

ПАРАМЕТРЫ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЗЕРНАХ ОЛИВИНА С РАЗНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ИЗ ПАЛЛАСИТА МАРЬЯЛАХТИ

*Н. М. Окатьева¹, А. Б. Александров¹, А. В. Багуля¹, М. С. Владимиров¹,
Л. А. Гончарова¹, А. И. Ивлиев², Г. В. Калинина², Л. Л. Кашкаров²,
Н. С. Коновалова¹, Н. Г. Полухина¹, А. С. Русецкий¹, Н. И. Старков¹*

¹ – Физический институт им. П. Н. Лебедева, г. Москва, *poluhina@sci.lebedev.ru*

² – Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, г. Москва, *leokash@mail.ru*

Введение. Оливин, содержание которого в палласитах составляет около 65 об. %, является одним из наиболее подходящих природных трековых детекторов, используемых при изучении химического состава тяжелых и сверхтяжелых элементов космических лучей по проекту ОЛИМПИА [Ginzburg et al., 2005]. В данном сообщении приводятся результаты исследования возможной зависимости параметров химически травимых треков от кристаллической структуры, а также от взаимной ориентации между направлениями следов торможения ядер и главных осей симметрии кристаллической решетки отдельных зерен оливина [Perron et al., 1988].

Образцы и методика исследования. Для изучения были взяты 10 зерен оливина размером (1–2) мм, выделенных из палласита Марьялахти и облученных ускоренными ядрами ¹³¹Xe с энергией 11.4 МэВ/нуклон на ускорителе тяжелых ионов (Дармштадт, Германия). Изучение проводилось по двум направлениям: для отобранных кристаллов исследовалась кристаллическая структура, и затем для этих кристаллов измерялись параметры травимых треков. Прецизионные измерения параметров треков проводились на высокоэффективном Полностью Автоматизированном Измерительном КОМПлексе (ПАВИКОМ) [Feinberg et al., 2004].

При изучении химического состава космических лучей, проводимого с помощью нового трекового метода [Кашкаров и др., 2006], идентификация заряда ядер, образующих треки в оливине метеоритов, осуществляется с использованием геометрических (травимая длина L и диаметр D) и динамических (скорость травления V) параметров треков. При этом рассматриваются две скорости травления треков V_T (травление длины) и V_D (травление диаметра), отношение которых в принятой методике $V_T/V_D \geq 200$ [Petrova et al., 1995].

Рентгено-структурный анализ кристаллов оливина. С целью определения кристаллической структуры и степени упорядоченности кристаллической решетки исследуемых кристаллов оливина из палласита Марьялахти для 10-ти образцов, облученных ускоренными ядрами ¹³²Xe, был проведен рентгено-структурный анализ. Измерения проводились на дифрактометре типа HZG-4 (Carl Zeiss, JENA) методом фокусирующей дифрактометрии в ИПТМ РАН [Егоров и др., 2008]. Использовались $K_{\alpha,\beta}$ -линии Mo, энергия рентгеновских лучей $E = 25$ кэВ; ток $I = 15$ mA. Кристаллы, площадки плоско полированных поверхностей которых составляли $(0.2-0.5) \cdot 10^{-2}$ см², устанавливались на дифрактометрическую приставку гониометра. Пучок рентгеновских лучей, проходящий через диафрагмирующие щели шириной 0.1 мм, направлялся под углом θ к анализируемой поверхности кристалла, вращающегося вокруг оси, перпендикулярной плоскости облучаемой поверхности. Путем измерения интенсивности отраженных под различными углами рентгеновских лучей устанавливается наблюдаемый набор пиков, характерных для той или иной текстуры исследуемых кристаллов. Результаты приведены в табл. 1, из которой видно, что пять образцов (№ 3–5, 7, 8), для которых зарегистрированы три пика (1, 2, 3) общего назначения с углом $\theta_{\alpha 1} = 15.23^\circ$ и характеристическим расстоянием между плоскостями симметрии $d = 1.3500$ Å, являются

монокристаллами. Три образца (№ 2, 6, 9) характеризуются правильной ориентацией микрокристаллитов в одном из кристаллографических направлений и хаотической их ориентацией в других направлениях, и два образца показали низкую степень монокристалличности (№ 1) и полностью поликристаллическую текстуру (№ 10).

