нейтронов.

Для определения концентрации урана в г/г, учитывая спектр докадмиевых нейтронов, формулу (3) следует записывать следующим образом:

$$\rho_2 = C \frac{N_0}{\mu_u} J^{235} d \frac{R}{2} \epsilon \int_{E_0}^{E_f} n(E) \sigma(F) dE, \quad (4)$$

где  $N_0$  - число Авогадро,

$\mu_u$  - молекулярный вес урана,

$d$  - плотность вещества,

$\sigma(E)$  - дифференциальное сечение деления ( $\frac{\text{см}^2}{\text{МэВ}}$ ),

$n(E)$  - интегральный поток нейтронов.

Концентрация урана, определенная на основании (4), может быть представлена соотношением:

$$C = V \frac{\rho_2}{\int_{E_0}^{E_0} n(E) \sigma(E) dE} , \quad (5)$$

где  $V$  - постоянный для данного кристалла коэффициент, зависящий от его свойств.

Для определения значения интеграла, входящего в (5), был использован следующий прием. Одновременно с исследуемыми образцами в канале реактора облучались урановые мишени различных масс со специальными детекторами, непосредственно прилегающими к мишеням в период облучения и регистрирующими осколки деления, вылетающие из мишени <sup>1/6</sup>. Детектор подбирается таким, чтобы осколки создавали в нем дефекты структуры, которые могли бы быть впоследствии выявлены избирательным травлением. Желательно, чтобы в самом детекторе микроколичества урана были минимальными, в противном случае акты деления урана, происходящие в детекторе, могут дать существенный вклад в подсчет следов от осколков деления. Таким детектором может служить лавсан, технология изготовления которого исключает наличие тяжелых элементов. При использовании в качестве детекторов слюды и стекла в них предварительно определяется собственная концентрация урана. После облучения детектор отделяется от мишени и обрабатывается соответствующим травителем для выявления зарегистрированных следов от осколков. В таблице 1 приведены режимы травления для применявшихся нами детекторов.

Т а б л и ц а 1  
Режимы травления детекторов

Детектор	Травитель	Время травления мин	Температура
Слюда (мусковит)	48% HF	30	20°C
Стекло	2,5% HF	20	20°C
Лавсан	40% KOH	30	60°C

На рис. 1 приведена микрофотография двукратно протравленной слюды до и после облучения в контакте с урановой мишенью ( $2 \cdot 10^{11}$  н/см<sup>2</sup>). Крупные фигуры травления на рис. 1 соответствуют следам от осколков спонтанного деления, мелкие – следам от вынужденного деления, происходящего в урановой мишени. На рис. 2 и 3 приведены микрофотографии облученных осколками деления и протравленных поверхностей стекла и лавсана, соответственно.

В результате облучения акты деления урана, находящегося на мишени, отображаются на детекторе, и плотность следов от осколков на детекторе ( $\rho_1$ ) будет определяться выражением:

$$\rho_1 = \frac{m_1}{\mu_U} N_0 \int_{E_0}^{E_f} \epsilon_1 \sigma(E) n(E) dE, \quad (6)$$

где  $m_1$  – масса урана на мишени (г/см<sup>2</sup>),

$\epsilon_1$  – эффективность регистрации следов от осколков деления детектором.

Решая уравнения (4) и (6) относительно  $C$ , получим

$$C = \frac{\rho_2 \epsilon_1}{d \frac{R}{2} \epsilon \frac{\rho_1}{m_1}} = k \rho_2 \epsilon_1 \frac{m_1}{\rho_1}$$

Значение  $\frac{m_1}{\rho_1}$  находится по графику зависимости плотности следов, создаваемых осколками деления, на детекторе ( $\rho_1$ ) от массы нанесенного слоя урана на мишени ( $m_1$ ).

Численная величина  $\epsilon_1$  определялась в специальных опытах <sup>7,8/</sup> и принималась равной для фотостекла 42%, для лавсана 76%, для мусковита <sup>12/</sup> – 100%.

