

Рис. 2. Влияние температуры изохронного отжига на электропроводность облученных карбидов:

▲ — TiC, доза облучения  $10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>; □ — TiC,  $10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>; ○ — Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>,  $10^{18}$  нейтр/см<sup>2</sup>; ▼ — Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>,  $10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>.

Выдержка карбида хрома, облученного дозой  $10^{18}$  нейтр/см<sup>2</sup>, при температурах 600 и 800° С не приводит к восстановлению электропроводности, что согласуется с данными по изохронному отжигу.

Исследование залечивания радиационных дефектов при изохронном отжиге показало, что радиационные дефекты в карбиде титана обладают большей термической устойчивостью по сравнению с карбидом хрома. Это связано с тем, что температура плавления TiC (3147° С) выше, чем Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (1660° С). Существенное восстановление электропроводности Cr<sub>7</sub>O<sub>3</sub>, облученного дозой  $10^{20}$  нейтр/см<sup>2</sup>, начинается с 600° С, а при 400° С наблюдается лишь тенденция к уменьшению электропроводности.

Исходя из данных по залечиванию радиационных дефектов в металлах [15] и графите [16], можно предположить, что точечные дефекты, особенно вакансии, возникшие в TiC и Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> во время облучения, довольно устойчивы. Межузельные атомы частично отжигаются в процессе облучения в результате рекомбинации слабо диссоциированных пар Френкеля и поглощения ловушками. Залечивание вакансий в металлах наблюдается

при  $T \approx 0,3T_{пл}$  (°К). В исследованных карбидах (см. рис. 2) залечивание дефектов происходит при более высоких температурах. Образовавшиеся при облучении скопления вакансий и межузельных атомов ликвидируются в результате процесса самодиффузии при температурах, превышающих  $0,4T_{пл}$  (°К).

Поступило в Редакцию 12/V 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Seeger. Phys. Verhandl. DPG, 4, 401 (1964).
2. R. Jan. Phys. Stat. Sol., 6, 925 (1964); 7, 299 (1964); 8, 331 (1965).
3. G. Leibfried. J. Appl. Phys., 30, 1388 (1959).
4. M. Thompson. Rend. Sc. internaz. fis. «Enrico Fermi», 1960, vol. 18, N.Y.—Lond., 1962, p. 169.
5. K. Sizman. Res. Group U.K. Atomic Energy Author., NAERE-R4694, 41, 1964.
6. G. Lück, K. Sizman. Phys. Stat. Sol., 6, 263 (1964).
7. K. Dettmann, G. Leibfried. Res. Group U.K. Atomic Energy Author., NAERE-R4694, 39, 1964.
8. W. Frank et al. Phys. Stat. Sol., 8, 345 (1965).
9. A. Damask. Rend. Sc. internaz. fis. «Enrico Fermi», 1960, vol. 18, N.Y.—Lond., 1962, p. 555.
10. Г. В. Самсонов, Я. С. Уманский. Твердые соединения тугоплавких металлов. М., Металлургия, 1957.
11. С. Н. Львов и др. «Физ. металлов и металловедение», 11, 143 (1961).
12. Г. В. Самсонов, М. С. Ковальченко. Горячее прессование. Киев, Гостехиздат УССР, 1962.
13. В. В. Огородников, И. М. Федорченко, А. И. Райченко. «Докл. АН УССР», № 12, 1603 (1960).
14. И. Д. Конозенко, В. С. Нешпор. «Порошковая металлургия», № 1, 60 (1965).
15. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
16. Дж. Вильямсон. Графит в ядерных реакторах. Сборник докладов на симпозиуме в Институте металлов в Лондоне. Харьков, Изд-во ФТИ АН УССР, 1962.

Определение возраста минералов по следам от осколков деления ядер урана

И. Г. ВЕРЗИНА, П. Г. ДЕМИДОВА

УДК 539.173.7:539.173.4

В последние годы разработан метод определения возраста минералов по следам от осколков вынужденного и спонтанного деления ядер урана [1—3]. Этот метод основан на выявлении и подсчете дефектов кристаллической решетки минерала, вызываемых осколками спонтанного и вынужденного деления.

Присутствие кларковых содержаний делящихся элементов в минералах обеспечивает принципиальную возможность выявления самопроизвольного распада этих элементов по следам от осколков деления, которые наблюдаются на поверхностях сколов исследуемых образцов. Поскольку ядро U<sup>238</sup> распадается путем

спонтанного деления в 23 раза быстрее, чем ядро U<sup>235</sup>, а на долю изотопа U<sup>235</sup> в природном уране приходится только 0,7%, можно допустить, что основной вклад в количество делений вносит U<sup>238</sup>. При делении U<sup>238</sup>, как правило, образуется два осколка, которые движутся в окружающей среде, теряя энергию и вызывая нарушения кристаллической решетки. Последние выявляются путем травления минералов специально подобранными химическими реагентами, благодаря чему первоначальные дефекты кристаллической решетки приобретают вид каналов, сечение которых увеличивается в зависимости от времени травления. Если

**Значения возраста минералов, полученные по следам от осколков деления урана и калий-аргоновым методом**

Номер образца	Место отбора образца	Возраст, млн. лет	
		по следам от осколков деления ядер урана	калий-аргоновым методом *
1	Кварц-вольфрамитовая жила	122±19	132±5
2	Кварц-вольфрамитовая жила	117±15	131±5
3	Пегматитовая жила . . . . .	122±18	138±7

\* Анализы слюды калий-аргоновым методом выполнены в лаборатории абсолютного возраста Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР под руководством Л. Л. Шанина.