Таблица 1

Ориентация и текстура кристаллов оливина из палласита Марьялахти

Образец	Излучение	Ориентация	Угол (*) $\psi = \omega - \theta $	Наблюдаемые (**) рефлексы	$(\Delta\theta/\theta)$	Текстура (***)
1	MoK _{αβ}	(020)	~0.7°	(020)	3·10 ⁻²	Низкая
2	MoK _{αβ}	(134)	~0.13°	(134)	8·10 ⁻³	Средняя
3	MoK _{αβ}	(020)	~0.2°	(020)	4·10 ⁻³	Высокая
4	CuK _{αβ}	(131)	<0.1°	(131)	1·10 ⁻³	Высокая
5	CuK _{αβ}	(101)	~3.6°	(101)	1·10 ⁻³	Высокая
6	CuK _{αβ}	(021)	~0.5°	(021)	2·10 ⁻³	Средняя
7	CuK _{αβ}	(002)	~3.1°	(004)	1.3·10 ⁻³	Высокая
8	CuK _{αβ}	(041)	~3.8°	(041)	1·10 ⁻³	Высокая
9	CuK _{αβ}	(112)	~13°	(112)	6·10 ⁻³	Средняя
10	CuK _{αβ}	—	—	—	—	Поликристалл

Примечания. (*) Модуль разницы между ω и θ ($\psi = |\omega - \theta|$) является углом отклонения кристаллографической плоскости кристалла от положения плоскости матрицы;

(**) Относительная интенсивность 100 %;

(***) Степень монокристалличности структуры.

Характеристики треков для кристаллов с разной текстурой. Для 10-ти кристаллов с установленной рентгено-структурным анализом кристаллографической текстурой проведены измерения распределений D и L треков, образованных ускоренными ядрами ¹³²Xe (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета средних значений D_{av} и L_{av}, наблюдаемых в трех кристаллах оливина с разной кристаллической текстурой

№ кристалла	Число треков	D _{av} ± σ(D) (†)	σ(D _{av})	Число треков	L _{av} ± σ(L) (†)	σ(L _{av})
1	25	3.02 ± 0.36	0.071	54	47.49 ± 2.00	0.272
2	27	3.38 ± 0.50	0.097	55	47.72 ± 2.00	0.268
3	26	2.98 ± 0.40	0.078	50	47.08 ± 1.74	0.247

Примечание. (†) Величины D приведены в ед. 0.384 мкм, L – в ед. 1.70 мкм.

Как следует из приведенных данных, величины диаметров и длин треков ускоренных ядер ¹³²Xe остаются постоянными в пределах погрешности измерений независимо от кристаллической текстуры изученных кристаллов. Средние значения D и L равны 1.20±0.06 мкм и 80.6±0.40 мкм, соответственно.

Кроме того, для определения зависимости эффективности травления треков от их ориентации относительно кристаллографических осей симметрии оливина был проведен подсчет плотности треков для статистически представительной группы из 58 кристаллов, облученных ядрами ¹³²Xe и протравленных в течение 6 часов. При этом определялись две взаимосвязанные характеристики эффективности травления треков – скорость травления вещества оливина в зоне следа торможения ядер и плотность треков ρ. Обе указанные характеристики непосредственно связаны с величиной диаметра D входных лунок травления треков на облученной поверхности кристалла. Интервал разброса величин D в данном случае составил (0.2–0.7) мкм. Порог регистрации треков определяется

минимальной регистрируемой величиной $D_{\min} = 0.2$ мкм. Для каждого кристалла подсчитывалось около 100 треков. Результаты определения ρ для изученных кристаллов оливина приведены на рис. 1.

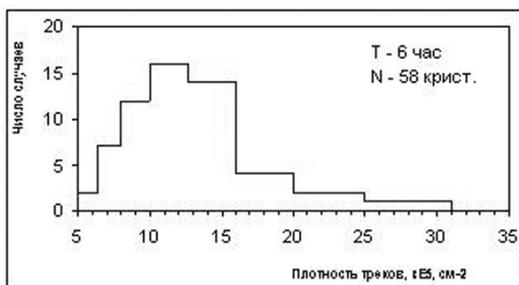


Рис. 1. Распределение 58 кристаллов оливина из палласита Марьялахти по плотности треков от ускоренных ядер ^{132}Xe , наблюдаемой на поверхности травления в течение 6 часов.

