

Ю. А. ШУКОЛЮКОВ, Г. Ш. АШКИНАДЗЕ, А. Н. КОМАРОВ

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ КСЕНОН-УРАНОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА РАДИОАКТИВНЫХ МИНЕРАЛОВ

(Представлено академиком В. И. Смирновым 17 I 1974)

Новый метод ядерной геохронологии отличается от ранее известных уран-свинцового, рубидий-стронциевого и калий-аргонового методов тем, что не требует определения абсолютных количеств радиоактивного и радиогенного изотопа. Определение возраста сводится к изотопному анализу ксенона, выделенного из минерала.

Принципы теории нейтронно-активационного ксенон-уранового метода. При спонтанном делении изотопа U^{238} в минерале за время t накапливается количество i -го изотопа ксенона

$$Xe_s^i = U^{238} \frac{y_{Xe_s^i} \cdot \lambda_s}{\lambda_\alpha} (e^{\lambda_\alpha t} - 1), \quad (1)$$

где U^{238} — концентрация изотопа урана, $y_{Xe_s^i}$ — выход i -го изотопа ксенона при спонтанном делении U^{238} , λ_s и λ_α — константы скорости спонтанного деления и α -распада U^{238} соответственно.

Если тот же минерал облучен в ядерном реакторе интегральным потоком тепловых нейтронов $\bar{\Phi}$, вследствие индуцированного деления изотопа U^{235} в минерале возникает некоторое количество i -го изотопа ксенона:

$$Xe_{nr}^i = \bar{\Phi} \sigma_{235} y_{Xe_{nr}^i} U^{235}, \quad (2)$$

где σ_{235} — поперечное сечение ядерной реакции деления U^{235} под действием тепловых нейтронов; $y_{Xe_{nr}^i}$ — выход i -го изотопа ксенона при нейтронно-индуцированном делении U^{235} ; U^{235} — концентрация изотопа урана.

Из (1) и (2) следует, что

$$\frac{Xe_s}{Xe_{nr}} = 137,8 \frac{y_{Xe_s^i} \cdot \lambda_s}{\bar{\Phi} y_{Xe_{nr}^i} \cdot \sigma_{235} \cdot \lambda_\alpha} (e^{\lambda_\alpha t} - 1), \quad (3)$$

где $137,8 = U^{238}/U^{235}$.

Таким образом, для нахождения возраста t нет необходимости определять концентрацию урана или ксенона:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left(\frac{Xe_s^i}{Xe_{nr}^i} \frac{\bar{\Phi} y_{Xe_{nr}^i} \cdot \sigma_{235} \cdot \lambda_\alpha}{137,8 y_{Xe_s^i} \cdot \lambda_s} + 1 \right). \quad (4)$$

Из входящих в формулу (4) величины четыре заранее известны: $\lambda_\alpha = 0,154 \cdot 10^{-9}$ год $^{-1}$, $\sigma_{235} = 583 \cdot 10^{-25}$ см 2 , $y_{Xe_{nr}^i} = 22,8\%$.

Поток нейтронов может быть определен при помощи детекторов треков осколков деления, облучаемых вместе с исследуемым материалом.

Если вместе с исследуемым минералом облучен в ядерном реакторе эталонный образец с заранее известным содержанием Xe_s , определенным, например, методом изотопного разбавления (1), и если возраст эталонного

образца (t_s) определен по соотношению Xe_s/U , формула для расчета возраста исследуемого минерала приобретает вид:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[1 + (e^{\lambda_{238} t_s} - 1) \frac{Xe_s^i}{Xe_{nr}^i} \left(\frac{Xe_{nr}^i}{Xe_s^i} \right)_0 \right]. \quad (5)$$

Следовательно, отпадает необходимость использования не только абсолютных концентраций Xe и U, но также потока нейтронов $\bar{\Phi}$.

Соотношение Xe_s/Xe_{nr} может быть найдено по соотношению двух каких-нибудь изотопов ксенона благодаря различию изотопного состава ксенона — продукта спонтанного деления U^{238} и продукта деления U^{235} нейтронами (1). Наименьшая погрешность обеспечивается при использовании

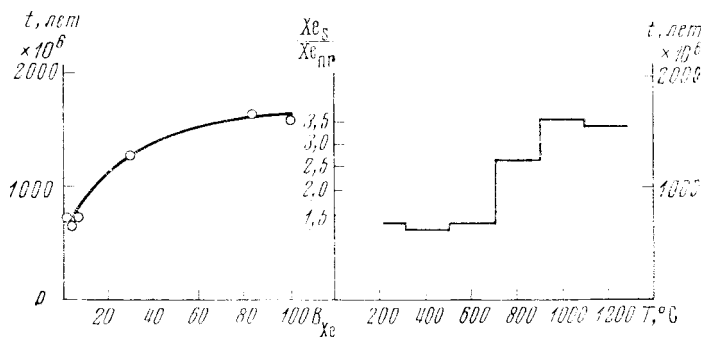


Рис. 1. Зависимость вычисленного возраста t и соотношения спонтанного (Xe_s) и индуцированного (Xe_{nr}) компонентов от кумулятивного выхода Xe_s из минерала (B_{Xe}) и от температуры отжига для уранинита

соотношения Xe^{136}/Xe^{134} , Xe^{134}/Xe^{131} , Xe^{132}/Xe^{131} . Поправка на природный нейтронно-индуцированный ксенон может быть сделана по Xe^{129} , не образующемуся в ядерном реакторе.