Таким образом, величина концентрации урана, определяемая в образце, является функцией только плотности следов от вынужденного деления на детекторах, прилегающих к урановым мишеням во время облучения и плотности следов от вынужденного деления, подсчитываемой непосредственно на образце. Ошибка, допускаемая при нанесении массы ( $m_1$ ) на урановые мишени, была значительно уменьшена за счет значения масс, получаемых по графикам зависимости числа треков на мишенях от массы нанесенного слоя.

Методика определения концентрации урана по вынужденному делению заключается в следующем. Образец подвергается химическому травлению для выявления следов от осколков спонтанного деления урана. Затем, во избежание загрязнений, образец помещается в лавсановый пакет и облучается нейтронами в тепловом канале реактора. После облучения образец протравливается вторично, что позволяет подсчитать на его поверхности плотность следов от вынужденного деления урана. Треки, вызванные вынужденным делением, после вторичного



травления отличаются от треков, обусловленных спонтанным делением, значительно меньшими площадями фигур травления. В зависимости от режима травления меняется вид выявляемых фигур, приобретающих с увеличением времени травления определенные характерные для данного материала геометрические очертания на плоскости скола /9/.

В таблице 2 приведены в качестве примера некоторые экспериментальные данные по определению концентрации урана в слюдах по плотности следов от спонтанного и вынужденного деления.

Т а б л и ц а 2  
Концентрация урана в слюдах, определенная по спонтанному  
и вынужденному делению ядер урана

Тип слюды	Номер образца	Концентрация, $10^{-11}$ ат/ат	
		по спонтанному делению	по вынужденно делению
Мусковит	17	6	7
Мусковит	21	40	36
Мусковит	32	1	1
Мусковит	84	2	2
Мусковит	15	19	45
Флогопит	10	36	36
Биотит	17	-	2700
Вермикулит	13	36	41

Как следует из таблицы, оба метода дают хорошее совпадение в значениях концентрации урана. Исключение составляет образец № 15, в котором концентрация урана, полученная на основании подсчета плотности следов от осколков спонтанного деления, меньше соответствующей концентрации, полученной по вынужденному делению, в 2,5 раза. Это расхождение может быть объяснено тем обстоятельством, что исследуемый мусковит подвергался термометаморфизму. Об этом могут свидетельствовать видоизмененные фигуры травления на треках, обнаруженные на сколах слюды /3,10/.

Здесь следует остановиться на некоторых возможностях сопоставления данных, полученных обоими методами. Наиболее важной из них представляется возможность определения миграции урана в течение времени существования минерала. Определение концентрации в минерале по вынужденному делению показывает наличие в нем урана в настоящее время, тогда как определение концентрации по спонтанному делению позволяет выявлять усредненную картину местоположения урана в течение всего геологического периода. В том случае, когда в местах урановых скоплений, обнаруженных по следам от осколков спонтанного деления, после облучения не возникает следов от вынужденных делений, можно с уверенностью сказать, что в образце произошло движение урана. И, наоборот, часто можно наблюдать скопления урана, обнаруженные только по вынужденному распаду (мусковит № 128, 129, биотит 16 и др.). В качестве примера на рис. 4 приведена фотография такого случая. Образец, представленный на рис. 4, протравливался дважды - до и после облучения. Большие фигуры травления на фотографии соответствуют следам от спонтанного деления, мелкие - от вынужденного. В этом случае можно утверждать, что имело место вхождение урана в минерал после его образования, так как в образце не обнаружены скопления урана, выявленные по следам от осколков спонтанного деления. Кривые распределения урана в образце, снятые до и после облучения, в этом случае несколько отличаются друг от друга. На кривой распределения урана, построенной по следам от спонтанного деления, имеется один максимум, соответствующий фоновой концентрации урана, т.е. равномерному вхождению урана в слюду при ее минерализации. Такой же максимум имеется и на кривой распределения, построенной по следам, создаваемым вынужденным делением. Однако на этой кривой имеются и другие максимумы, соответствующие урановым скоплениям. В некоторых случаях удается определить возраст таких урановых включений. Например, в образцах мусковита № 127 были обнаружены урановые скопления с концентрацией  $C \approx 10^{-2}\%$ , возраст которых был определен нами по методу треков и равнялся  $T = 20$  млн. лет. (Подробная методика определения возраста слюд по следам, создаваемым осколками деления урана, описана нами в работе <sup>14/</sup>). На основании просмотра большого количества слюд можно заключить, что такие движения урана чаще всего наблюдаются в слюдах из гранитов. В этих слюдах урановые скопления могут встречаться в виде минералов и включений, имею-

