

ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ИСТОРИИ ПАЛЛАСИТОВ МЕТОДОМ ТРЕКОВОГО АНАЛИЗА

В. А. Алексеев¹, А. В. Багуля², А. Е. Волков^{2,3,4}, А. А. Гиппиус²,
Л. А. Гончарова², С. А. Горбунов², В. М. Грачев⁶, А. Б. Дашкина³,
Г. В. Калинина¹, Н. С. Коновалова^{2,5}, Н. М. Окатьева^{2,5}, Т. А. Павлова¹,
Н. Г. Полухина^{2,5,6}, Н. И. Старков^{2,5}, Тан Найнг Со², М. М. Чернявский²,
Т. В. Щедрина^{2,5}

Работа проведена в рамках эксперимента ОЛИМПИА по изучению треков тяжелых и сверхтяжелых ядер космического излучения в кристаллах оливинов из палласитов Марьялахти и Игл Стейшн. Получены глубинные распределения скоростей образования треков тяжелых ядер космических лучей в оливине палласитов разных доатмосферных размеров. Полученные зависимости использованы для анализа данных по плотности треков в кристаллах оливина из палласита Марьялахти. В трех кристаллах было обнаружено распределение треков с высоким градиентом плотности, что свидетельствует о сложной радиационной истории метеорита.

Ключевые слова: космические лучи, палласиты, кристаллы оливина, треки тяжелых ядер, радиационный возраст.

Исследование железо-каменных метеоритов (палласитов) является наиболее перспективным методом изучения тяжелых и сверхтяжелых химических элементов в со-

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: polukhinang@lebedev.ru.

³ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

⁴ Лаборатория ядерных реакций имени Г. Н. Флерова, ОИЯИ, 141980 Россия, Московская область, Дубна.

⁵ НИТУ “МИСиС”, 119049 Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 4.

⁶ НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

ставе галактических космических лучей (ГКЛ) [1]. Палласиты представляют собой пористую матрицу из никелистого железа с включениями полупрозрачных кристаллов оливина, которые могут занимать до 65% объема вещества метеорита. При прохождении заряженной частицы через кристалл оливина происходит нарушение его структуры, в результате чего формируется трек, видимый под оптическим микроскопом после процедуры химического травления. Параметры образовавшегося трека позволяют идентифицировать заряд ядра, сформировавшего трек. Предложенная в эксперименте ОЛИМПИА методика исследований тяжелой компоненты ГКЛ основана на регистрации и измерении динамических и геометрических параметров треков торможения ядер перед их остановкой в кристалле [2].

В данной работе представлен анализ градиента плотности треков тяжелых ядер, зарегистрированных в кристаллах оливина палласита Марьялахти. Особый интерес представляют три обнаруженных кристалла с особенностью градиента плотности треков, позволяющей сделать предположения о доатмосферной истории метеорита.

Расчет градиента скорости образования треков в метеоритных оливинах. Методика изучения протравленных треков в кристаллах оливина из палласитов позволяет получить сведения об истории космического объекта и глубине расположения кристалла от первоначальной (доатмосферной) поверхности метеорита, в частности, путем измерения плотности следов от ядер группы железа [3].

При анализе экспериментальных распределений плотности треков тяжелых ядер в кристаллах оливина палласитов используются расчетные скорости образования треков ρ/t , где ρ – плотность треков, см^{-2} и t – радиационный возраст метеорита, млн лет. Зависимости плотности треков от глубины залегания кристалла (d , см) в метеоритах разных доатмосферных размеров были получены для пироксена хондритов [4] и впоследствии скорректированы для оливина палласитов. На основе результатов [4] участниками проекта ОЛИМПИА были выполнены расчеты глубинного распределения скорости образования треков ядер группы железа (VN-ядер с зарядами $24 \leq Z \leq 28$) в оливине палласитов разных доатмосферных размеров R . Учитывалось, что скорость образования треков в пироксене выше, чем в оливине; коэффициент превышения был определен как 2.3 ± 0.5 (по данным [3, 5] и др.). Также было принято во внимание, что пробег VN-ядер в веществе палласитов в 1.4 раза меньше, чем в веществе хондритов [5]. В соответствии с этими поправками, значения ординат зависимости ρ/t уменьшились по сравнению с [4] в 2.3 раза, а значения абсцисс – в 1.4 раза (рис. 1).