при травлении диаметр каналов увеличивается примерно до 1000 Å, то они становятся различимыми под микроскопом.

Число следов от осколков спонтанного деления является функцией возраста образца. Основная трудность при вычислении возраста минерала состоит в определении содержания урана в том же объеме вещества, в котором подсчитывается число следов от осколков спонтанного деления. Задача решается удовлетворительно благодаря применению описанного в работе [2] способа определения концентрации урана по следам от осколков вынужденного деления. Возраст минерала  $T$  определяется соотношением [3]

$$T = \frac{\rho_1 n \sigma J^{235}}{\rho_2 \lambda J^{238}}, \quad (1)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности следов от осколков спонтанного и вынужденного деления ядер урана соответственно;  $\lambda$  — постоянная спонтанного распада  $U^{238}$ ;  $n$  — доза тепловых нейтронов;  $\sigma$  — поперечное сечение деления  $U^{235}$  тепловыми нейтронами;  $J^{235}$  и  $J^{238}$  — изотопические количества  $U^{235}$  и  $U^{238}$  в данном минерале. Уравнение (1) справедливо для  $T \leq 10^9$  лет.

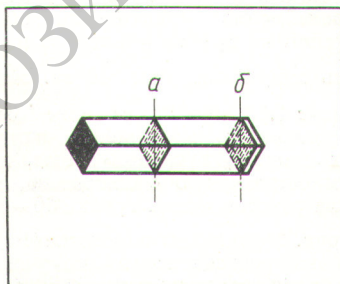


Рис. 2. Схема разрыва следа от осколка деления при расколе слюды по спайности.

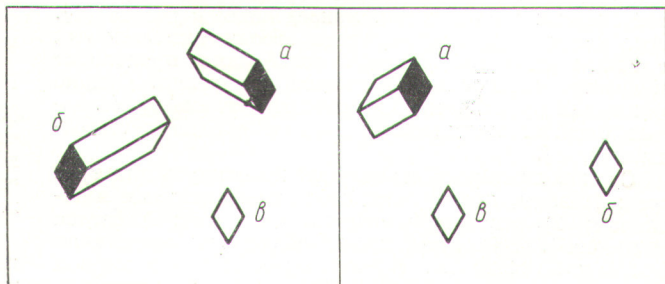


Рис. 3. Возможные варианты выявления следов от осколков деления на зеркальных сколах слюды:  $a$  — попарно протяженные следы;  $b$  — протяженный и плоский следы;  $v$  — попарно плоские следы.



Рис. 1. Следы от осколков спонтанного и вынужденного деления ядер урана в мусковите (двойное травление).

Рассматриваемый метод был использован для определения возраста минералов месторождений редких металлов Восточного Забайкалья, которые согласно общегеологическим данным после своего образования не подвергались действию высоких температур. В частности, образцы 1 и 2 (см. таблицу) были взяты из центральных частей кварц-вольфрамитовых жил, позже которых формировались лишь жилы и прожилки низкотемпературного халцедоновидного кварца.

В ходе опытов пластинки слюды помещали в раствор 48%-ной плавиковой кислоты и выдерживали в нем в течение 20 ч при температуре 20° С. На протравленных поверхностях подсчитывали плотность следов от осколков спонтанного деления, после чего образцы во избежание загрязнений покрывали полиэтиленовой пленкой и облучали потоком тепловых нейтронов в ядерном реакторе. Затем пластинки вторично протравливали в тех же условиях и подсчитывали плотность следов от осколков вынужденного деления.

На рис. 1 показаны типичные следы от осколков деления в минерале, выявленные в процессе двукратного травления образца плавиковой кислотой до и после облучения тепловыми нейтронами. Поперечные сечения каналов имеют вид ромбов.

На протравленных зеркальных сколах слюды выявлено три типа следов от осколков деления — попарно протяженные, протяженные и плоские,

попарно плоские [5]. На рис. 2 приведена схема разрыва следа от осколка деления в результате раскола слюды по спайности. В том случае, если плоскость раскола пересекает след от осколка далеко от его концов, то на зеркальных сколах протяженных поверхностей будут наблюдаться два протяженных следа (см. рис. 2 и 3, а). Если плоскость раскола пересекает след близко к одному из его концов, то на зеркальных сколах выявляются протяженный и соответствующий ему плоский следы (см. рис. 2 и 3, б). Следы третьего типа (см. рис. 3, в), как показано в работе [5], представляют собой следы от осколков деления, «залечившиеся» в процессе высокотемпературного отжига слюды. В нашем случае вклад плоских дефектов в общее число следов от осколков деления, использованное при вычислении возраста минералов, не превышает 7%. Незначительное число залечившихся следов можно рассматривать как указание на отсутствие периодов термометаморфизма в течение всей геологической истории исследованных образцов. Из работы [4] известно, что воздействие на слюду невысокой температуры (порядка 150°С) даже в течение длительного времени не приводит к залечиванию следов.