ших правильную геометрическую форму (рис. 5). Можно предположить, что образование таких включений связано с движением гидротермальных растворов и последующим осаждением урана на слюде. Часто повышенная концентрация урана в минералах наблюдается вдоль трещин. На рис. 6 в качестве примера приведена микрофотография протравленной слюды с такой трещиной. Отсутствие вдоль трещин следов от спонтанного деления говорит об осаждении здесь урана в значительно более позднее время по сравнению с минерализацией слюды.

Различные формы урановых скоплений были обнаружены нами и в других минералах.

Возможность выявления урановых скоплений и движения урана позволяет решать этим методом целый ряд важных геологических задач, таких, например, как отделение первичного содержания урана от наложенного в результате воздействия гидротермальных процессов и процессов гипергенезиса, выявление механизма, приводящего к дифференциации урана в земной коре и выносу его в верхние горизонты, и т.д.

В некоторых кристаллах, таких как  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCO}_3$  и других, наряду со следами от осколков деления имеются другие типы дефектов, в частности, дислокации, которые при взаимодействии кристалла с химическим реагентом имеют аналогичные трекам формы фигур травления. Специальными опытами<sup>/11/</sup> были показаны возможные пути, позволяющие отличить в указанных кристаллах следы осколков деления от дислокаций. В этой же работе было показано, что в том случае, когда плотность дислокаций не превышает  $10^6 \text{ см}^{-2}$ , в принципе возможно просчитать плотность следов от осколков вынужденного деления, используя метод двукратного травления кристаллов, аналогичный описанному выше. Результаты таких измерений, полученные для ионных кристаллов, представлены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3

Определение концентрации урана в ионных кристаллах по вынужденному делению урана

Кристалл	с $10^{-10}$ ат/ат
$\text{NaCl}$	8,8
$\text{KCl}$	12,2
$\text{CaCO}_3$	7,6

Эффективность выявления следов, создаваемых осколками деления в ионных кристаллах, определялась в специальных опытах /12/.

Ошибка в определении концентрации урана этим методом при указанном выше определении нейтронного потока зависит от статистики измерений и может, в зависимости от распределения урана, составлять 15 - 50 %.

К достоинствам данного метода, кроме тех, которые были перечислены для определения концентрации урана по спонтанному делению, следует прибавить также следующие. На определение концентрации урана данным методом не влияет термическая история образца, так как взаимодействие тепловых нейтронов с веществом выявляет количество урана, находящееся в минерале в настоящее время. Последнее позволяет надежно определять фоновую концентрацию и концентрацию урана в отдельных включениях. К недостаткам следует отнести так же, как и в первом случае, ограниченность круга минералов, которые могут быть обработаны химическим травлением.

### 3. Определение концентрации урана в различных породах, минералах и веществах по следам от осколков вынужденного деления урана с применением детекторов

Принципиальная возможность такого метода была высказана в работах /5,13/ и заключалась в фотографическом отображении на специальных детекторах актов вынужденного деления, происходящих в приповерхностном слое исследуемого вещества под действием потока нейтронов. Разработка этого метода, проведенная нами, позволила проводить измерения концентрации урана на шлифах, различных спайных и не спайных кристаллах, спрессованных порошках, жидкостях и т.д. Описываемый метод является в настоящее время единственным, позволяющим определять концентрацию урана в широком диапазоне концентраций в различных материалах.