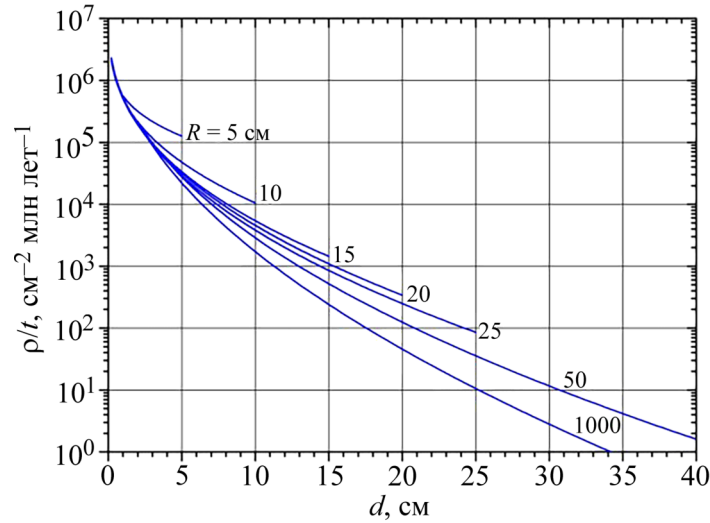


Рис. 1: Зависимость скорости образования треков VH-ядер космических лучей ρ/t от глубины залегания кристалла d в палласитах разного доатмосферного радиуса R .

Как было показано в [6], кривые, характеризующие изменение величины $\lg(\rho/t)$ с глубиной d в расчетах [4], могут быть с точностью до нескольких процентов описаны зависимостью вида (1):

$$\lg(\rho/t) = A + Bd^C. \quad (1)$$

Коэффициенты A , B и C были рассчитаны путем минимизации суммы квадратов отклонений величин $\lg(\rho/t)$, полученных по формуле (1), от соответствующих значений в работе [4]. Найденные зависимости параметров A , B и C от доатмосферного радиуса палласитов R позволили получить глубинные распределения скоростей образования треков в палласитах для нескольких выбранных значений R (5, 10, 15, 20, 25, 50 и 1000 см). Аналогичная процедура пересчета была выполнена для глубинной зависимости ρ/t в интервале значений d от 0.001 до 1 см для $R = 5$ см (рис. 2).

На основе этих данных для значений d в диапазоне 0.001–1 см была получена функция $\varphi(\rho)$, характеризующая относительные изменения плотности треков в диапазоне глубин от d_1 до d_2 :

$$\varphi(\rho) = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)/2} \times 100, \% \text{см}^{-1}. \quad (2)$$

В этом диапазоне глубин d (от 0.001 см до 1 см) градиент плотности образования треков VH-ядер падает от $\sim 10^5$ % см $^{-1}$ до 100% см $^{-1}$. Столь высокий градиент плотности треков для малых значений d может сформироваться при облучении поверхности

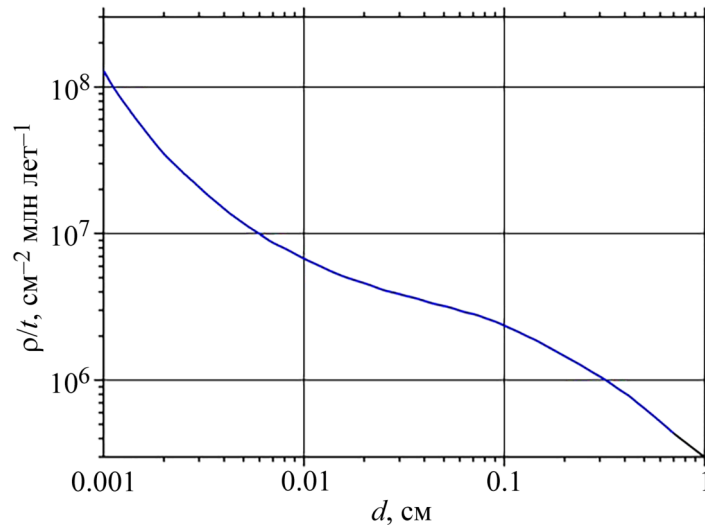


Рис. 2: Зависимость скорости образования треков VH-ядер космических лучей ρ/t от глубины залегания кристалла d в палласитах доатмосферного радиуса $R = 5$ см для значений $d < 1$ см.

кристалла VH-ядрами космических лучей при солнечных вспышках. Случаи такого облучения наблюдаются, в частности, в кристаллах пироксена каменных метеоритов на ранних этапах формирования родительских тел [7]. При этом такой градиент проявляется только при небольшой толщине экранирующего слоя менее ~ 500 мкм. Рассчитанные аналогичным способом градиенты плотности для показанных на рис. 1 глубинных зависимостей скоростей образования треков в палласитах разных размеров составили менее $100\% \text{ см}^{-1}$ для значений $d > 1$ см.

