

## О поисках и идентификации следов осколков спонтанного деления ядер сверхтяжелых элементов в природных минералах

МУРТАЗАЕВ Х., ПЕРЕЛЫГИН В. П.

Поиски эффекта спонтанного деления сверхтяжелых элементов методом диэлектрических детекторов были впервые предприняты еще в 1968 г. [1] и в дальнейшем проводились многими исследователями в разных странах [2—9]. Общим подходом была попытка обнаружить избыточное число актов спонтанного деления атомных ядер, которые не могли быть обусловлены спонтанным делением микропримесей урана в исследуемых образцах. При этом концентрацию урана измеряли методом нейтронно-активационного анализа с применением трекового метода; возраст образцов детекторов был либо известен, либо для минералов определен калий-аргоновым методом [4, 5].

В некоторых образцах хрусталика XVIII—XIX вв. и свинцовых стеклах была обнаружена значительная избыточная плотность следов осколков деления ядер [4, 3]. Однако при прямом измерении вероятности деления ядер свинца под влиянием космического излучения [6] полученное значение ( $15 \pm 4$ ) делений на грамм в год, что в большинстве случаев объясняло эффект, наблюдаемый в стеклах. Избыточная плотность треков спонтанного деления была обнаружена также в биотите из Танзании [5], в слюдах Северной Америки [7], на контактах полевых шпатов с веществом конкреций [2] и кристаллов кварца с окисленными включениями пирита [5]. Эти образцы находились глубоко под землей или на глубине до 5 км в Тихом океане, что, очевидно, исключало заметный вклад от космического излучения. Однако наблюдаемый эффект мог быть обусловлен миграцией урана из поверхностей контакта в конкрециях и в контактах кварца с окисленным пиритом либо по трещинам спайности в слюдах — мусковите, биотите [5, 6].

Одним из существенных недостатков этого метода поиска сверхтяжелых элементов является его относительно невысокая чувствительность. Действительно, для надежного обнаружения эффекта число треков спонтанного деления сверхтяжелых ядер должно по крайней мере

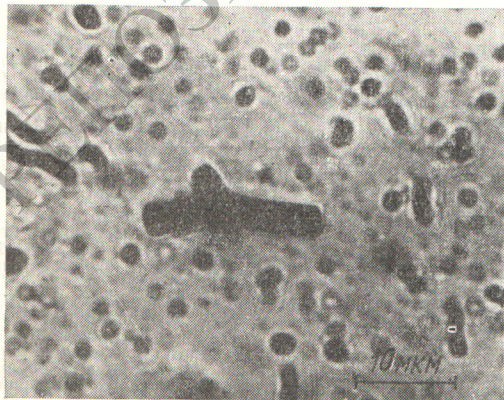
равняться числу треков спонтанного деления ядер урана в образце. Это означает, что регистрация актов спонтанного деления в образцах, содержащих  $10^{-6}$  —  $10^{-7}$  г/г урана, позволяет получить верхнюю границу концентрации сверхтяжелых элементов на уровне  $10^{-12}$  —  $10^{-13}$  г/г.

В связи с этим были предприняты попытки повысить чувствительность поисков спонтанно делящихся сверхтяжелых элементов. Одним из наиболее перспективных путей такого повышения чувствительности явилось использование нейтронных счетчиков совпадений, позволяющих идентифицировать сверхтяжелые ядра по множественности нейтронов, испускаемых при спонтанном делении [12]. Чувствительность этой методики при поисках сверхтяжелых элементов до  $10^{-14}$  —  $10^{-15}$  г/г. С помощью ее был надежно установлен эффект спонтанного деления неизвестного элемента в метеоритах типа углистых хондритов [12] и в гидротермах с полуострова Челекен [13, 14].

Другие попытки идентификации сверхтяжелых элементов основывались на предположении, что средняя длина треков осколков спонтанного деления таких ядер в твердых диэлектриках на 20% больше, чем длина треков осколков деления ядер актиноидов. Однако образцы минералов (полевые шпаты) из метеоритов, исследованные в работах [15, 16], содержали наряду с треками осколков деления ядер также значительное количество следов от космических ядер группы железа, создающих в полевых шпатах треки длиной до 25 мкм. Отметим, что в кристаллах авгита из метеорита Ангра дос Рейс [17], а также в кристаллах виллохита из метеорита Бьюрболе [18] в спектре длин осколков деления наблюдалась только одна группа длиной 16—17 мкм.

