

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

И. Г. БЕРЗИНА, И. Б. БЕРМАН, М. Ю. ГУРВИЧ, Г. Н. ФЛЕРОВ,
Ю. С. ШИМЕЛЕВИЧ

УДК 546.791:539.173.4+539.173.7

Концентрация урана, определяемая в основном химическим, радиографическим и люминесцентным методами, характеризует усредненное значение количества этого элемента на единице площади или объема исследуемых веществ [1].

В настоящей работе описывается метод определения пространственного распределения и концентрации урана в природных минералах и горных породах.

Метод заключается в следующем. Осколки спонтанно или вынужденно делящихся ядер тяжелых элементов оставляют в окружающей среде дефектную область (трек), которая может быть обнаружена путем избирательного химического травления. В результате травления выявляется область нарушения, после чего следы от осколков хорошо просматриваются под микроскопом. Возможное разрешение участков с различной концентрацией ядер урана, тория и других делящихся элементов имеет величину порядка размеров трека, т. е. десятки микрон. Метод позволяет раздельно определять концентрацию урана и тория в рудных включениях, а также «фооновую» концентрацию.

Определение концентрации урана по следам от осколков спонтанного деления в слюдах.

Известно [2], что основной вклад в плотность ρ_1 следов от осколков спонтанного деления тяжелых элементов в минералах вносит U^{238} . Величина ρ_1 определяется выражением

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

где CN — число атомов урана в 1 см^3 вещества; I^{238} — изотопическая доля U^{238} ; λ — постоянная деления U^{238} ; T — время существования минерала; R — эффективный «травимый» след осколка деления; ε — коэффициент эффективности выявления следов от осколков деления. Формула (1) справедлива в том случае, если исследуемый минерал не подвергался термометаморфизму (так как в результате теплового воздействия на минерал следы от осколков деления могут исчезнуть) и в нем не произошло миграции урана.

На основании выражения (1) можно написать формулу для определения концентрации:

$$C = \frac{\rho_1}{NI^{238}\lambda T R \varepsilon} = A \frac{\rho_1}{T}, \quad (2)$$

где A — величина, постоянная для данного минерала. Таким образом, для определения концентрации урана в образце необходимо подсчитать плотность следов от осколков спонтанного деления. Для этого исследуемый минерал раскалывается по спайности и подвергается воздействию химического реагента, разъедающего поверхность в местах выхода следов от осколков. Форма и вид выявляемых фигур травления на следах, создаваемых осколками, позволяет судить о наличии или отсутствии в прошлом термометаморфизма [3, 4] и, таким образом, определить возможность применения данного метода. При отсутствии теплового воздействия ошибка в определении концентрации зависит от ошибки в оценке возраста, найденного независимым способом, и статистики измерений.

Если известен возраст минерала, описываемый метод позволяет с большой чувствительностью определять концентрацию урана в образце.

Этот метод может быть использован для выявления пространственного распределения урана в минерале. Полученные данные могут способствовать решению ряда важных вопросов, например, о формах вхождения урана в минерал, миграции урана из окружающей породы и др.

Преимущество описываемого метода заключается в возможности определения концентрации урана и его пространственного распределения на микроколичествах исследуемого материала; кроме того, он отличается высокой чувствительностью и экспрессностью.

Однако число минералов, на поверхности которых можно выявлять химическим путем следы от осколков деления, весьма ограничено. Необходимыми условиями для этого являются надежная идентификация треков, спайность минерала и отсутствие значительной плотности дефектов других типов, выявляемых травлением на исследуемой поверхности.

Определение концентрации урана по следам от осколков вынужденного деления в минералах, обладающих спайностью

Основы метода в общем виде описаны в работе [5], в которой концентрацию урана в минерале рекомендуется подсчитывать на основании формулы для плотности ρ_2 следов от осколков вынужденного деления:

$$\rho_2 = CNI^{235}\sigma nR\epsilon, \quad (3)$$

где I^{235} — изотопическая доля U^{235} ; σ — сечение деления U^{235} тепловыми нейтронами; n — интегральный поток тепловых нейтронов.