Кристаллы оливина с высоким градиентом плотности треков. В общей сложности, за время проведения эксперимента ОЛИМПИА, было обработано и исследовано около 300 кристаллов оливина из палласитов Марьялахти и Игл Стейшн. Распределение плотности треков в этих кристаллах приходится на широкий интервал значений ρ от $1.0 \cdot 10^3$ до $6.3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$, причем для большей части кристаллов (около 90%) плотность треков лежит в пределах от $6.3 \cdot 10^5$ до $6.3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ с максимумом в районе $(2.5 \div 4.0) \times 10^6 \text{ см}^{-2}$.

Согласно ранее проведенным исследованиям ([3, 8]), доатмосферный размер палласита Марьялахти оценивается равным 20 см, а его радиационный возраст t , по различным оценкам, составляет от 178 до 205 млн лет. В приведенных расчетах используется значение $t = 185 \pm 19$ млн лет из работы [9]. Эти значения дают глубину залегания большей части исследованных в данной работе кристаллов оливина Марьялахти $d = 9 \pm 2$ см.

Данная величина близка к оценкам d , полученным для этого метеорита другими исследователями [3].



Рис. 3: Фрагмент микрофотографии поверхности кристалла M-L-11-10 из палласита Марьялазти с высоким градиентом плотности треков ядер железа. Размер изображения 284×226 мкм.

В подавляющем большинстве исследованных кристаллов наблюдается практически равномерное распределение треков, без какого-либо заметного градиента плотности (в пределах $\pm 20\%$). В этой связи особый интерес представляет найденный нами образец с очень высоким градиентом плотности треков (кристалл M-L-11-10). Часть поверхности этого кристалла с высокой плотностью треков ядер железа показана на рис. 3. На поверхности кристалла были выделены две смежные области (1 и 2) размером 200×800 мкм каждая, плотность треков в которых на расстоянии 800 мкм изменяется на два порядка величины – от $3 \cdot 10^6$ до $4 \cdot 10^4$ см^{-2} .

Для каждой области были рассчитаны плотности треков с шагом 20 мкм, результаты показаны на рис. 4. Распределения для обеих областей характеризуются наличием линейного участка в интервале значений $l = 0.017 \div 0.051$ см, где l – расстояние от края с максимальной плотностью треков. Средние значения градиентов плотности треков ядер железа для обеих областей, полученные на основе этой линейной зависимости по формуле (2), совпадают и составляют $\sim 5 \times 10^3$ $\% \text{ см}^{-1}$.

Для проверки полученных данных, поверхность кристалла M-L-11-10 с зарегистрированными треками была сошлифована, после чего протравлена снова. Плотность треков ядер была повторно измерена на вновь обработанной поверхности (см. вставку на

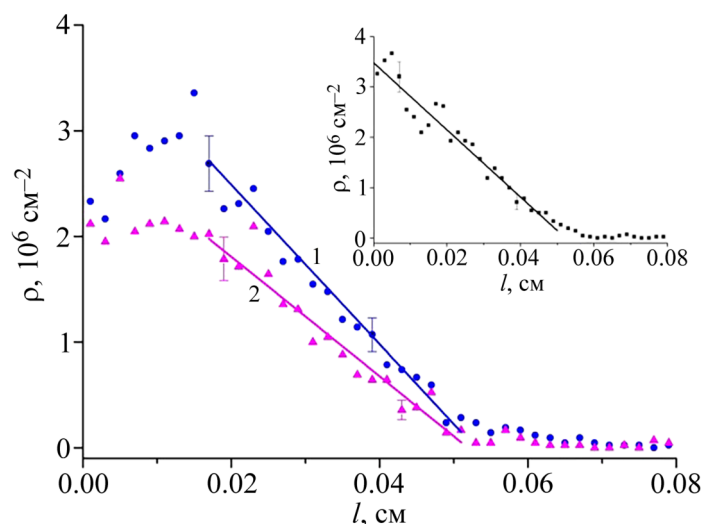


Рис. 4: Плотность треков ядер железа ρ на поверхности кристалла M-L-11-10 в зависимости от расстояния l от края области с максимальной плотностью треков для двух смежных областей 200×800 мкм² (кружки и треугольники). 1 и 2 – линии регрессии для линейных участков. Вставка – та же зависимость после шлифовки поверхностного слоя кристалла с протравленными треками и повторного травления.

рис. 4). Полученная в результате этой процедуры средняя величина градиента плотности треков практически не изменилась и составила $\sim 4 \times 10^3$ % см⁻¹. Из полученной зависимости скорости образования треков от глубины залегания кристалла d (рис. 2) следует, что этот кристалл облучался не столько ядрами галактического происхождения (входящими в состав так называемого стационарного излучения, вклад которого в градиент зарегистрированных треков пренебрежимо мал), сколько ядрами солнечных космических лучей более низких энергий при толщине экранирующего слоя не более нескольких сот микрон.