Предпринятая в настоящей работе попытка поиска сверхтяжелых элементов основывается на предположении, что такие ядра будут испытывать спонтанное деление на три осколка сравнимой массы с вероятностью, большей по крайней мере на два порядка, чем ядра  $^{238}\text{U}$ . Эта возможность поиска и идентификации деления сверхтяжелых элементов детально обоснована в работе [18]. Действительно, согласно данным, приведенным в работе [19], вероятность спонтанного деления ядер урана на три осколка сравнимой массы составляет  $\leq 10^{-6}$  вероятности двойного деления. С другой стороны, экстраполяция отношений вероятности  $P_{3f}/P_{2f}$  для составных ядер с  $Z = 108 \div 110$ , образованных в реакциях  $^{40}\text{Ar} + \text{Th}$ ,  $^{40}\text{Ar} + \text{U}$ , в область малых энергий возбуждения показывает [18], что для основных состояний сверхтяжелых ядер вероятность спонтанного деления на три осколка по отношению к двойному делению должна быть  $\geq 10^{-4}$ .

Таким образом, имеется возможность идентификации эффекта спонтанного деления сверхтяжелых ядер по наблюдению трехлучевых событий в минералах земного и внеземного происхождения. Благодаря повышенной вероятности тройного деления сверхтяжелых ядер, чувствительность метода по крайней мере на два порядка выше, чем в опытах, связанных с поиском избыточной плотности треков спонтанного деления. Кроме того, этот метод поиска не требует независимых измерений абсолютного возраста образца. В настоящей работе в качестве



Р и с. 1. Фотография трехлучевого события, обнаруженного в слюде мусковит из Восточной Сибири. Один из треков выходит на поверхность слюды.

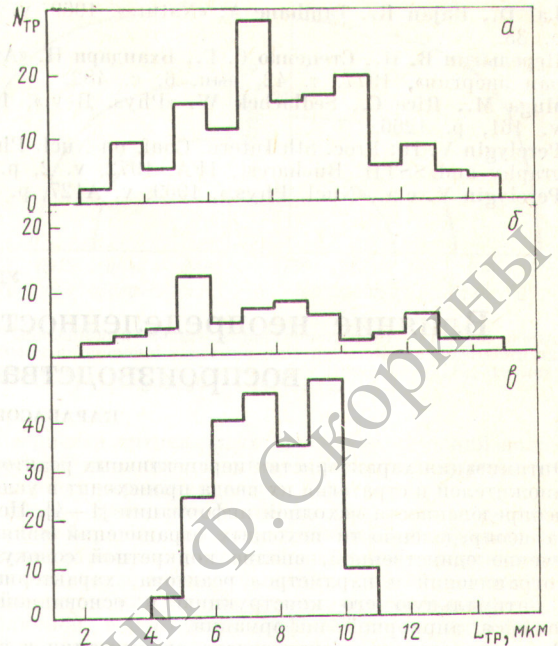
объекта поиска трехлучевых событий спонтанного деления гипотетических сверхтяжелых ядер были выбраны слюды—мусковиты и биотиты из различных месторождений.

Мусковиты подвергались травлению в 48%-ной плавиковой кислоте в течение 1 ч при 20 °С, биотиты — в 10%-ной плавиковой кислоте в течение 20 мин при той же температуре. Для дальнейших исследований было отобрано два образца мусковита из Восточной Сибири и из Индии с плотностью треков  $3,70 \cdot 10^3$  и  $0,50 \cdot 10^3$  на  $1 \text{ см}^2$  соответственно и биотит Мамского месторождения, содержащий  $2,80 \cdot 10^3$  треков на  $1 \text{ см}^2$ . Отобранные слюды расщепляли по плоскостям спайности на пластинки толщиной 20—40 мкм, протравливали и просматривали под микроскопом с обеих сторон одновременно. Проводился поиск трехлучевых событий с длиной треков  $L \geq 2 \text{ мкм}$  и с углами  $\varphi$  между треками  $15^\circ \leq \varphi \leq 175^\circ$ , что позволяло исключить эффект случайных наложений одиночных треков. Суммарная площадь просмотра слюды (мусковит из Мамского месторождения), содержащей  $3,70 \cdot 10^3$  треков на  $1 \text{ см}^2$ , составила  $45 \text{ см}^2$ , что соответствует  $3,2 \cdot 10^5$  треков длиной выше 10 мкм; для слюды, содержащей  $0,50 \times 10^3$  треков на  $1 \text{ см}^2$  (слюда из Индии), просмотренная площадь составила  $87 \text{ см}^2$ , что соответствует  $7,5 \cdot 10^4$  треков. В образце слюды (Восточная Сибирь) было обнаружено два трехлучевых трека (рис. 1), удовлетворяющих перечисленным выше критериям. Как видно из этого рисунка, один из треков выходит на поверхность слюды. В слюде из Индии таких треков не было обнаружено. Найденные трехлучевые треки могли быть обусловлены уругим взаимодействием одного из осколков деления с ядрами элементов с  $Z \geq 12$  (например, Ag, K, Ca, Fe), содержащихся в слюде [20].

