

УДК 537.591

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА ЯДЕР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ТРЕКАМ В КРИСТАЛЛАХ ОЛИВИНА ИЗ МЕТЕОРИТОВ

А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров, Л. А. Гончарова, А. И. Ивлиев¹,
Г. В. Калинина¹, Л. Л. Кашкаров¹, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева,
Н. Г. Полухина, А. С. Русецкий, Н. И. Старков, В. А. Царев

Приводится описание методики идентификации заряда ядер космических лучей, основанной на измерении длины и средней скорости травления треков, химически протравливаемых в кристаллах оливина из палласита Марьялахти.

Регистрация тяжелых и сверхтяжелых ядер в составе космических лучей и поиск среди них трансфермиевых ядер с $Z \geq 110$ принадлежит к числу наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики [1]. Самые ранние эксперименты по поиску таких ядер были проведены около 40 лет назад с использованием толстых слоев ядерной эмульсии, экспонируемой в высоких слоях атмосферы на шаразондах [2]. Применялись также многослойные детекторы из полимерных материалов в сочетании с черенковскими детекторами [3]. Недостатком таких экспериментов является малое время экспозиции детекторов, что при небольшом потоке изучаемых частиц позволяет только дать оценку верхней границы их наличия. В связи с этим в ОИЯИ под руководством Г.Н. Флерова были развернуты работы по поиску треков сверхтяжелых ядер космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов. Была разработана эффективная методика выявления треков путем отжига и травления образцов. Среди выявленных треков ядер с $Z \geq 60$ около 150 было отнесено к трекам ядер группы урана. Был также обнаружен след длиной 364 мкм, который, возможно, является треком ядра с $Z \geq 110$ [4].

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН.

Используемая в этих работах ручная обработка кристаллов оливина осуществлялась очень медленно, что приводило к низкой производительности. В настоящее время исследования треков ядер в кристаллах оливина из метеоритов выполняются совместно группами из ФИАН и ГЕОХИ РАН с использованием современного высокоэффективного Полностью Автоматизированного Измерительного КОМПлекса (ПАВИКОМ) [5]. ПАВИКОМ был создан в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН для обработки данных эмульсионных и твердотельных трековых детекторов, используемых в ядерной физике и физике высоких энергий. В настоящее время комплекс успешно используется группами из многих институтов России (ОИЯИ, ИТЭФ, НИИЯФ МГУ и др.).

В данной работе приводится описание методики идентификации заряда ядер космических лучей, основанной на измерении длины и средней скорости травления треков, химически протравливаемых в кристаллах оливина из палласита Марьялахти. В отличие от работ, проводимых В.П. Перелыгиным [4], нами разработана новая методология исследования, основанная на следующем: (1) химическое травление треков проводится без предварительного термического отжига кристаллов; (2) измерения динамических и геометрических параметров треков в процессе их последовательного, поэтапного травления проводятся с высокой точностью на ПАВИКОМ; (3) регистрация и измерение треков проводятся по всему объему каждого кристалла (средний размер каждого 2–3 мм), что многократно увеличивает статистику регистрируемых следов торможения ядер сверхтяжелых элементов космических лучей.

Механизм образования видимого трека в кристаллах. При торможении в твердом веществе заряженные частицы (ядра, ионы) в основном теряют свою энергию в результате взаимодействия с электронами и с ядрами атомов тормозящей среды. Преобладающим является процесс ионизации атомов мишени, в результате которого в кристалле вдоль следа торможения частицы образуется зона повреждения кристаллической решетки, не наблюдаемая визуально (аналог скрытого изображения в эмульсиях). При химической обработке специальными растворами (травление) из зоны повреждения удаляется радиационно-нарушенное вещество кристаллической решетки и возникают пустоты в виде каналов, которые можно наблюдать с помощью оптического микроскопа. Геометрические характеристики образованных каналов связаны с ионизационными потерями и несут информацию о заряде частицы.

Одна из методик идентификации треков частиц, наблюдаемых в кристаллах силикатных минералов, в частности, оливина из метеоритного и лунного вещества, основана