Расчет концентрации проводится по следующей формуле

$$C = \frac{\rho \mu_U}{N_0 \int_0^{235} d \frac{R}{2} \epsilon \int_{E_0}^{E_f} n(E) \sigma(E) dE}, \quad (8)$$

где  $\rho$  - плотность следов от осколков вынужденного деления на детекторе.

$\int_{E_0}^E n(E)\sigma(E)dE$  исключается по описанной выше методике с использованием урановых мишеней различных масс. Окончательная формула для определения концентрации урана принимает следующий вид

$$C = k \rho \frac{m_1}{\rho_1} \quad (9)$$

где  $C$  измеряется в г/г,

$k$  – постоянная величина для исследуемого материала,

$\rho$  – плотность следов на детекторе, снятом с образцов,

$\rho_1$  – плотность следов на детекторах, снятых с мишеней,

$m_1$  – масса урана нанесенного на мишени в г/см<sup>2</sup>.

Методика эксперимента заключается в следующем. К образцам в виде шлифов прикрепляется детектор-лавсан. Затем исследуемые объекты подвергаются воздействию нейтронов в тепловом канале реактора. После облучения лавсан отделяется от образца и протравливается. В тех случаях, когда в приповерхностном слое образца происходило деление урана, осколок деления достигал лавсана и оставлял на нем след, который четко выявлялся при химическом травлении. Получено однозначное соответствие числа осколков деления в веществе и числа следов на лавсане с учетом эффективности последнего. При достаточно большой концентрации урана (10<sup>-4</sup>%) и потоке 10<sup>15</sup> – 10<sup>16</sup> н/см<sup>2</sup> на лавсановом детекторе можно выявить распределение урана в макромасштабе.

В том случае, когда изготовление шлифов было либо затруднено, либо нежелательно, исследуемый образец растирался в порошок. Растирание проводилось таким образом, чтобы не произошло разделения породы по фракциям, т.е. выбранная навеска образца растиралась без остатка. Использование сит с различной величиной ячейки позволяло в каждом случае выявлять такую зернистость, которая давала характерное для образца распределение урана. Приготовленные образцы прессовались в специальных формах в виде таблеток, размером  $\phi=6$  мм,  $h=3$  мм. Одной стороной таблетки наклеивались на плексиглас, с другой стороны к ним прикреплялся лавсан. Такой пакет облучался тепловыми нейтронами в реакторе. Затем лавсан отделялся от пакета и протравливался. Обработанный таким образом лавсан просматривался в оптическом микроскопе.

Плотность треков на детекторе ( $\rho$ ) для расчетной формулы (9) определялась следующим образом. Просчитывалась плотность следов от осколков деления на детекторе по всей поверхности образца и определялась такая "эффективная" площадь, которая повторяла характерное для исследуемого объекта распределение урана. Затем строились кривые распределения плотностей треков на образце по определенным "эффективным" площадям. На рис. 7 в качестве примера приведены кривые распределения плотностей треков, полученные на лавсане, являвшемся детектором для гранита.

Первый максимум на рис. 7 отражает фоновую плотность урана в граните, второй максимум соответствует урановым включениям, отображение которых на лавсане представлено на рис. 8. Аналогичный вид имеют кривые распределения и для других исследованных материалов, в которых наблюдались урановые включения. Во всех случаях для подсчета фоновой концентрации урана бралось значение  $\rho_{\text{фон}}$ , соответствующее первому максимуму на кривой распределения.

В таблице 4 приведены значения фоновых концентраций урана для целого ряда минералов и пород, полученных описываемым методом. Концентрация урана в гранитах, известняках и глинах определялась на прессованных образцах. Сопоставление результатов на гранитах, полученных на прессованных образцах и шлифах, дало хорошее совпадение. Величина фоновой концентрации урана для касситеритов получена на шлифах совместно с Е.И.Доломановой<sup>14/</sup>.

