

## АНОМАЛИЯ ЗАРЯДОВОГО СПЕКТРА ЯДЕР ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОЛИВИНАХ КАК СВИДЕТЕЛЬСТВО РАДИАЦИОННОЙ ИСТОРИИ МЕТЕОРИТОВ

А. Б. Александров<sup>1-4</sup>, А. В. Багуля<sup>1</sup>, А. Е. Волков<sup>1,7</sup>, А. А. Гиппиус<sup>1</sup>,  
Л. А. Гончарова<sup>1</sup>, С. А. Горбунов<sup>1</sup>, В. М. Грачёв<sup>5</sup>, Г. В. Калинина<sup>6</sup>,  
Н. С. Коновалова<sup>1</sup>, Н. М. Окатьева<sup>1</sup>, Т. А. Павлова<sup>6</sup>, Н. Г. Полухина<sup>1,5</sup>,  
Н. И. Старков<sup>1</sup>, Тан Найнг Со<sup>1</sup>, М. М. Чернявский<sup>1</sup>, Т. В. Щедрина<sup>1</sup>

*Представлен новый дополнительный аспект анализа данных эксперимента ОЛИМПИА по поиску ядер тяжёлых компонент космических лучей в кристаллах оливина из железо-каменных метеоритов. Обнаружены две группы кристаллов с отличающимся зарядовым спектром зарегистрированных ядер. Обсуждаются возможные причины этого явления и его влияние на итоговый спектр.*

**Ключевые слова:** галактические космические лучи, железо-каменные метеориты, спектры тяжёлых ядер.

Железо-каменные метеориты (палласиты) с 60-х гг. прошлого века используются как трековые детекторы природного происхождения [1]. Уникальность этих детекторов состоит в том, что из-за чрезвычайно длительного воздействия галактических космических лучей (ГКЛ) удаётся обнаружить следы остановки ядер самых тяжёлых и весьма редких компонент космического излучения, вплоть до зарядов  $Z > 100$ .

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: polukhinang@lebedev.ru.

<sup>2</sup> Неапольская лаборатория Национального института ядерной физики Италии, Неаполь.

<sup>3</sup> Неапольский Университет имени Федерико II, Италия, Неаполь.

<sup>4</sup> НИТУ «МИСиС», 119049 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4.

<sup>5</sup> НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

<sup>6</sup> ГЕОХИ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19.

<sup>7</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

В России исследования палласитов для прямой регистрации следов тяжёлых ядер были начаты в 1970-х годах в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова (ОИЯИ) [2]. В ходе исследований сотрудниками лаборатории была разработана методика выявления следов ядер путём отжига и химического травления кристаллов оливина [3, 4].

В начале 2000-х годов два фрагмента палласитов Marjalahti и Eagle Station были переданы из ОИЯИ в ФИАН для проведения дальнейших исследований с использованием новых технических средств и методов регистрации. В результате начался эксперимент ОЛИМПИА (ОЛИвины из Метеоритов – Поиск тяжелых И сверхтяжелых Ядер) по поиску и идентификации тяжелых и сверхтяжелых ядер ГКЛ в кристаллах оливина из палласитов, представляющий собой совместный проект институтов Российской академии наук: ФИАН им. П. Н. Лебедева и ГЕОХИ им. В. И. Вернадского. Подробности эксперимента, методы обработки и анализа данных представлены в работах [5, 6].

Треки ядер тяжёлых компонент ГКЛ регистрируются в полупрозрачных кристаллах магний-железосиликатного оливина  $(\text{Mg}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})_2\text{SiO}_4$ , заключённых в железо-никелевой матрице палласита. В отличие от трековых детекторов других типов, эмульсионных или пластиковых, оливин не накапливает фоновые треки от ядер с  $Z \leq 24$ , что обусловлено высоким порогом удельных энергетических потерь заряженной частицы, необходимым для образования в оливине химически травимого трека (пороговое значение ионизационных потерь энергии для оливина составляет около  $18 \text{ МэВ}/(\text{мг}\cdot\text{см}^{-2})$ ) [7]. Это фактически означает отсутствие фоновых событий в этих исследованиях.

Повреждённые из-за прохождения заряженной частицы области кристалла имеют более высокую химическую активность по сравнению с неповреждённым материалом, в результате чего возникает возможность визуализировать трек частицы в кристалле путем его травления в комплексном химическом растворе. Параметры протравленных треков ядер (травимая длина и скорость травления) зависят от ионизации, производимой быстрым тяжёлым ионом в веществе кристалла [8, 9].