Кроме кристалла M-L-11-10, были найдены еще два кристалла оливина из метеорита Марьялахти (M-L-20-8 и M-L-21-1) с четко выраженным градиентом плотности треков VH-ядер. Средние значения градиента плотности треков для этих кристаллов составили $\sim 3 \times 10^3$ и $\sim 5 \times 10^3$ % см⁻¹ соответственно, что сопоставимо со значением для кристалла M-L-11-10. Полученные результаты свидетельствуют о схожих условиях облучения поверхностей этих кристаллов.

Необходимо отметить, что кристаллы с заметным градиентом плотности треков, которые часто обнаруживаются в каменных метеоритах (ахондритах, углистых метеоритах, обыкновенных хондритах низких петрологических типов), содержат следы

доаккреционного облучения, сохранившиеся при низких температурах как в процессе формирования родительских тел этих метеоритов, так и в течение последующей космической истории. Для палласитов подобный сценарий неприменим из-за высоких температур, которым подвергалось вещество метеоритов этого класса в процессе формирования из смеси оливина и жидкого металла в недрах родительских тел.

Полученные данные дают возможность предложить следующий сценарий космической истории палласита Марьялахти. Находясь в границах Солнечной системы, незадолго до вхождения в атмосферу Земли метеорит Марьялахти развалился на несколько фрагментов, в результате чего обнажилась поверхность с кристаллами M-L-11-10, M-L-20-8 и M-L-21-1, которая подверглась дальнейшему воздействию космических лучей, преимущественно солнечного происхождения. До развала метеорита эти кристаллы находились ближе к его центру, и плотность треков в них к этому моменту была невысокой. Когда в результате развала родительского тела они оказались вблизи вновь образовавшейся поверхности, на глубине не более 500 мкм от ее границы, за относительно короткий период времени до вхождения в земную атмосферу в них сформировался градиент треков ядер солнечных космических лучей. Стабилизированный пролет через земную атмосферу фрагмента конусообразной формы [8] и/или особенности его доатмосферной поверхности (каверны и углубления) препятствовали разрушению кристаллов M-L-11-10, M-L-20-8 и M-L-21-1, что позволило зафиксировать в них высокий градиент плотности треков ядер.

Достоверность информации, полученной с помощью кристаллов M-L-11-10, M-L-20-8 и M-L-21-1, помимо прочего, заключается в том, что все обнаруженные в них треки проявлены в одних и тех же условиях, что исключает влияние неопределенностей обработки на полученный результат.

Заключение. В работе представлены результаты исследования градиента плотности треков ядер солнечных космических лучей, зафиксированного в трех кристаллах оливина палласита Марьялахти. Анализ данных был осуществлен на основе полученных глубинных распределений скоростей образования треков тяжелых ядер космических лучей в кристаллах оливина палласитов разных доатмосферных размеров, адаптированных для оценки плотности треков в кристаллах оливина из палласита Марьялахти. В результате была сформулирована гипотеза о доатмосферной истории родительского тела метеорита в Солнечной системе.

Работа частично поддержана Программой № 28 Президиума РАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. В. Багуля, Л. Л. Кашкаров, Н. С. Коновалова и др., Письма в ЖЭТФ **97**(12), 811 (2013) [A. V. Bagulya, L. L. Kashkarov, N. S. Konovalova, et al., JETP Letters **97**(12), 708 (2013)].
- [2] V. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, et al., The Astrophysical Journal **829**(2), 120 (2016).
- [3] В. П. Перелыгин, Ш. Б. Виик, О. Отгонсурэн, Препринт № P13-8359 ОИЯИ (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 1974).
- [4] S. K. Bhattacharya, J. N. Goswami and D. Lal, J. Geophys. Res. **78**(34), 8356 (1973).
- [5] А. О. Аалое, В. Д. Коломенский, Л. К. Левский и др., Препринт № P14-12937, ОИЯИ (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 1979).
- [6] В. А. Алексеев, *Астрономический вестник* **38**(3), 225 (2004).
- [7] J. N. Goswami, D. Lal, L. Willkening, Space Sci. Rev. **37**, 111 (1984).
- [8] Е. М. Колесников, О. Отгонсурэн, В. П. Перелыгин, А. В. Фисенко, *Метеоритика* **36**, 82 (1977).
- [9] G. F. Herzog, D. L. Cook, M. Cosarinsky, et al., Meteorit. Planet. Sci. **50**(1), 86 (2015).

Поступила в редакцию 18 марта 2019 г.

После доработки 16 июля 2019 г.

Принята к публикации 16 июля 2019 г.