Т а б л и ц а 4

Концентрация урана в некоторых веществах, определенная с помощью детектора из лавсана

Вещество	с. $10^{-6}$ вес%	Вещество	с. $10^{-4}$ вес %
NaCl естественный	8,0	Песок кварцевый	0,2
NaCl искусственный	0,6	Гранит	1,8
KCl естественный	5,2	Глина тектолит	1,6
KCl искусственный	0,6	Известняк	1,4
CaCO <sub>3</sub> крупнозернистый	1,0	Касситерит светло-окрашенный	3,8
LiF искусственный	4,0	Касситерит темно-окрашенный	12,9

Концентрация урана для искусственных ионных кристаллов проверялась непосредственно на кристаллах с использованием химического травления кристалла.

Ошибка в определении концентрации урана по описанным методам складывается из ошибки, допускаемой при подсчете плотности следов, создаваемых осколками деления, определения эффективности выявления следов от осколков деления и точности нанесения масс на урановых мишенях. Эта ошибка может меняться в зависимости от типа исследуемых образцов в пределах 15-50%. Надежная чувствительность метода  $10^{-8}$  вес % при интегральном потоке тепловых нейтронов  $10^{16}$  н/см<sup>2</sup>.

Практические рекомендации по использованию различных детекторов, необходимых интегральных потоков и урановых мишеней для дозиметрии нейтронных потоков в связи с предполагаемыми величинами концентраций урана приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 5

Рекомендуемые источники излучения, детекторы, интегральные нейтронные потоки и массы урановых мишеней для определения потоков

в зависимости от предполагаемой концентрации урана в исследуемых образцах

Величина предполагаемой концентрации урана в вес. %	Источник излучения	Интегральный нейтронный поток н/см <sup>2</sup>	Рекомендуемый детектор	Масса урана на мишенях мкг/см <sup>2</sup>	
				Уран-235	естественная смесь изотопов урана
10	ампульный источник, генератор нейтронов	$10^{10}$	стекло, лавсан, слюда	-	10-100
1	-"-	$10^{11}$	-"-	-	-"-
$10^{-1}$	генератор нейтронов, реактор средней мощности	$10^{11}$	лавсан, слюда	$10^{-1}$ -1	-"-
$10^{-2}$	реактор средней мощности	$10^{12}$	-"-	$10^{-2}$ - $10^{-1}$	1-10
$10^{-3}$	-"-	$10^{13}$	-"-	$10^{-3}$ - $10^{-2}$	$10^{-1}$ -1
$10^{-4}$	-"-	$10^{14}$	лавсан	$10^{-4}$ - $10^{-3}$	-
$10^{-5}$	-"-	$10^{15}$	-"-	$10^{-5}$ - $10^{-4}$	-
$10^{-6}$ - $10^{-8}$	-"-	$10^{16}$	-"-	$10^{-6}$ - $10^{-5}$	-

Высокая чувствительность в определении концентрации урана позволяет применять данный метод для исследования распределения примесей в полупроводниках, металлах, поверхностных пленках, в биологических объектах, в различных жидкостях: нефти, воде и т.д.

Так, например, данный метод был применен для выявления распределения урана в касситеритах ( $\text{SnO}_2$ ). На рис. 9 приведена типичная картина отображения следов от осколков вынужденного деления урана в касситерите на лавсане.

Возможность выявления местоположения урана в материалах по воздействию осколков деления на детекторы позволяет данный метод называть методом осколкордиографии.

Известно, что ядра  $\text{Th}$  способны к делению в результате взаимодействия с быстрыми нейтронами. Это обстоятельство позволило наряду с определениями концентрации урана проводить в различных материалах измерения концентрации тория, для чего образцы облучались потоком нейтронов дважды: в кадмиевом контейнере, поглощающем тепловые нейтроны, и без него. Подсчитав плотность следов, создаваемую осколками деления на детекторе в обоих случаях, и зная изотопическое соотношение  $U^{235}$  и  $U^{238}$ , можно подсчитать в образце концентрацию тория (определению концентрации тория и его пространственного распределения в образцах будет посвящено отдельное сообщение).

