

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Зарядовый спектр ядер галактических космических лучей в оливинах из метеоритов

А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров, Л.А. Гончарова,
А.И. Ивлиев, Г.В. Калинина, Л.Л. Кашкаров, Н.С. Коновалова,
Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий, Н.И. Старков

Представлены результаты экспериментального исследования треков галактических космических лучей в кристаллах оливинов из метеоритов-палласитов Марьялахти и Игл Стейшн. Получено хорошее согласие измеренного зарядового спектра ядер с экспериментальными данными космических аппаратов HEAO-3 (High Energy Astronomy Observatory) и "Ariel-6".

PACS numbers: 21.10.Ft, **26.40.+r**, 95.55.Vj, 96.30.Za, 96.50.sb

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201008c.0839

Содержание

1. Введение (839).
 2. Методика изучения характеристик треков галактических космических лучей в оливинах из метеоритов и полученные результаты (840).
 3. Выводы и план работ по продолжению исследований (841).
 4. Заключение (842).
- Список литературы (842).

1. Введение

Регистрация тяжёлых и сверхтяжёлых ядер космических лучей и поиск среди них трансформированных ядер с $Z > 100$ принадлежит к числу наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики [1–5]. Самые ранние эксперименты по поиску таких ядер были проведены около 40 лет назад с использованием толсто-слойных ядерных эмульсий, экспонируемых в верхних слоях атмосферы на шарах-зондах [6]. Применялись также многослойные трековые детекторы из полимерных материалов в сочетании с черенковскими счётчиками [7, 8]. Основным недостатком таких экспериментов было малое время экспозиции детекторов, что при небольшом потоке изучаемых частиц позволяло фиксировать только

единичные события. Интерес к проблеме возможности существования сверхтяжёлых ядер в последние годы существенно возрос, в том числе в связи с недавними новыми результатами по синтезу трансурановых элементов на ускорителях. Готовятся новые эксперименты на спутниках для изучения распространённости сверхтяжёлых ядер в Галактике [4, 5]. Во многих из них предполагается использовать твердотельные трековые детекторы.

В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) под руководством Г.Н. Флёрова были начаты работы по поиску треков сверхтяжёлых ядер космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов [9–12]. При такой методике используется способность силикатных кристаллов из метеоритов (оливинов, пироксенов) регистрировать и сохранять в течение длительного времени ($> 10^8$ лет) треки ядер с $Z > 26$. Как показывают оценки, в 1 см^3 таких кристаллов, расположенных на глубине менее 5 см от доатмосферной поверхности метеорита, за 10^8 лет может сформироваться 100–1000 треков ядер с $Z > 90$, а в кристаллах из поверхностных участков метеорита (глубина менее 1 см) — до 10^4 треков. Таким образом, фактор длительной экспозиции метеоритов в космосе приводит к значительному преимуществу данного метода по сравнению с использованием спутниковой или аэростатной аппаратуры. Определение параметров треков и зависимости их плотности от глубины проникновения частицы в метеорит даёт возможность исследовать потоки и спектры частиц тяжёлой компоненты галактического космического излучения. В ранних работах ОИЯИ среди выявленных путём отжига и травления образцов треков ядер с $Z > 60$ около 150 было отнесено к трекам ядер группы урана (длина отождествлённых треков 190–220 мкм). Были также обнаружены 5 следов длиной около 360 мкм, которые, возможно, являются треками ядер с $Z > 110$ [9–12]. Однако просмотр больших объёмов кристаллов, как правило, с большим увеличением представлял собой достаточно сложную техническую проблему. При руч-

А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров, Л.А. Гончарова, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий, Н.И. Старков. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: bagulya@lebedev.ru, poluhina@sci.lebedev.ru
А.И. Ивлиев, Г.В. Калинина, Л.Л. Кашкаров. Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина 19, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: leokash@mail.ru

Статья поступила 24 декабря 2009 г.,
после доработки 19 мая 2010 г.