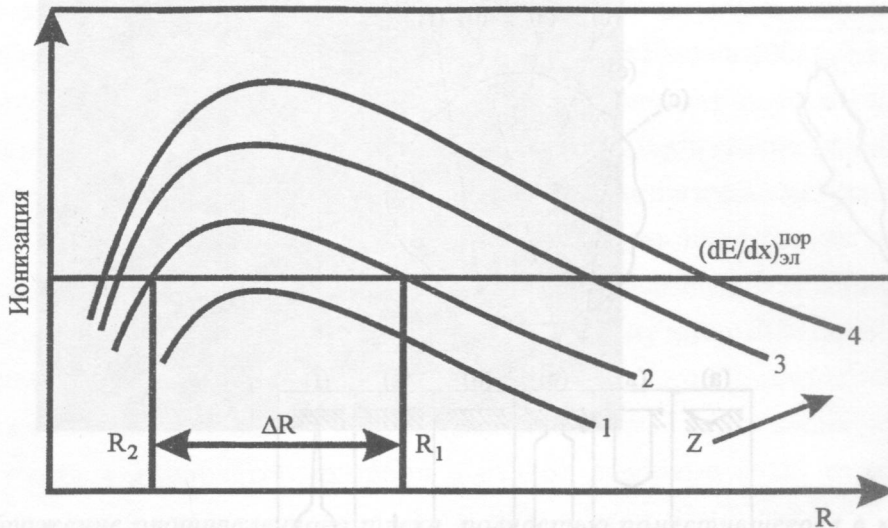


Рис. 1. График определения полной травимой длины трека.

вается на концепции измерения полной травимой длины трека [6]. При этом используется тот факт, что каждый трековый детектор имеет порог ионизации, ниже которого химически травимые треки не регистрируются. На рис. 1 приведены кривые ионизационных потерь частиц с разными зарядами ($Z_1 < Z_2 < Z_3 < Z_4$). Горизонтальная линия отмечает порог ионизации ($(dE/dx)_e^{th}$), ниже которого частица не образует травимого трека и, следовательно, не регистрируется. На рис. 1 этому условию, например, отвечает частица с кривой ионизации под номером 1.

Частица, ионизационные потери которой описываются кривой 2, образует трек небольшой протяженности; при ее замедлении скорость ионизации при некотором значении остаточного пробега R_1 превосходит, а, начиная с R_2 , спадает ниже порогового значения. Разность этих значений и определяет «полную травимую длину» трека $\Delta R = R_1 - R_2$. По мере роста заряда величина остаточного пробега растет (кривые 3 и 4) и соответственно, как видно из рисунка, увеличивается полная травимая длина трека.

Особенностью травления треков в кристаллах является то, что эффективность удаления вещества из канала формирования трека или скорость травления трека постоянна и зависит как от участка травления вдоль полной длины трека, так и от протравленной длины, при которой происходит дальнейшее травление трека. Кроме того, скорость травления изменяется для ядер с разным зарядом. Поэтому, согласно принятой нами методологии, травление и измерение параметров треков осуществляют-

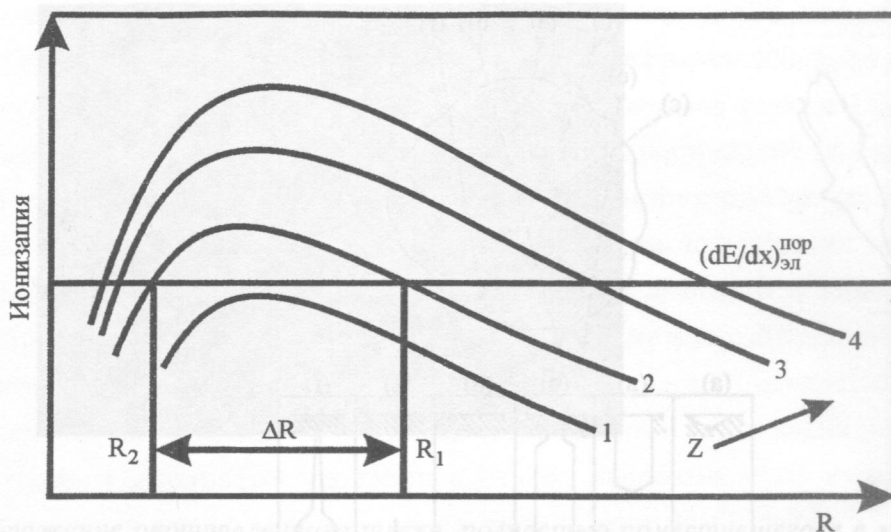


Рис. 1. График определения полной травимой длины трека.

вается на концепции измерения полной травимой длины трека [6]. При этом используется тот факт, что каждый трековый детектор имеет порог ионизации, ниже которого химически травимые треки не регистрируются. На рис. 1 приведены кривые ионизационных потерь частиц с разными зарядами ($Z_1 < Z_2 < Z_3 < Z_4$). Горизонтальная линия отмечает порог ионизации $((dE/dx)_e^{th})$, ниже которого частица не образует травимого трека и, следовательно, не регистрируется. На рис. 1 этому условию, например, отвечает частица с кривой ионизации под номером 1.