В настоящее время метод идентификации заряженных частиц интенсивно развивается и имеется реальная возможность выявления пространственного распределения в образцах и горных породах не только урана, но и других элементов с использованием, наряду с реакцией ( $\alpha f$ ), такой реакции, как ( $\alpha, \alpha$ ).

Авторы выражают благодарность В.П. Перелыгину за полезную дискуссию при обсуждении результатов и Е.И. Доломановой, проводившей подсчет концентрации урана в касситеритах.

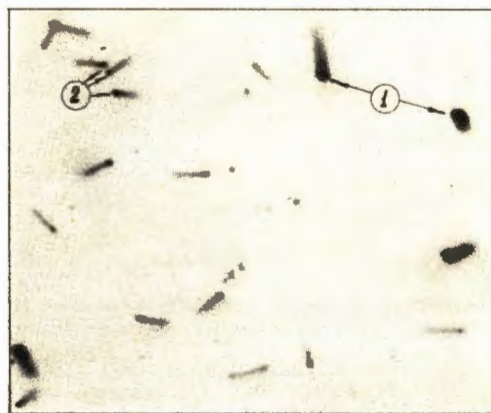
#### Л и т е р а т у р а

1. В.К. Марков, Е.А. Верный, А.В. Виноградов, С.В. Елинсон, А.Е. Клыгин, И.В. Моисеев. "Уран. Методы его определения", Атомиздат, М., 1984 г.
2. P. B. Price, R. M. Walker. "Ископаемые треки от заряженных частиц в слюде и возраст минералов". J. Geophys. Res., 68, 16, 4847-4862, 1963.



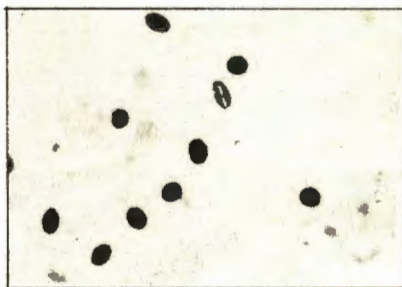
3. Я.Е. Гегузин, И.Г. Берзина, И.В. Воробьева "О термической устойчивости треков от осколков деления урана в монокристаллах мусковита по данным опытов по химическому травлению". Изв. АН СССР, серия геологическая № 6, 21, 1966.
4. И.Г. Берзина, БИ.Б. Берман, И.М. Злотова. Определение возраста слюды по следам от осколков деления урана. Изв. АН СССР, серия геологическая 9, 10, 1966.
5. P. V. Price, R. M. Walker . Простой метод измерения низких концентраций урана в естественных кристаллах. *Appl. Phys. Letters*, 2, 2, 23. (1963).
6. И.Г. Берзина, М.Ю. Гурвич, Г.И. Хлебников, Ю.С. Шимелевич. Дозиметрия нейтронных потоков по следам осколков деления урана, труды II координационного совещания по дозиметрии больших доз. Изд. ФАН Узб. ССР, Ташкент, 1966, 144.
7. А. Капусцик, В.П. Перелыгин, С.П. Третьякова. Эффективность регистрации актов деления ядер при помощи стекла и слюды. Приборы и техника эксперимента, 5, 72 (1964).
8. Х. Абдуллаев, С.К. Горбачев, В.П. Перелыгин, С.П. Третьякова. Определение геологического возраста слюды: мусковита, биотита и флогопита по следам осколков спонтанного деления урана. Препринт ОИЯИ РЗ-2961, Дубна, 1966.
9. И.Г. Берзина. Некоторые данные о слюдах по следам от осколков деления урана. ДАН СССР, 170 № 3, 681 (1966).
10. И.Г. Берзина, И.В. Воробьева, Я.Е. Гегузин, И.М. Злотова. Об отжиге треков от осколков деления в кристаллах слюды и стеклах, ДАН СССР, 171, 6 (1966).
11. И.Г. Берзина, И.Б. Берман "Об идентификации фигур травления на следах от осколков деления в ионных кристаллах", ДАН СССР, 174, №3, 48, 1967.
12. И.Г. Берзина, И.Б. Берман, М.Ю. Гурвич "Определение кварковых концентраций урана в ионных кристаллах", Атомная энергия, 6, 1967.
13. R. L. Fleischer, P. V. Price, R. M. Walker "Треки от заряженных частиц в твердых телах", *Science*, 149, 3682, 383, 1965.
14. И.Г. Берзина, Е.И. Долманова "Ураноносность касситеритов, определенная по следам от осколков деления урана", ДАН СССР, 173, 1, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 февраля 1967 года.