ной обработке оператор должен был визуально находить и фиксировать треки частиц. Это требовало огромных затрат труда и времени, была достаточно велика вероятность появления трудно улавливаемых ошибок. Появление приборов с зарядовой связью (CCD), использование CCD-камер для регистрации и оцифровки оптических изображений привело к созданию микропроцессорно-ориентированных систем для автоматической обработки треков частиц в детекторах. Распознавание треков частиц и восстановление их пространственного положения в этих системах выполняется компьютерами по специально разработанным программам. Все это позволило заменить изнурительный визуальный труд микроскопистов полностью автоматизированной процедурой распознавания треков. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в эмульсии, полученные с помощью CCD-камер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых позволяет производить поиск, распознавание и изучение треков. Новый метод не только ускоряет измерения, но и позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий для широкого спектра экспериментов, что ранее было практически нереально. В настоящее время исследование треков ядер в кристаллах оливина из метеоритов выполняются совместно группами из Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) и Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН) с использованием созданного в ФИАНе современного высокоэффективного комплекса ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс) [13].

2. Методика изучения характеристик треков галактических космических лучей в оливинах из метеоритов и полученные результаты

Группами сотрудников ФИАН и ГЕОХИ РАН в ходе выполнения проекта ОЛИМПИА (ОЛИвины из Метеоритов: Поиск тяжёлых И сверхтяжёлых Ядер) [14] разработана новая методика идентификации и измерения параметров следов торможения ядер в объёме кристаллов оливина [15]. Главные отличия новой методики измерений от ранее использовавшейся [9–12] заключаются в том, что (1) химическое травление треков проводится без предварительного термического отжига кристаллов, (2) выполняется измерение динамических и геометрических параметров треков (в процессе их последовательного, поэтапного травления) с высокой точностью на установке ПАВИКОМ; (3) осуществляется поиск и измерение треков по всему объёму кристалла (средний размер кристалла 2–3 мм), что многократно увеличивает статистику регистрируемых следов торможения ядер космических лучей.

Потери энергии быстрых ионов, проходящих сквозь среду, обусловлены главным образом процессом ионизации атомов мишени [16], а величина ионизационных потерь частиц, в свою очередь, влияет на геометрические размеры травимых треков. По своей кристаллографической структуре минерал оливин ($\text{Mg}_{0,88}\text{Fe}_{0,12}\text{SiO}_4$) относится к силикатам с изолированным, островным (в отличие от цепочечных, слоистых и каркасных силикатов) расположением кремнекислородных тетраэдров

(SiO_4), соединённых между собой с помощью катионов Mg или Fe [17]. При этом отдельные кремнийкислородные радикалы изолированы друг от друга. Можно ожидать, что благодаря такой структуре эффективность химического травления вещества из зоны нарушения кристаллической решётки вдоль следа торможения тяжёлых ядер не должна сильно зависеть от ориентации треков относительно осей симметрии кристаллической решётки оливина. Кроме того, важно отметить, что размеры области радиационного разупорядочения кристаллической решётки вдоль траектории торможения ядер в несколько десятков раз превышают размеры элементарных ячеек кристалла (60–100 Å по сравнению с 2–3 Å соответственно). Для исследования влияния ориентации кристаллографических осей оливинов на параметры образующихся треков в ходе выполнения проекта был проведён рентгеноструктурный анализ кристаллов оливина из палласита Марьялахти, облучённых ускоренными ядрами ^{132}Xe [18, 19]. Впервые было установлено, что длины треков, а также скорость их травления в природных кристаллах оливина из палласитов не зависят от ориентации треков по отношению к кристаллографическим осям оливина. Показано, что эффективность травления этих треков остаётся постоянной как для кристаллов оливина с поликристаллической, высокоориентированной правильной текстурой, так и для монокристаллов.

В рамках данного исследования осуществляются модельные расчёты с использованием программного пакета SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) и программного комплекса для моделирования прохождения быстрых частиц через вещество GEANT4 (GEANT — GEometry AND Tracking). Совместное использование программ позволяет проводить сравнение результатов и тем самым повышает их надёжность.