Частица, ионизационные потери которой описываются кривой 2, образует трек небольшой протяженности; при ее замедлении скорость ионизации при некотором значении остаточного пробега R_1 превосходит, а, начиная с R_2 , спадает ниже порогового значения. Разность этих значений и определяет “полную травимую длину” трека $\Delta R = R_1 - R_2$. По мере роста заряда величина остаточного пробега растет (кривые 3 и 4) и соответственно, как видно из рисунка, увеличивается полная травимая длина трека.

Особенностью травления треков в кристаллах является то, что эффективность удаления вещества из канала формирования трека или скорость травления трека непостоянна и зависит как от участка травления вдоль полной длины трека, так и от протравленной длины, при которой происходит дальнейшее травление трека. Кроме того, скорость травления изменяется для ядер с разным зарядом. Поэтому, согласно принятой нами методологии, травление и измерение параметров треков осуществляют-

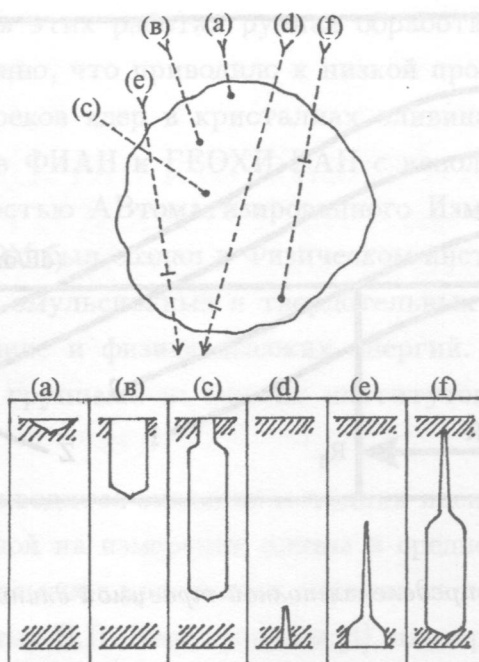


Рис. 2. Возможные варианты торможения тяжелых ядер в кристалле оливина. (a) – Конечный участок пробега иона перед его остановкой; (b) – Наиболее эффективно растравливаемая основная зона трека; (c) – Травление основной зоны трека через узкий конусообразный участок; (d) – Часть конуса начального высокоэнергетического участка зоны формирования трека; (e) – Полностью зафиксированная конусообразная часть с переходным участком основной зоны трека; (f) – Начальная и конечная границы зоны формирования химически протравливаемого трека находятся внутри объема кристалла.

ся поэтапно с промежуточным удалением с помощью шлифовки слоя толщиной не более 50 мкм.

Из сказанного видно, что для решения поставленной задачи – определения заряда прошедшей через кристалл частицы, необходимо тщательно проработать методику травления и алгоритма интерпретации результатов.

Условия травления треков. С целью выбора наиболее оптимальных условий травления длиннопробежных ($L \geq 30$ мкм) треков, образованных ядрами космических лучей с $Z \geq 28$, на основе методики, разработанной в [7], проведена серия экспериментов с изменением параметров раствора (pH -фактор и температура). Основной задачей при этом являлось получение максимально возможного превышения скорости растворения материала вдоль оси трека (V_{TR}) над скоростью удаления радиационно не нарушенно-



Рис. 3. Изображение протравленного трека, полностью помещившегося в кристалле (слева – микрофотография, справа – результат обработки изображения программой).

го вещества с поверхности кристалла (V_G). Скорость травления треков $V_{TR} = L/t$, где L – длина протравленного участка трека. Как показали наши эксперименты, время, необходимое для эффективного химического травления треков длиной до 200–300 мкм, составляет 48 час. Травление осуществляется в замкнутом объеме, в стандартных условиях [8]. Полученные данные указывают, что для протравленных треков длиной свыше 50 мкм величина отношения диаметра к протравленной на данном этапе длине трека D/L соответствует для наблюдаемых треков отношениям $V_{TR}/V_G = 300 - 400$. Таким образом, при травлении трека длиной до 1000 мкм суммарная величина поправки на его длину за счет стравливания поверхности оливина составляет 2–3 мкм.

Для зарегистрированных в исследуемых нами 15 кристаллах оливина около 300 треков с $L \geq 30$ мкм величина скорости V_{TR} лежит в пределах 0.3–10.9 мкм/час. Скорость травления треков V_{TR} является одним из основных параметров, с помощью которого проводится идентификация заряда ядер, поэтому при отработке методики травления треков особое внимание было уделено ее точному определению. Для этого было необходимо: (1) поддержание постоянства условий травления (химический состав, pH и температура травящего раствора); (2) прецизионное измерение геометрических параметров треков; (3) точное измерение толщины слоя оливина, удаляемого с его поверхности при шлифовке и полировке перед очередным этапом травления.