20 мк

Рис.1. Треки на мусковите, облученном осколками деления от урановой мишени массой  $30 \text{ мкг/см}^2$  (интегральный поток нейтронов  $2.10^{11} \text{ н/см}^2$ ).  
 1) Следы от осколков спонтанного деления урана. 2) Следы от осколков вынужденного деления урана мишени.



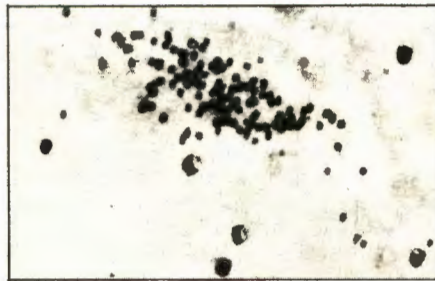
20 мк

Рис.2. Треки на стекле, облученном нейтронами в контакте с исследуемым образцом (интегральный поток нейтронов  $2.10^{12} \text{ н/см}^2$ ).



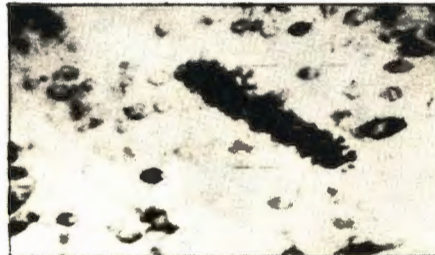
50мк

Рис.3. Треки на лавсане, облученном осколками деления от урановой мишени массой  $30 \text{ мкг/см}^2$  (интегральный поток нейтронов  $6 \cdot 10^{10} \text{ н/см}^2$ ).



50мк

Рис.4. Скопления следов от вынужденного деления урана на поверхности скола биотита №16. Режим травления: HF 13%,  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 10 \text{ мин.}$



100 мк

Рис.5. Скопление следов от вынужденного деления урана в мусковите №129. Режим травления: HF 54%,  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3 \text{ часа.}$

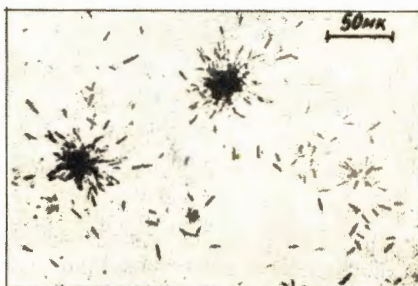
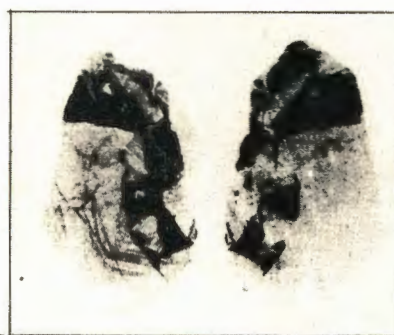


Рис.8. Отображение распределения урана с поверхности образца из гранита на лавсане.



а

б

Рис.9. Зеркальное отображение шлифа касситерита (а) на лавсане (б). Почернение на лавсане соответствует увеличенной плотности следов от осколков деления. Увеличено в 3 раза.