Для определения концентрации урана, выраженной в г/г с учетом спектра докадмиевых нейтронов с энергией от E_0 до E_1 , формулу (3) следует записать в виде

$$\rho_2 = C \frac{N_0}{\mu_U} I^{235} d \frac{R}{2} \epsilon \int_{E_0}^{E_1} n(E) \sigma(E) dE, \quad (4)$$

где N_0 — число Авогадро; $\sigma(E)$ — дифференциальное сечение деления; $n(E)$ — интегральный поток нейтронов; μ_U — молекулярный вес урана; d — плотность вещества.

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

$$C = B \frac{\rho_2}{\int_{E_0}^{E_1} n(E) \sigma(E) dE}, \quad (5)$$

где B — постоянный для данного кристалла коэффициент, зависящий от его свойств.

Значение интеграла, входящего в выражение (5), исключается следующим образом. Одновременно с исследуемыми образцами в канале реактора облучаются урановые мишени, обладающие различными массами, вместе с детекторами, непосредственно прилегающими к мишеням в период облучения и регистрирующими осколки деления, вылетающие из мишени [6]. Детектор подбирается таким, чтобы осколки деления создавали в его структуре дефекты, которые могли бы быть впоследствии выявлены избирательным травлением. После облучения детектор отделяется от мишени и обрабатывается соответствующим травителем для выявления зарегистрированных следов от осколков. В результате облучения акты деления урана, находящегося на мишени, будут зарегистрированы детектором. Плотность следов от осколков на

детекторе ρ_i определяется выражением

$$\rho_i = \frac{m_i}{\mu_i} N_0 I^{235} \epsilon_1 \int_{E_0}^{E_1} \sigma(E) n(E) dE, \quad (6)$$

где m_i — масса урана на мишени, г/см²; ϵ_1 — эффективность регистрации детектором следов от осколков деления. Решив уравнения (4), (6) относительно C , получим

$$C = \frac{\rho_2 \epsilon_1}{d \frac{R}{2} \epsilon \frac{\rho_i}{m_i}} = k \rho_2 \epsilon_1 \frac{m_i}{\rho_i} \quad (7)$$

Значение m_i/ρ_i находится по графику зависимости плотности следов, создаваемых осколками деления, на детекторе ρ_i от массы нанесенного слоя урана на мишени m_i (рис. 1). Желательно, чтобы в самом детекторе не было примесей урана, в противном случае акты деления урана, содержащегося в детекторе, могут внести существенную ошибку в подсчет следов от осколков деления урана в веществе. Таким детектором может служить лавсан, технология изготовления которого исключает наличие тяжелых элементов. В случае использования в качестве детекторов слюды или стекла в них предварительно определяется собственная концентрация урана.

На рис. 2 приведена микрофотография двукратно протравленной слюды до и после облучения в контакте с урановой мишенью. Крупные фигуры травления соответствуют следам от осколков спонтанного деления, мелкие — следам от вынужденного деления, происходящего в урановой мишени. Различие в величии

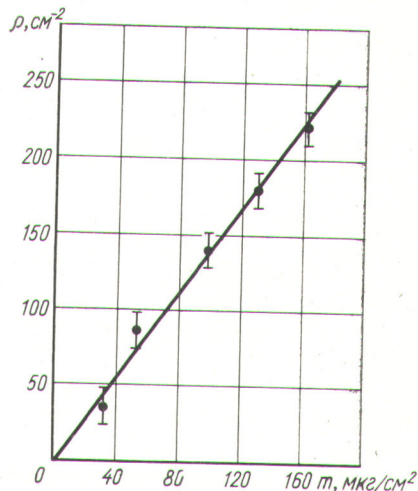


Рис. 1. Зависимость плотности следов от осколков деления от массы урана на мишени.



Рис. 2. Треки на мусковите, облученном осколками деления от урановой мишени массой 30 мг/см² ($n = 2 \cdot 10^{11}$ нейтр/см²);

1 — следы от осколков спонтанного деления урана; 2 — следы от осколков вынужденного деления урана.

нах выявляемых следов объясняется двукратным травлением одной и той же поверхности до и после облучения. На рис. 3 и 4 приведены микрофотографии облученных осколками деления и протравленных поверхностей стекла и лавсана.

Значение ϵ , для определения которого были проведены специальные опыты [7, 8], принято равным для фотостекла 42%, для лавсана 76%, для мусковита [2] 100%.