По своей кристаллографической структуре оливин относится к силикатам с изолированным, островным расположением кремнекислородных тетраэдров (SiO_4), соединенных между собой с помощью катионов Mg или Fe [Birle et al., 1968]. При этом отдельные кремнекислородные радикалы изолированы друг от друга. Таким образом, эффективность химического травления и удаления вещества из зоны нарушения кристаллической решетки вдоль следа торможения тяжелых ядер не зависит от ориентации треков относительно осей симметрии кристаллической решетки оливина, так как размеры области радиационного разупорядочения решетки вдоль траектории торможения ядер $(60 \div 100) \text{ \AA}$ намного превышают размеры $(2-3) \text{ \AA}$ элементарных ячеек кристалла.

Выводы. Выполненные исследования зависимости эффективности травления и геометрических параметров треков ускоренных ядер ^{132}Xe в кристаллах оливина из палласита Марьялахти показали:

(1) Впервые установлено, что скорость травления длиннопробежных (от ~ 50 до $200-300$ мкм), предварительно термически неотожженных треков в природных кристаллах оливина из палласитов, не зависит от ориентации треков по отношению к кристаллографическим осям симметрии оливина;

(2) Также впервые показано, что эффективность травления этих треков остается постоянной для кристаллов оливина как с поликристаллической, высоко ориентированной правильной текстурой, так и с монокристаллической текстурой;

(3) Анизотропный характер химического травления обнаружен лишь для формы и диаметров входных лунок треков на поверхности травления природных кристаллов, что, наиболее вероятно, существенно зависит как от ориентации плоскостей травления треков относительно кристаллографических осей симметрии, так и текстуры каждого из исследуемых кристаллов.

Литература

Александров А. Б., Багуля А. В., Владимиров М. С., Гончарова Л. А., Ивлиев А. И., Калинина Г. В., Кашикарров Л. Л., Коновалова Н. С., Окатьева Н. М., Полухина Н. Г., Русецкий А. С., Старков Н. И., Царев В. А. Методика определения заряда ядер космических лучей по трекам в кристаллах оливина из метеоритов // Краткие сообщения по физике ФИАН, 2008. № 7. С.19–27.

Егоров В. К., Кашикарров Л. Л., Полухина Н. Г., Царев В. А. О некоторых структурных особенностях кристаллов оливина из метеорита Марьялахти. // Тр Международного

минералогического семинара «Структура и разнообразие минерального мира». Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2008. С. 139–140.

Кашкаров Л. Л., Полухина Н. Г., Старков Н. И., Калинина Г. В., Ивлиев А. И., Александров А. Б., Гончарова Л. А., Апачева И. Ю. Новая методика определения параметров треков, образованных в оливине палласитов ядрами сверхтяжелых элементов космических лучей // Электронный научно-информационный журнал Вестник Отделения наук о Земле РАН № 1(24) 2006 ISSN 1819-6586.URL: http://www.scgis.ru /russian/cp1251/h_dgggms/1-2006/informbul-1_2006/planet-6.pdf.

Birle J. D., Gibbs G. V., Moore P. B., Smith J. V. Crystal Structures of Natural Olivines // Amer. Min., 1968. V. 53. P. 807–824.

Feinberg E. L., Kotelnikov K. A., Polukhina N. G. Completely Automated Measurement Complex (PAVIKOM) for Track-Detector Data Processing // Physics of Particles and Nuclei. 2004. V. 35. P. 409–423.

Ginzburg V. L. Problems and Horizons of the Search for Tracks of Heavy and Superheavy Nuclei in Olivin Crystals from Meteorites (OLIMPIYA project) // Doklady Physics. 2005. V. 50. P. 283–285.

Perron C., Bourot-Denise M., Perelygin V. P., Birkholz W., Stetsenko S. G., Dersch R., Zhu T. C., Vater P., Brandt R. Revelation of heavy ion tracks in olivine: orientation dependent annealing or etching? // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 1988. V. 15, № 1–4. P. 231–234.

Petrova R. I., Perelygin V. P., Akopova A. B., Gogarian M. M. Optimization of the heavy nuclei track etching in olivine crystals from meteorites // Radiat. Meas. 1995. V. 25. № 1–4. P. 329–330.