Дискриминация событий упругого рассеяния осколков спонтанного деления урана на ядрах элементов матрицы детекторов может быть проведена по измерению длины следов всех трех треков. Действительно (рис. 2), средняя длина следов осколков двойного и тройного деления составных ядер с  $Z = 108 \div 110$  примерно одна и та же и превосходит приблизительно на 10% среднюю длину следов осколков деления ядер актиноидов [24]. Трехлучевые события, образованные за счет упругого рассеяния осколков деления урана, имеют среднюю длину треков несколько меньшую, чем треки осколков деления ядер на два осколка [22]. Однако в рассмотренном случае оба зарегистрированных события имели один трек, вышедший на поверхность слюды, что делало невозможным идентификацию по травимой длине. Для отношения вероятности двойного и тройного деления в слюдах можно установить только верхнюю границу на уровне  $P_{3f}/P_{2f} \leq 1 : 7,5 \cdot 10^4$ .

Приведенные в настоящей работе предварительные результаты поиска эффекта тройного деления сверхтяжелых элементов позволяют установить новое значение нижней границы распространенности сверхтяжелых ядер в исследуемых образцах на уровне чувствительности, по крайней мере на порядок превосходящее достигнутое ранее трековыми методами. Действительно, содержание урана в слюде из Восточной Сибири составляет около  $3 \cdot 10^{-8} \text{ г/г}$ ,  $P_{3f}/P_{2f} \leq 1,3 \cdot 10^{-5}$ , отсюда верхняя граница концентрации сверхтяжелых элементов в этом образце  $\leq 4 \cdot 10^{-15} \text{ г/г}$ .

Для дальнейших исследований целесообразно выявлять следы тройного деления, полностью заключенные в объеме детектора, чтобы иметь возможность измерять все параметры таких трехлучевых событий, как распределение длин треков и азимутальных углов между ними. Для слюды и других минералов с весьма совершенной спайностью может быть применена процедура частичного расщепления образца с последующим травлением и просмотром поверхности контакта. В других природных кристаллах треки в объеме диэлектрика могут быть выявлены путем создания искусственных трещин, например при воздействии сфокусированного лазерного излучения [23].



Р и с. 2. Распределение длины следов осколков деления ядер, образованных при взаимодействии 300-МэВ ионов  $^{40}\text{Ca}$  (а) и  $^{40}\text{Ag}$  (б) с  $^{238}\text{U}$ , и следов осколков спонтанного деления  $^{244}\text{Cm}$  (в) в слюде мусковит. Режим отжига и травления одинаков для всех образцов [5, 22]

В заключение авторы выражают глубокую благодарность С. Г. Стеценко и Д. Лхагвасурэну за помощь в работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флеров Г. Н., Перельгин В. П. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 6, с. 520.
2. Отгонсурэн О., Перельгин В. П., Флеров Г. Н. «Докл. АН СССР», 1969, т. 189, с. 1200.
3. Цесьяк Э. Сообщение ОИЯИ, P15-4738. Дубна, 1969.
4. Price P., Fleischer R. «Phys. Lett.», 1970, v. 30B, p. 246.
5. Отгонсурэн О. и др. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 4, с. 344.
6. Флеров Г. Н., Перельгин В. П., Отгонсурэн О. «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 6, с. 979.
7. Miller D. «Earth. Planetary Sci. Lett.», 1968, v. 4, p. 379.
8. Флеров Г. Н. Сообщение ОИЯИ, P7-11097. Дубна, 1978.
9. Herrman C. «Intern. Rev. Sci., Inorganic Chemistry», v. 8, ser. 2, ed. by A. Maddock. Butterworth, London, 1975, p. 221.
10. Флеров Г. Н. и др. «Ядерная физика», 1974, т. 21, с. 472.
11. Маслов О. Д. и др. Сообщение ОИЯИ, P6-8266. Дубна, 1974.
12. Звара И. и др. Препринт ОИЯИ, P6-10589. Дубна, 1972.
13. Чубурков Ю. Т. и др. «Радиохимия», 1974, т. 16, с. 827.
14. Тер-Акопьян Г. М. Сообщение ОИЯИ, Д7-10129. Дубна, 1977.
15. Bhandari N. e.a. «Nature», 1971, v. 230, p. 219.
16. Fleischer R., Price P., Walker R. Nuclear Tracks in Solids. Principles and Application. Univ. California Press, Berkeley, 1975.