В таблице представлены результаты определений возраста минералов по следам от осколков деления и калий-аргоновым методом. Некоторое систематическое занижение значений возраста, полученных описываемым методом, можно объяснить в основном ошибкой при определении нейтронных потоков, поскольку статистическая ошибка при многократных измерениях была сведена к минимуму ( $\pm 3\%$ ).

Проведенные эксперименты подтвердили возможности использования описанного метода для опреде-

ления абсолютного возраста слюды, не подвергшейся термометаморфизму. Можно полагать, что применение этого метода к минералам, претерпевшим длительное нагревание при температурах выше 100—150°С, позволит найти способ вычисления времени метаморфизма, которое не поддается оценке существующими методами, но представляет большой интерес для решения некоторых геологических задач.

Преимущество данного метода по сравнению с другими методами геохронологии состоит в том, что он применим для определения возраста любого минерала на основании небольшого количества чисто отобранного материала (например, тонкие пластинки слюды величиной 1 мм<sup>2</sup>).

В заключение авторы выражают глубокую признательность Г. Н. Флерову за предложенное направление исследований, а также Ю. С. Шимелевичу за полезную дискуссию при обсуждении полученных результатов.

Поступило в Редакцию 12/V 1966 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M. Maurette, P. Pellas, R. Walker. Bull. Soc. franc. mineral. et cristallogr., 87, 6 (1964).
2. P. Price, R. Walker. Appl. Phys. Letters, 2, 23 (1963).
3. P. Price, R. Walker. J. Geophys. Res., 68, 4847 (1963).
4. R. Fbeisher et al. Science, 143, 349 (1964).
5. Я. В. Гегузин, И. Г. Берзина, И. В. Воробьева. «Изв. АН СССР. Сер. геол.», № 6, 21 (1966).

## Энергетические характеристики рентгеновского излучения при максимальных напряжениях 40—120 кВ

Р. В. СТАВИЦКИЙ

УДК 621.386.7:621.386.86

При расчетах и контроле защиты от прямого и рассеянного рентгеновского излучения при напряжениях на трубке 40—120 кВ. макс необходимо учитывать энергетические характеристики обоих видов излучения. Нами была использована методика косвенного определения энергетических характеристик с помощью одно- и двукратного измерения слоев половинного ослабления  $\Delta$  с последующим определением эффективной энергии по таблицам, приведенным в работе [1]. Этот метод не может считаться абсолютным, так как в самом слое половинного ослабления происходит изменение спектрального состава излучения. Однако для целей практической дозиметрии знание эффективных энергий излучения считается вполне достаточным [2, 3].

Слой половинного ослабления измерялись для трех сред: 1) воды, являющейся тканезквивалентным материалом; 2) кирпича (плотность 1,6 г/см<sup>3</sup>); 3) бетона (2,3 г/см<sup>3</sup>). Величины полей облучения составляли 4 × 4 и 20 × 20 см. Предполагалось, что в первом случае имеет место геометрия узкого, а во втором — широкого пучка излучения. Для учета разницы эффективных энергий излучения в объектах облучения различной толщины измерения проводили дважды — при толщинах тканезквивалентной среды 5 и 20 см.

Применялся дозиметр конденсаторного типа с тонкстенной ионизационной камерой чувствительностью 9—250 мр, погрешность измерения которой не хуже  $\pm 5\%$  в диапазоне энергий 30—200 кэВ.

Предварительно в свободном воздухе были измерены зависимости слоев половинного ослабления от напряжения на трубке (рис. 1). Довольно значительная разница в первом  $\Delta_1$  и втором  $\Delta_2$  слоях половинного ослабления практически во всем диапазоне напряжений на трубке указывает на большую неоднородность излучения (при 40 кВ. макс  $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = 1,21$ , при 80 кВ. макс 1,33, при 120 кВ. макс 1,38). Следовательно, чтобы уменьшить поглощение излучения в поверхностных слоях облучаемой среды, необходимо увеличить дополнительную фильтрацию, начиная с напряжений на рентгеновской трубке 60—80 кВ. макс и выше.

На рис. 2 показаны энергетические характеристики первичного рентгеновского излучения после прохождения слоя воды толщиной 5 и 20 см. Характер кривых для узкого пучка излучения показывает, что эффективная энергия увеличивается равномерно, причем однородность излучения сохраняется примерно постоянной. При этом эффективные энергии почти