Исследование кристаллов осуществляется оригинальным авторским методом поэтапной обработки, при котором после фиксации обнаруженных видимых участков треков и измерения их параметров часть кристалла толщиной 50–100 мкм (с точностью до нескольких мкм) удаляется, и процесс обработки поверхности и измерения треков повторяется. При обработке кристалла на каждой новой стадии осуществляется поиск как новых треков, так и продолжений участков, уже найденных на предыдущем этапе; в этом случае производится координатная “сшивка” трека. В результате восстанавли-

вается его полная длина до точки остановки в детекторе. Для установки на микроскоп кристаллы оливина, извлеченные из железо-никелевой матрицы, закрепляются в эпоксидных таблетках по  $\sim 15$  штук.

За время эксперимента было обработано 890 кристаллов из метеоритов Marjalahti и Eagle Station, и определены параметры 28275 треков ядер с  $Z > 24$ , включая три трека с зарядом  $119_{-6}^{+10}$ . Разработанный с использованием калибровочных данных авторский метод определения заряда ядра, сформировавшего трек [10, 11], позволяет на основе проведённых измерений определять зарядовый спектр зарегистрированных ядер [5].

Поиск треков и их обработка ведётся непрерывно, начиная с 2005 года. Все получаемые результаты сравниваются с данными спутниковых экспериментов, проводивших измерения в той же области зарядов: HEAO-3 [12], ARIEL-6 [13] и UHCRE [14]. В 2019 году была начата новая серия измерений в оливинах из метеорита Marjalahti, которая привела к довольно неожиданным результатам. При обработке новой серии кристаллов (таблетки ML) после 24 часов травления были получены “необычные” зарядовые распределения, заметно отличающиеся от распределений (в дальнейшем условно называемых “обычными”), полученных ранее в таблетках ML (метеорит Marjalahti) и ES (метеорит Eagle Station), а также в спутниковых экспериментах. На рис. 1 представлено сравнение “обычных” (а) и “необычных” (б) зарядовых спектров эксперимента ОЛИМПИА.

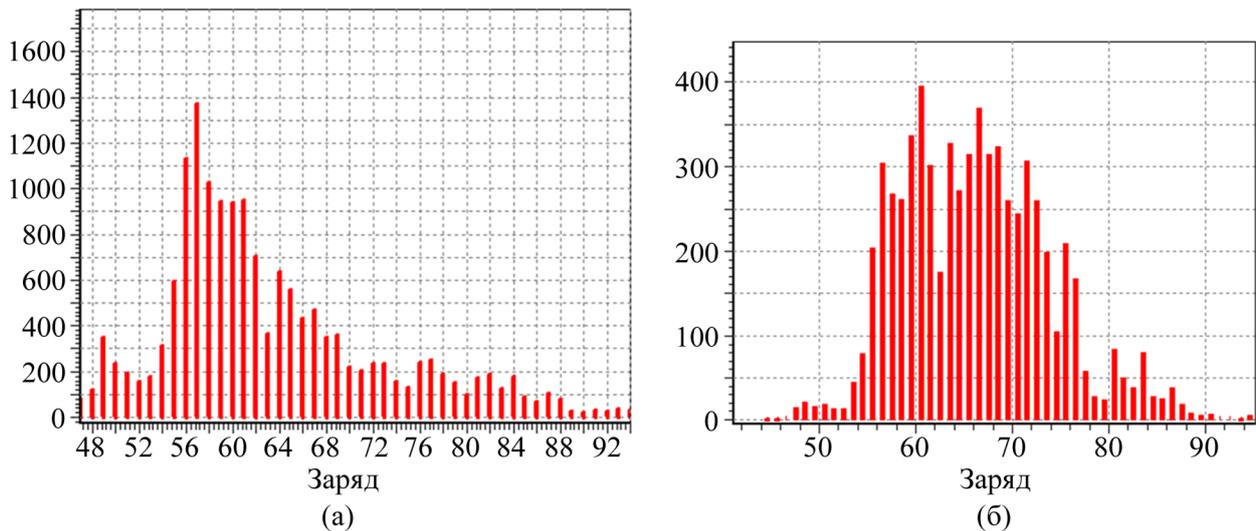


Рис. 1: Сравнение количества ядер по результатам эксперимента ОЛИМПИА. (а) “обычный” спектр (21740 треков, по оси  $Y$  – количество треков); (б) “необычный” спектр (6529 треков, по оси  $Y$  – количество треков).