17. Lal D., Rajan R., Tamhane A. «Nature», 1969, v. 224, p. 33.
18. Перельгин В. П., Стеценко С. Г., Бхандари Н. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 6, с. 482.
19. Muga M., Rice C., Sedlachek W. «Phys. Rev.», 1967, v. 161, p. 1266.
20. Perelygin V. In: Proc. 8th Intern. Conf. on Nucl. Photography and SSTD. Bucharest, IFA, 1972, v. 2, p. 27.
21. Perelygin V. e.a. «Nucl. Phys.», 1969, v. A127, p. 577.
22. Medveczky L., Somogyi C. In: Proc. of the First Intern. Conf. on Nuclear Track Registration in Insulating Solids. Univ. Clermont Press, 1969, v. 2, p. 65.
23. Лхагвасурэн Д. и др. Доклад на Международном совещании по взаимодействию тяжелых ионов с ядрами и синтезу новых элементов. Дубна, 13—16 декабря 1977.

Поступило в Редакцию 08.01.79  
В окончательной редакции 24.01.80

УДК 621.039.526

## Влияние неопределенности ограничений на оптимизацию воспроизводства в быстрых реакторах

КАРАБАСОВ А. С., УСЫНИН Г. В.

Таблица 1

Оптимизация характеристик перспективных реакторов-размножителей и стратегии их ввода происходит в условиях неопределенности исходной информации [1—4]. Целью учета неопределенности исходных ограничений является получение единственной, вполне конкретной совокупности ограничений и параметров реактора, характеризующей оптимальную его конструкцию и основанной на имеющейся априорной информации.

Исходная стохастическая задача оптимизации в вероятной постановке формулируется следующим образом: найти  $\max_x P \{f_0(x, \omega) \leq 0\}$

$$\text{при условии } P \{f_i(x, \omega) \leq 0\} \geq 1 - \gamma_i; \quad (1)$$

$$i = \overline{1, m}; \quad 1 > \gamma_i > 0.$$

Здесь  $x$  — вектор оптимизируемых параметров;  $\omega$  — вектор параметров исходных ограничений;  $f_0(x, \omega)$  — целевая функция;  $f_i(x, \omega)$  — функция ограничений;  $P\{f \leq 0\}$  — вероятность выполнения условия  $f \leq 0$ .

В оптимизационных реакторных задачах практически всегда удается выделить детерминистические части функций исходных ограничений. Исходная задача (1) сводится к следующей задаче:

$$\text{найти } \min_x g_0(x)$$

при условии

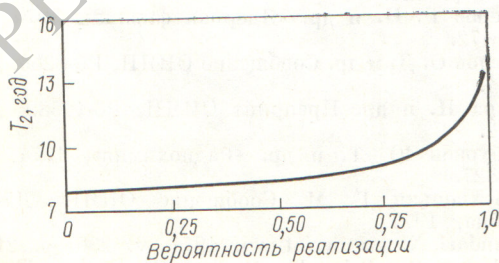
$$g_i(x) \leq y_i; \quad i = \overline{0, m}; \quad g_i(x) = m_i / \sqrt{d_i(x)}, \quad (2)$$

где  $m_i$  — математическое ожидание функции  $f_i(x, \omega)$ ;  $d_i(x)$  — ее дисперсия.

Значения  $y_i$  определяются из равенства  $\gamma_i = W_i(y_i)$ ;  $i = \overline{1, m}$ , где  $W_i(y_i) = P\{g_i(\omega) < y_i\}$  — функция распределения случайной величины

$$g_i(\omega) = \frac{f_i(x, \omega) - m_i(x)}{\sqrt{d_i(x)}}.$$

При решении оптимизационной задачи в такой постановке существенно, что заданная вероятность выполнения исходных ограничений достигается не на консервативном



Р и с. 1. Зависимость времени удвоения от вероятности реализации ограничений

Значения исходных ограничений

Параметр	Ограничения	Стандартное отклонение [6]	Уровень исходных ограничений		
			консервативный	математического ожидания	вероятностный (95%)
Толщина оболочки твэлов, мм	Снизу	0,013	0,35	0,4	0,367
Максимальная температура оболочки, °С	Сверху	10	660	700	675
Максимальная линейная мощность, Вт/см	»	16	480	550	510
Распухание стали, отн. ед.	Снизу	0,13	1	0,5	0,83
Теплопроводность зазора топливо — оболочка, ккал/(м <sup>2</sup> × ч × град)	Сверху	0,08	0,2	0,6	0,4
Средний подогрев теплоносителя, °С	»	8	170	200	180
Перепад давления в реакторе, кгс/см <sup>2</sup> *	»	0,6	5	7	5,5
Критическая масса плутония, отн. ед.	Снизу	0,01	1	0,96	0,985
Коэффициент воспроизводства, отн. ед.	Сверху	0,02	0,9	0,97	0,915
Вероятность реализации уровня, %	—	—	100	0,2	95

\* 1 ккал = 4,1868 Дж; 1 кгс/см<sup>2</sup> = 98066,5 Па.