В реальных измерениях на определенных этапах травления кристаллов оливина наблюдаются в основном лишь отдельные участки частично или полностью протравлен-

ных треков. На рис. 2 схематически представлены возможные варианты торможения тяжелых ядер ($Z \geq 30$) из состава космических лучей в отдельном кристалле оливина размером $\sim 1-2$ мм. Они различаются энергией, которой обладают ядра при пересечении поверхности кристалла на входе (E_{in}) или выходе (E_{out}), а также в разных точках вдоль трека. В зависимости от варианта торможения образующиеся треки различаются между собой по характерной геометрической форме, причем этот эффект наблюдается как при травлении исходной поверхности кристалла, так и на последующих этапах.

Очевидно, что только при реализации вариантов (f), (c) и (e) можно получать наиболее точные и полные данные о скорости травления и геометрических параметрах треков с последующей идентификацией заряда ядер. Полная окончательная форма треков (тип f) может быть выявлена только в процессе поэтапного, многоступенчатого удаления тонких слоев (30–50 мкм) с протравленной поверхности и последующего травления вновь вскрываемых участков кристалла.

Для просмотра и измерения длиннопробежных треков с $L \geq 100 - 200$ мкм от следов торможения более тяжелых ($Z \geq 40 - 50$) ядер так же, как и в случае травления, потребовалась разработка специальных методик поэтапного исследования кристаллов оливина. При этом, поскольку необходимо измерить полные длины треков, возникает проблема поиска продолжения каждого из ранее зафиксированных треков после очередного этапа шлифовки и травления кристалла. Использование комплекса ПАВИКОМ, как подтвердили проведенные нами методические исследования, дает возможность проведения процедуры “сшивания” треков, а также обеспечивает заметное увеличение как скорости обработки материала, так и точности и надежности измерений по сравнению с визуальным просмотром треков.

На рис. 3 приведено изображение одного из протравленных в оливине треков, отсканированного по глубине кристалла и выведенного затем в горизонтальную плоскость с помощью специально разработанной программы. На фотографии виден трек с характерной (в виде шприца) геометрической фигурой, полностью поместившийся в кристалле, что позволило проводить измерения практически всех его параметров. Существенным является то, что геометрически трек состоит из “основной” и конусообразной частей. Вычислительная программа, обеспечивающая измерения геометрических параметров треков на ПАВИКОМ с точностью до ~ 1 мкм, позволяет проводить анализ геометрической формы треков по всей травимой длине L_{Σ} – от поверхности травления кристалла до конечной, наблюдаемой на каждом этапе измерения, точки.

Исходя из характера кривых зависимости потерь энергии $(dE/dx)_e$ от энергии (E) и длины пробега (R) тормозящихся частиц (детали этих расчетов приведены ниже), нами была проведена оценка величин ожидаемых длин основных участков (L_{base}) протравливаемых треков для ядер с $Z \geq 30$. Результаты расчетов, проведенных для ядер Zn, Kr, Ag и Xe, приведены в табл. 1. Расчеты основаны на экспериментально определенной для ядер Fe величине L_{base} , отвечающей основному участку трека в зоне торможения ядра железа при $(dE/dx)_e \geq (dE/dx)_{e,\text{cr}}$.

Как видно из приведенных в таблице 1 данных, для ядер Fe отношение $L_{\text{base}}/L_{\Sigma} \approx 0.2$. Значения L_{base} для более тяжелых ядер были получены в предположении, что это соотношение для них сохраняется.

Т а б л и ц а 1

Длина химически травимой основной зоны треков от ядер тяжелых элементов в кристаллах оливина $(Mg_{0.88}, Fe_{0.12})_2SiO_4$ из палласита Марьялахти

Ядра (Z)	$E_{\text{max}} - E_{\text{min}}$ (*) МэВ	$R_{\text{max}} - R_{\text{min}}$ (**) мкм	L_{Σ} (***) мкм	L_{base} (****) мкм
Fe (26)	610–10.5	80–3.1	77	15±1
Zn (30)	1050–10.5	130–3.1	127	25
Kr (36)	2400–13.4	275–3.8	271	55
Ag (47)	6400–14.2	700–3.8	696	140
Xe (54)	11800–28	1260–3.4	1257	250

(*) Интервал ($E_{\text{max}} - E_{\text{min}}$) соответствует $(dE/dx)_{e,\text{cr}} \sim 18 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ [9];

(**) Длины пробега ядер, соответствующие значениям ($E_{\text{max}} - E_{\text{min}}$);

(***) Полная длина химически протравливаемых треков;

(****) Протравливаемая длина основной зоны треков.