SRIM включает в себя набор программ для вычисления различных параметров процесса взаимодействия ионов с веществом. Полное описание физических моделей для расчёта потерь энергии, используемых в программе SRIM, приведено в монографии [16]. Там же представлены тексты первых версий SRIM, написанных на языке Фортран.

В пакете GEANT4 для вычисления потерь энергии ионов в веществе предусмотрен учёт всех возможных механизмов, в частности, осуществляется расчёт тормозных способностей по формулам Бете–Блоха и интерполяция данных на основе таблиц ICRU (the International Commission on Radiological Units and Measurements).

Для моделирования используется созданный при участии сотрудников нашей группы пакет Hadr01, входящий в состав GEANT4 в качестве официального примера его применения. Он позволяет моделировать прохождение пучков протонов и ионов через вещество. Результатом модельных расчётов являются распределения по различным параметрам (энерговыведение вдоль трека, энергия и заряд вторичных частиц и т.д.), доступные для дальнейшего анализа. На данный момент проведены тестовые расчёты прохождения ядер ^{131}Xe , ^{207}Pb , ^{238}U через вещество в широком спектре энергий и материалов. Результаты модельных расчётов дают хорошее согласие в пределах статистических ошибок с данными таблиц [20], в которых представлены тормозные способности и пробег ионов с зарядами $2 \leq Z \leq 103$ для диапазона энергий от 2,5 до 500 МэВ на нуклон в различных материалах.

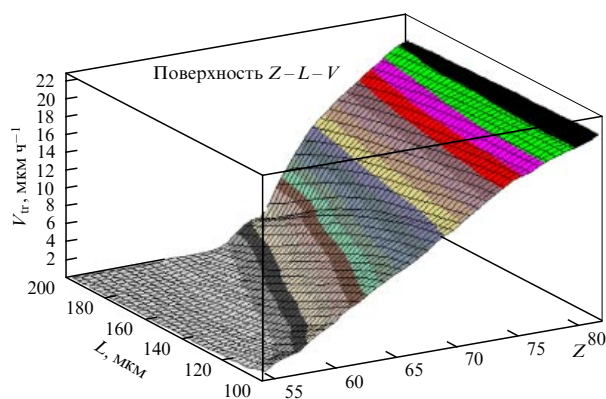


Рис. 1. Трёхмерная поверхность, полученная в результате обобщения зависимостей средней скорости травления участка трека V_{tr} от величины протравленной длины трека L для нескольких тяжёлых ядер с зарядами $55 < Z < 82$.

Таким образом, для определения заряда ядер VVH-группы (VVH — от англ. Very Very Heavy) ($Z > 50$) космических лучей использовались два основных параметра треков, химически травимых в кристаллах оливина из палласитов Марьялахти и Игл Стейшн: геометрический — измеренная длина L — и динамический — скорость травления $V_{tr} = L/t$, где t — время травления трека на данном этапе. Подробно методика определения заряда в проекте ОЛИМПИА описана в [15]. Была построена зависимость между тремя параметрами, характеризующими протравленную часть трека: зарядом Z , длиной трека L и средней скоростью травления на данном участке травления V_{tr} . Именно эта зависимость использовалась нами в дальнейшем при оценке нижней границы заряда, на рис. 1 она представлена в виде поверхности $Z-L-V$.