Таким образом, концентрация урана в образце является функцией только плотности следов от вынужденного деления, зарегистрированной детектором, и плотности следов от вынужденного деления, подсчитываемой непосредственно на образце.



Рис. 3. Треки на стекле, облученном нейтронами в контакте с исследуемым образцом ($n = 2 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²);

Режим травления: HF 2,5%; $t = 20^\circ \text{C}$; $\tau = 20$ мин.

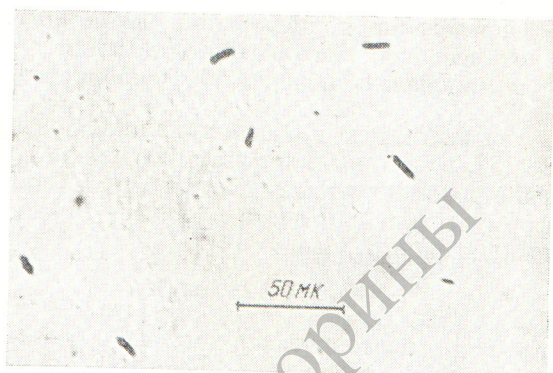


Рис. 4. Треки на лавсане, облученном осколками деления от урановой мишени массой 30 мг/см² ($n = 6 \cdot 10^{10}$ нейтр/см²).

Режим травления: KOH 40%; $t = 60^\circ$; $\tau = 30$ мин.

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 пакет из лавсана 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 характерные для данного материала геометрические очертания на плоскости скола [9].

В табл. 1 приведены экспериментальные данные по определению концентрации урана в слюдах по плотности следов от спонтанного и вынужденного деления.

Как следует из таблицы, значения концентрации урана, полученные двумя методами, совпадают.

Исключение составляет образец № 15, в котором концентрация урана, определенная на основании подсчета плотности следов от осколков спонтанного деления, меньше соответствующей концентрации, полученной по вынужденному делению, в 2,5 раза. Это расхождение, по-видимому, обусловлено тем, что исследуемый мусковит подвергался термометаморфизму, о чем свидетельствуют видоизмененные фигуры травления на треках [3, 10].

Концентрация урана в слюдах, Таблица 1
определенная по спонтанному и вынужденному
делению ядер урана

Номер образца	Тип слюды	Концентрация, $\times 10^{-11}$ атом/атом	
		спонтанное деление	вынужденное деление
17	Мусковит	6	7
21	Мусковит	40	36
32	Мусковит	1	1
84	Мусковит	2	2
15	Мусковит	19	45
10	Флогопит	36	36
13	Вермикулит	36	41

Рассмотрим возможности интерпретации данных, полученных обоими методами. Наиболее важной из них является возможность определения миграции урана в течение времени существования минерала. Следы осколков вынужденного деления фиксируют наличие урана в настоящее время, тогда как следы осколков спонтанного деления позволяют выявить пространственное распределение урана в минерале за период его существования. Тот факт, что в местах урановых скоплений, обнаруженных по следам от осколков спонтанного деления, после облучения не возникает следов от вынужденных делений, свидетельствует о миграции урана (рис. 5, а). И наоборот, часто можно наблюдать скопления урана, обнаруженные только по вы-

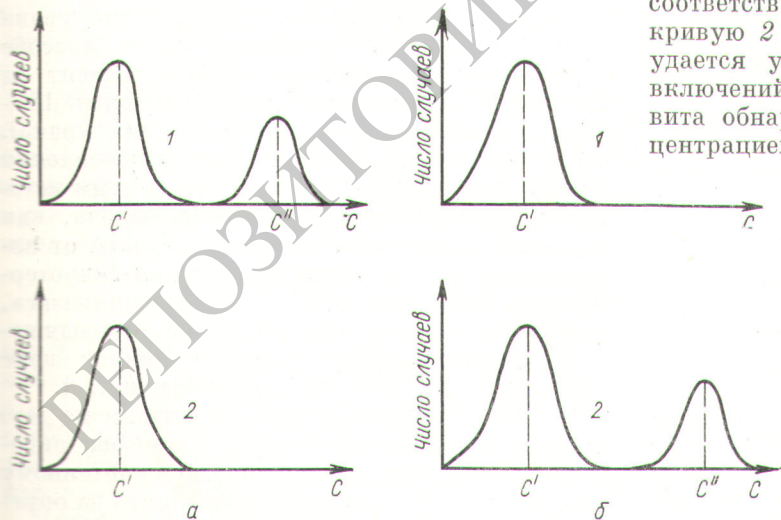


Рис. 5. Схема возможных распределений концентрации урана:

а — вынос урана из минерала; б — привнос урана в минерал; 1 — спонтанное деление; 2 — вынужденное деление; C' — среднее значение фоновой концентрации урана; C'' — среднее значение концентрации урана во включениях.