Первая экспериментальная проверка нейтронно-активационного ксенон-уранового метода. Два настурана палеозойского возраста и два докембрийских уранинита вместе с тремя детекторами нейтронного потока (синтетический флогопит) были облучены в ядерном реакторе. Предварительно на детекторы было нанесено точно отмеренное количество урана. После облучения детекторы были протравлены в HF для определения числа треков осколков деления. Вычисленный по числу треков поток тепловых нейтронов был $(0,801 \pm 0,059) \cdot 10^{16}$ п.см $^{-2}$.

Ксенон из навесок минералов весом 30–50 мг выделяли при температуре 200–1400° С. «Слепой опыт» вакуумной установки не превышал $5 \cdot 10^{-12}$ см 3 ксенона. Изотопный анализ проводили на модернизированном масс-спектрометре МИ-1305 в статическом вакуумном режиме. Возраст минералов был рассчитан по формуле (4) и с использованием полученных экспериментальных данных (табл. 1).

Для двух палеозойских образцов полученные значения возраста согласуются с результатами более ранних определений калий-аргоновым (по слюдам) и изотопным уран-торий-свинцовым (по цирконам, ортитам, монацитам, гадолиниту) методом (2). Это указывает на возможность определения возраста настуранов предлагаемым методом.

Для двух докембрийских уранинитов вычисленный по отношению Xe_s/Xe_{nr} возраст значительно меньше действительного из-за потери части радиогенного ксенона в ходе геологической истории минералов. Однако предлагаемый метод позволяет датировать и такие минералы, благодаря наличию нескольких энергетических положений атомов ксенона в кристаллической структуре минералов (1). При ступенчатом отжиге минера-

Изотопный состав ксенона и возраст минералов

Объект исследования	$\frac{Xe^{136}}{Xe^{131}}$	$\frac{Xe^{134}}{Xe^{131}}$	$\frac{Xe^{132}}{Xe^{131}}$	$\frac{Xe^{128}}{Xe^{131}}$	$\frac{Xe_s}{Xe_{nr}}$	Возраст, млн лет	
						по формуле (4)	по данным К/Аг и Рb/U методов (2)
Настуран Г-1	3,31	3,53	2,14	0,11	0,529±0,004	309±5	200—350
Настуран Г-3	2,95	3,33	2,00	0,05	0,457±0,029	236±15	200—350
	3,14	3,29	1,96	0,02	0,461±0,036		
Уранинит *	6,47	5,85	3,85	0,02	0,459±0,032	1392±15	1950±50
Уранинит	4,70	4,53	2,89	0,14	3,07±0,03	771±8	1950±50
Спонтанное деление U ²³⁸ (1)	12,17	10,05	7,05	0,024	—	—	—
Деление U ²³⁵ медленными нейтронами	2,185	2,692	1,498	(0,31)	—	—	—
Атмосфера	0,418	0,492	1,270	1,248	—	—	—

* Из того же района, что и уранинит на рис. 1. Второй образец в таблице — из другого местонахождения.

лов наблюдается разделение спонтанного и нейтронно-индуцированного компонента ксенона (рис. 1). В низкотемпературных фракциях наблюдается дефицит Xe_s , утраченного в ходе геологической истории минерала. Высокотемпературные фракции газа отвечают более высокому соотношению Xe_s/Xe_{nr} .

В результате нарушения кристаллической структуры уранинит утратил значительную часть радиогенных газов: 99,9% He, 67% Kr, 30% Xe. Однако даже и для такой структуры пологий участок кривой зависимости t от кумулятивного выхода Xe_s (температуры) соответствует возрастному значению ($160 \cdot 10^6$ лет), лишь на 18% меньшему действительного возраста минерала. Это позволяет надеяться, что датирование предлагаемым методом разнообразных минералов с менее нарушенной структурой (фосфатов, танталониобатов, силикатов, содержащих уран) даст вполне удовлетворительные результаты.

Институт геологии и геохронологии докембрия
Академии наук СССР
Ленинград

Поступило:
10 I 1977

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Ю. А. Шуколюков, Деление ядер урана в природе, М., 1972. ² Каталог определений возраста горных пород СССР радиологическими методами. Средняя Азия, Н. И. Полевая, Е. А. Худобина (ред.), Л., 1972.