Первые результаты идентификации заряда ядер по трекам в оливине. При поэтапном исследовании 15-ти кристаллов оливина из метеорита Марьялахти с применением модифицированной методики травления и измерения скорости травления треков, усредненной за время 48 часов (продолжительность травления в течение одного этапа) было выявлено более 300 треков с длиной $L \geq 30$ мкм, относящихся к ядрам VVH-группы ($Z \geq 36$). Результаты этих измерений приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Оценка заряда ядер по наблюдаемой длине треков и средней скорости их травления в кристаллах оливина из палласита Марьялахти

Интервал по зарядам Z	Число ядер (*)	Ядра с $Z > 50$ (**)
$Z > 60$	2	$Z = 67$ (2)
$Z = 50 - 60$	5	$Z = 51$ (1) $Z = 53$ (3) $Z = 55$ (1)
$Z = 45 - 50$	74	
$Z = 40 - 45$	213	
$36 < Z < 40$	32	

(*) Общее число VVN-ядер, зарегистрированных в объеме $\sim 1.1 \text{ мм}^3$, составило 326;

(**) В скобках указано число зарегистрированных для каждого заряда ядер.

Как видно из таблицы 2, среди этих треков обнаружено более 200 треков, длина которых $L \geq 150 \text{ мкм}$, что соответствует $Z \geq 40$. Для семи треков, длина только конусообразных участков которых превышает ~ 300 и $\sim 500 \text{ мкм}$, нижнее пороговое значение заряда ядер, образующих эти треки, составляет $Z \geq 50$ и $Z \geq 60$, соответственно.

Выводы. Проведенные в настоящей работе исследования и полученные предварительные результаты идентификации заряда ядер около 300 треков, наблюдаемых в 15-ти изученных к этому времени кристаллах оливина из метеорита Марьялахти, показали, что:

– определение заряда ядер, выполненное в первом приближении по измеренным, как правило, неполным величинам длины, а также усредненной за 48-ми часовый интервал травления скорости травления каждого трека, позволяет получить оценку лишь его нижнего порогового значения;

– дополнительное использование других, не менее важных количественных параметров треков, таких как скорость травления треков на их различных участках, а также диаметр основной и конической зон треков, позволит проводить более точную идентификацию заряда ядер. Методика применения этих параметров разрабатывается нами в настоящее время.

Исследования проводятся при поддержке РФФИ, грант N 06-02-16835.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. L. Ginzburg, "Physics and Astrophysics, A Selection of Key Problems" (Pergamon, New York, 1985); В.Л. Гинзбург, УФН **169**, 419 (1999).
- [2] P. H. Fowler et al., Proc. Roy. Soc. A **301**, (1967).
- [3] P. H. Fowler et al., Proc. 15th ICRC, Plovdiv, **11**, 165 (1977); E. K. Shirk, P. V. Price, Astrophys. J. **220**, 719 (1978).
- [4] В. П. Перелыгин, С. Г. Стеценко, Письма в ЖЭТФ **32**, 622 (1980); V.P. Perelygin et al., JINR Communication, 1985, E-7-85-247; V. P. Perelygin et al., Nucl. Tracks Radiat. Meas. **19**, 703 (1989); В. П. Перелыгин, С. Г. Стеценко, Письма в ЖЭТФ **49**, 257 (1989).
- [5] V. L. Ginzburg, N. G. Polukhina, E. L. Feinberg, N. I. Starkov, V. A. Tsarev, Doklady Physics **50**, N 6, 283 (2005).
- [6] D. J. Gore et al., Phys. Med. Biol. **23**, 149 (1978); I.D. Hutcheon et al., Proc. Fifth Lunar Sci. Conf. (Pergamon, New York, 1974), p. 2561; G. E. Blanford et al., Proc. Sixth Lunar Sci. Conf. (Pergamon, New York, 1974), p. 3557.
- [7] R. I. Petrova et al., Radiat. Meas. **25**, 329 (1995).
- [8] L. L. Kashkarov, G. V. Kalinina, A. I. Ivliev, N. G. Polukhina et al., Электронный научно-информационный журнал "Вестник Отделения наук о Земле РАН" N 1(24) (2006). URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2006/informbul-1-2006/planet-6e.pdf
- [9] P. Horn et al., Zeitschrift fur Naturforschung **22 a**, 1793 (1967).

Поступила в редакцию 25 апреля 2008 г.