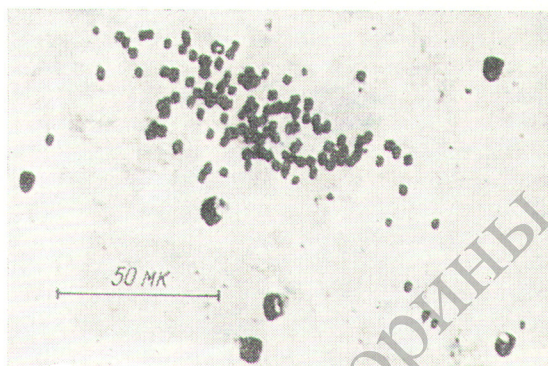


Рис. 6. Скопления следов от вынужденного деления урана на поверхности скола биотита.

Режим травления: HF 13%; $t = 20^\circ \text{C}$; $\tau = 10$ мин.

нужденному распаду (рис. 6). В этом случае можно говорить о привносе 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, 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 (см. кривую 1 на рис. 5, б). 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 (см. кривую 2 на рис. 5, б). В некоторых случаях удается установить возраст таких урановых включений. Например, в одном образце мусковита обнаружены урановые скопления с концентрацией $C = 10^{-2}\%$, возраст которых был определен нами по методу треков [2, 4] и равнялся $T \approx 20$ млн. лет.

На основании анализа большого числа образцов слюды можно заключить, что миграция урана чаще всего наблюдается в слюдах из гранитов. В этих слюдах урановые скопления могут встречаться в виде минералов и включений, имеющих правильную геометрическую форму (рис. 7). Можно предположить, что образование таких включений связано с движением гидротермальных растворов и последующим осаждением урана на слюде. Часто повышенная концент-

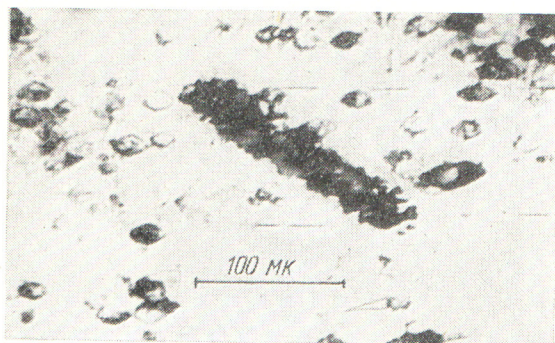


Рис. 7. Скопление следов от вынужденного деления урана в мусковите.

Режим травления: HF 54%; $t = 20^\circ \text{C}$; $\tau = 3 \text{ ч}$.

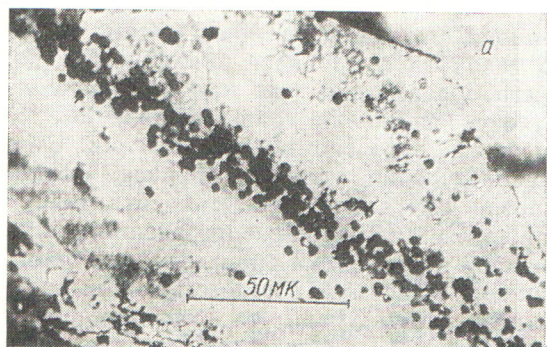


Рис. 8. Движение урана по естественным макродефектам слюды:

a — биотит № 79; *b* — биотит № 18; режим травления: HF = 13%; $t = 20^\circ \text{C}$; $\tau = 10 \text{ мин}$.