Сравнивая эти рисунки, можно увидеть качественное различие в форме распределений. “Обычное” распределение имеет резкий пик в области  $Z = 56$ , затем оно круто спадает, сменяясь на более пологую часть при  $Z > 70$ . В то же время “необычное” распределение имеет высокий и широкий пик в области  $65 < Z < 75$ .

Предположение, почему могут отличаться спектры, полученные в разных группах кристаллов, основано на том, что эти кристаллы, по-видимому, находились на разной глубине от первоначальной поверхности образца, и степень их “загруженности” треками может быть связана, в том числе, с радиационной историей метеорита. Ранее нами были обнаружены кристаллы с высоким градиентом плотности треков [15], позволившие сделать предположения о доатмосферной истории метеорита Marjalahti.

Кристаллы оливина для таблеток МЛ были взяты из крупной ячейки размером  $\sim 5$  мм, расположенной вблизи поверхности метеорита (см. рис. 2).



Рис. 2: Кристаллы для таблеток МЛ были взяты из ячейки размером  $\sim 5$  мм и других областей, расположенных близко к поверхности.

Более близкое расположение кристаллов к поверхности метеорита могло привести к отжигу треков за счёт нагревания метеорита при его прохождении через атмосферу во время падения на Землю. При отжиге треков происходит их укорачивание, причём в разной степени, в зависимости от заряда ядра [8, 9]. Этот эффект мог привести к искажениям при определении заряда частиц, и следовательно, к изменению полученного зарядового распределения.

Таким образом, использование оливинов в качестве детекторов тяжелых ядер имеет два аспекта. Первый (и, вообще говоря, основной) – получение данных о зарядовых спектрах ядер ГКЛ, позволяющих сделать определенные выводы о характере астрофизических ядерных процессов. Второй аспект, затронутый в данной работе, касается получения сведений об истории носителей оливинов – метеоритов, что представляет самостоятельный астрофизический интерес (на что мы указали ранее в нашей работе [15]).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Maurette, P. Pellas, and R. M. Walker, *Nature* **204**, 821 (1964). DOI: <https://doi.org/10.1038/204821a0>.
- [2] G. N. Flerov and G. M. Ter-Akopian, *Pure and Appl. Chem.* **53**(5), 909 (1981). DOI: <http://dx.doi.org/10.1351/pac198153050909>.
- [3] O. Otgonsuren, V. P. Perelygin, S. G. Stetsenko, et al., *Astrophys. J.* **210**, 258 (1976). DOI: 10.1086/154826.
- [4] V. P. Perelygin, Yu. V. Bondar, R. Brandt, et al., *Physics of Atomic Nuclei* **66**(8), 1569 (2003). DOI: 10.1134/1.1601767.
- [5] V. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, et al., *Astrophys. J.* **829**(2), 120 (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/829/2/120.
- [6] В. А. Алексеев, А. В. Багуля, А. Е. Волков и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **44**(11), 41 (2017). DOI: 10.3103/S1068335617110069.
- [7] P. Horn, M. Maurette, and W. Von Oertzen, *Z. Naturforsch. A* **22**(11), 1793 (1967). DOI: 10.1515/zna-1967-1117.
- [8] С. Дюрани, Р. Балл, *Твердотельные ядерные детекторы* (М., Энергоатомиздат, 1990).
- [9] Р. Л. Флейшер, П. Б. Прайс, Р. М. Уокер, *Треки заряженных частиц в твёрдых телах*. Т. 1. *Методы исследования треков* (М., Энергоатомиздат, 1981).
- [10] А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **35**(7), 19 (2008). DOI: 10.3103/S1068335608070038.
- [11] А. Б. Александров, В. А. Алексеев, А. В. Багуля и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **46**(12), 23 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619120042.
- [12] W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner, et al., *Astrophys. J.* **346**, 997 (1989). DOI: 10.1086/168082.

- [13] P. H. Fowler, R. N. F. Walker, M. R. W. Mashed, et al., *Astrophys. J.* **314**, 739 (1987). DOI: 10.1086/165101.
- [14] J. Donnelly, A. Thompson, D. O'Sullivan, et al., *Astrophys. J.* **747**(1), 40 (2012). DOI: 10.1088/0004-637X/747/1/40.
- [15] В. А. Алексеев, А. В. Багуля, А. Е. Волков и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **46**(8), 15 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619080037.

Поступила в редакцию 13 октября 2020 г.

После доработки 17 октября 2020 г.

Принята к публикации 18 октября 2020 г.