рация урана в минералах наблюдается вдоль трещин. На рис. 8 в качестве примера приведена микрофотография протравленной слюды с такой трещиной. Отсутствие вдоль трещины следов от спонтанного деления свидетельствует об осаждении здесь урана в значительно более позднее время по сравнению с минерализацией слюды.

В некоторых кристаллах, таких, как NaCl, KCl, CaCO₃ и др., наряду со следами от осколков деления наблюдаются другие типы дефектов, которые при взаимодействии кристалла с химическим реагентом имеют аналогичные трекам формы фигур травления. Специальными экспериментами [11] была показана возможность идентификации следов от осколков деления и дислокаций в ионных кристаллах. В том случае, когда плотность дислокаций не превышает 10^6 см^{-2} можно подсчитать плотность следов от осколков вынужденного деления, используя метод двухкратного травления кристаллов, аналогичный описанному выше. Результаты таких измерений, полученные для ионных кристаллов, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Определение концентрации урана в ионных кристаллах по вынужденному делению урана

Кристалл	$C, \times 10^{-10} \text{ атом/атом}$
NaCl	8,8
KCl	12,2
CaCO ₃	7,6

Эффективность выявления следов, создаваемых осколками деления в ионных кристаллах, определялась в опытах, описанных в работе [12].

Ошибка в определении концентрации урана этим методом при указанном выше способе определения нейтронного потока зависит от статистики измерений и может составить 15—50% (в зависимости от распределения урана).

Возможность выявления урановых скоплений и миграции урана позволяет решать этим методом такие важные геологические задачи, как отделение первичного оруденения урана от наложенного в результате воздействия гидротермальных процессов и процессов гипергенезиса, возможности выявления механизма, приводящего к дифференциации урана в земной коре и выносу его в верхние горизонты, и т. д.

К преимуществам данного метода кроме тех, которые были перечислены для способа определения концентрации урана по спонтанному делению, следует отнести также то, что на определение концентрации урана данным методом не оказывает влияние тепловое воздействие на минерал за время его существования. 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.

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

Принципиальная возможность осуществления такого метода была высказана в работах [5, 13]. Этот метод заключается в регистрации на специальных детекторах актов вынужденного деления, происходящих в приповерхностном слое исследуемого вещества под действием потока нейтронов. Использование разработанной нами методики позволяет измерять концентрацию урана в шлифах, любых кристаллах, спрессованных порошках, жидкостях и пр. В настоящее время этот метод является единственным методом, позволяющим определять концентрацию урана в широком диапазоне концентраций в различных материалах.

Для расчета концентрации применяется формула

$$C = \frac{\rho \mu U}{N_0 I^{235} d \frac{R}{2} \varepsilon \int_{E_0}^{E_1} n(E) \sigma(E) dE}, \quad (8)$$

где ρ — плотность следов от осколков вынужденного деления на детекторе. Интеграл $\int_{E_0}^{E_1} n(E) \sigma(E) dE$ исключается по описанной выше методике с использованием урановых мишеней различных масс. Окончательная формула для определения концентрации урана принимает вид

$$C = k \rho \frac{m_i}{\rho_i}, \quad (9)$$

где C — концентрация урана, г/г; k — постоянная величина для исследуемого материала; ρ — плотность следов на детекторе, снятом с образцов; ρ_i — плотность следов на детекторах, снятых с мишеней; m_i — масса урана, нанесенного на мишени, г/см².

Методика эксперимента заключается в следующем. К образцам в виде шлифов прикрепляется детектор из лавсана. 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 оставлял след на лавсане, 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 ($10^{-4}\%$) и потоке ($10^{15} - 10^{16}$ нейтр/см²) на детекторе из лавсана можно выявить распределение урана в макромасштабе.

В том случае, когда изготовление шлифов было затруднено или считалось нежелательным, исследуемый образец растирался в порошок так, чтобы не произошло разделения породы по фракциям, т. е. выбранная навеска образца растиралась без остатка. Приготовленные образцы прессовались в специальных формах в виде таблеток диаметром 6 и высотой 3 мм. Одной стороной таблетки наклеивались на плексиглас, с другой стороны к ним прикреплялся лавсан. Такой пакет помещался в реактор для облучения тепловыми нейтронами. Затем лавсан отделялся от пакета и протравливался. Обработанный таким образом лавсан просматривался под микроскопом.

Плотность треков на детекторе ρ 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. 9 в качестве примера приведена кривая распределения плотностей треков, зарегистрированных на лавсане

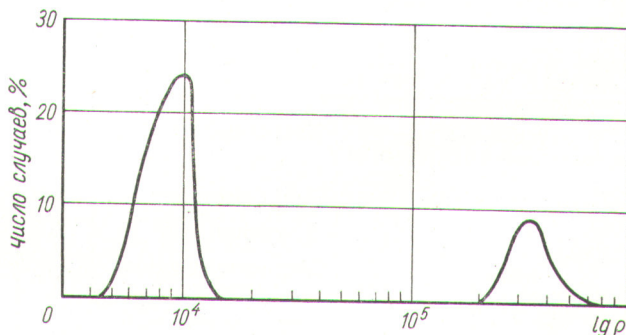


Рис. 9. Распределение плотностей следов от осколков деления, полученное на лавсане, являвшемся детектором для прессованного образца гранита.

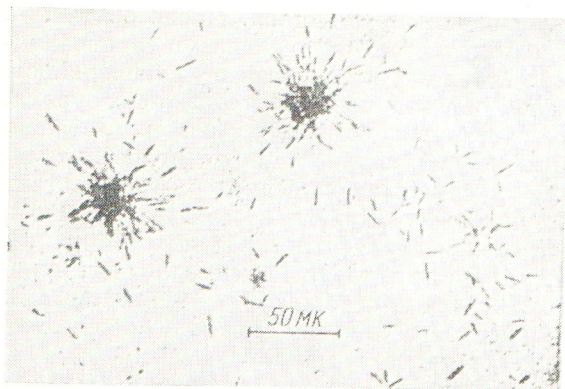


Рис. 10. Отображение на лавсане распределения урана с поверхности образца гранита.

при облучении образца гранита. Первый максимум кривой соответствует фоновой концентрации урана в граните, второй максимум — урановым включениям, отображение которых на лавсане представлено на рис. 10. Аналогичный вид имеют кривые распределения и для других образцов 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 табл. 3 приведены значения фоновых концентраций урана для некоторых минералов и пород, полученные описываемым методом. Концентрация урана в гранитах, известняках и глинах определялась на прессованных образцах. Сопоставление результатов, полученных для гранитов на прессованных образцах и шлифах, дало хорошее совпадение. Величина фоно-

Концентрация урана в некоторых веществах, определенная при помощи детектора из лавсана Таблица 3

Вещество	$C, \times 10^{-6}$ вс. %	Вещество	$C, \times 10^{-4}$ вс. %
NaCl (естественный)	8,0	Кварцевый песок	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 ₃ (крупнозернистый)	1,0	Светлоокрашенный касситерит	3,8
LiF (искусственный)	4,0	Темноокрашенный касситерит	12,9

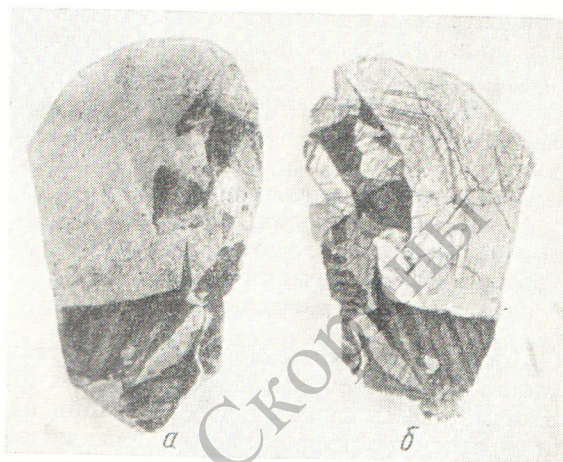


Рис. 11. Зеркальное отображение шлифа касситерита (а) на лавсане (б); почернение на лавсане соответствует увеличенной плотности следов от осколков деления ($\times 3$).

вой концентрации урана в касситеритах [14] получена на шлифах.

Концентрация урана в искусственных ионных кристаллах 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, измерения эффективности выявления следов от осколков деления и точности определения массы на урановых мишенях. В зависимости от типа исследуемых образцов эта ошибка составляет 15—50%. Надежная чувствительность метода 10^{-8} вес. % при интегральном потоке тепловых нейтронов 10^{16} нейтр/см².

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 табл. 4.

Высокая чувствительность в определении концентрации урана позволяет применять данный метод для исследования распределения примесей в полупроводниках, металлах, поверхностных пленках, биологических объектах, различных жидкостях (нефти, воде) и пр. Например, данный метод был применен для изучения распределения урана в касситеритах (SnO₂). На рис. 11 приведена типичная картина отображения на лавсане следов от осколков вынужденного деления урана в касситерите.

Источники излучения, детекторы, интегральные нейтронные потоки и массы урановых мишеней для определения потоков нейтронов при различных значениях концентраций урана в исследуемых образцах

Величина предполагаемой концентрации урана, вес. %	Источник излучения	Интегральный нейтронный поток, нейтр/см ²	Рекомендуемый детектор	Масса урана на мишенях мг/см ²	
				U ²³⁵	естественная смесь изотопов урана
10	Ампульный источник, генератор нейтронов	10 ¹⁰	Стекло, лавсан, слюда	—	10—100
1	То же	10 ¹¹	То же	—	10—100
10 ⁻¹	Генератор нейтронов, реактор средней мощности	10 ¹¹	Лавсан, слюда	0,1—1	10—100
10 ⁻²	Реактор средней мощности	10 ¹²	То же	10 ⁻² —10 ⁻¹	1—10
10 ⁻³	То же	10 ¹³	» »	10 ⁻³ —10 ⁻²	0,1—1
10 ⁻⁴	» »	10 ¹⁴	Лавсан	10 ⁻⁴ —10 ⁻³	—
10 ⁻⁵	» »	10 ¹⁵	То же	10 ⁻⁵ —10 ⁻⁴	—
10 ⁻⁶ —10 ⁻⁸	» »	10 ¹⁶	» »	10 ⁻⁶ —10 ⁻⁵	—

Так как данный метод позволяет выявлять местоположения урана в материалах по воздействию осколков деления на детекторы, его можно называть методом осколкордиографии.

Известно, что ядра тория способны к делению в результате взаимодействия с быстрыми нейтронами. Это обстоятельство позволило наряду с определениями концентрации урана измерять концентрацию тория в различных материалах, 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 U²³⁵—U²³⁸, можно легко подсчитать концентрацию тория в образце. (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 для выявления пространственного распределения в образцах и горных породах не только урана, но и других элементов, используя наряду с реакцией (*n, f*) реакцию (*n, α*).

Авторы выражают благодарность В. П. Перельгину за полезную дискуссию при обсуждении результатов и Е. И. Долмановой, производившей подсчет концентрации урана в касситах.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Марков и др. Уран. Методы его определения. М., Атомиздат, 1964.
2. P. Price, R. Walker. J. Geophys. Res., 68, 4847 (1963).
3. Я. Е. Гегузин, И. Г. Берзина, И. В. Воробьева. «Изв. АН СССР. Сер. геол.», № 6, 21, (1966).
4. И. Г. Берзина, И. Б. Берман, И. М. Злотова. «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 9, 10 (1966).
5. P. Price, R. Walker. Appl. Phys. Letters, 2, 23 (1963).
6. И. Г. Берзина и др. В кн. «Труды второго координационного совещания по дозиметрии больших доз». Ташкент, Изд. ФАН УзбССР, 1966, стр. 144.
7. А. Капусцник, В. П. Перельгин, С. П. Третьякова. «Приборы и техника эксперимента», 5, 72 (1964).
8. Х. Абдуллаев и др. Препринт ОИЯИ, РЗ-2961, Дубна, 1966.
9. И. Г. Берзина. «Докл. АН СССР», 170, 684 (1966).
10. И. Г. Берзина и др. «Докл. АН СССР», 171, 1313 (1966).
11. И. Г. Берзина, И. Б. Берман. «Докл. АН СССР», 174, 48 (1967).
12. И. Г. Берзина, И. Б. Берман, М. Ю. Гурвич. «Атомная энергия», 22, 504 (1967).
13. R. L. Fleischer et al. Science, 149, 383 (1965).
14. И. Г. Берзина, Е. И. Долманова. «Докл. АН СССР», 175, 171 (1967).

Поступила в Редакцию 31/III 1967 г.