Ошибка в определении заряда, связанная с измерениями координат с помощью микроскопа, оборудованного высокоточной механикой [13], не превышает 2 %. Основная неопределённость связана с тем, что полная травимая длина треков превосходит размеры кристаллов. Поэтому точность измерения заряда определяется в основном точностью измерения скорости травления. Результаты определения заряда, полученные на данном этапе исследований, основаны на данных измерений L и V_{tr} треков за 48-часовые интервалы травления. 48-часовой интервал травления был выбран для того, чтобы максимально гарантировать травление всей длины трека в кристалле. При таком большом времени травления скорость травления может оказаться меньше максимальной, определяющей заряд ядра. Контрольное определение Z , проведённое по L и V_{tr} , измеренным за более короткие (12 и 24 ч) промежутки времени, показало, что максимальная величина систематической ошибки ΔZ в сторону её занижения лежит в пределах 4–5 единиц. Поэтому используемый нами подход позволяет на данном этапе, до проведения точных калибровочных экспериментов, определять лишь нижнюю границу Z' оценки точного значения заряда ядер Z , т.е. $Z' \leq Z$; точность определения заряда Z_{-1}^{+5} .

Полученные нами данные по обработке треков ядер в кристаллах оливина согласуются с данными других авторов. В настоящее время измерены характеристики более 6500 треков. На рисунке 2 показано (нормированное на распространённость ядер Fe) зарядовое распределение

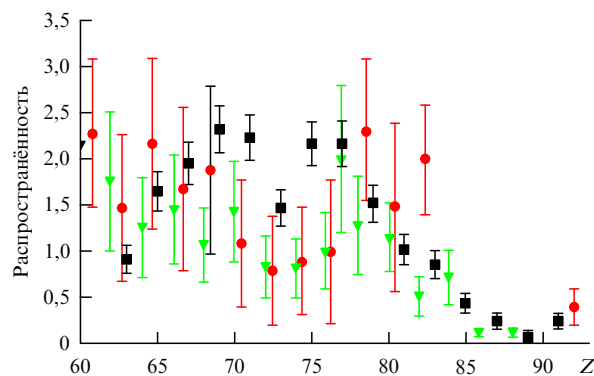


Рис. 2. Распределение ядер по зарядам, полученное нами (квадраты) в сравнении с экспериментальными данными космических аппаратов HEAO-3 (треугольники) [23] и "Ariel-6" (кружки) [22].

треков ядер с $Z > 60$, полученное в данной работе (квадраты) с учётом систематической ошибки $\Delta Z = 5$. Кружками и треугольниками представлены данные [21, 22].

3. Выводы и план работ по продолжению исследований

В настоящее время для определения зарядов ядер по измеренным характеристикам треков разработан пакет программ, в котором одновременно используются измеренные с высокой точностью длина и скорость травления каждого трека. В том числе, определены характеристики 2716 сверхдлинных треков, для которых оценка нижней границы заряда составляет $Z > 50$. В настоящее время обработан объём кристаллов оливина около 0,22 см³. Планируемый объём для обработки — около 5 см³ оливинов из двух метеоритов — Марьялахти и Игл Стейшн.

Для продолжения исследований необходимо проведение калибровочного облучения оливинов на ускорителе тяжёлых ионов ($Z = 50, 82, 92$ и др.) в нескольких диапазонах энергий (50, 260 и 400 МэВ на нуклон) с целью прямой экспериментальной проверки результатов модельных расчётов и использования дополнительных параметров (диаметра) треков для определения заряда. Программа сеансов облучения предварительно согласована с руководством Дармштадтского ускорителя тяжёлых ионов, в 2009 г. уже выполнена калибровка кристаллов оливина на ядрах Au с энергией 11,4 МэВ на нуклон (рис. 3). Расчётная длина треков Au — (75 ± 5) мкм, экспериментальная — (69 ± 6) мкм.

Авторами данной статьи впервые предложено учесть влияние фрагментации тяжёлых ядер. До попадания в кристаллы оливина заряженные частицы проходят некоторое расстояние через железо (4–12 см), из которого в основном состоит метеорит. При этом вследствие процессов взаимодействия налетающих ядер с ядрами мишени и фрагментации зарядовый состав первичного космического излучения изменяется. Одновременно изменяется энергетический спектр вылетающих частиц в результате потерь энергии при прохождении тяжёлых ионов через слой вещества. В настоящее время подготовленный пакет программ для моделирования на базе GEANT4 позволяет получить зарядовые (рис. 4) и энергетические распределения тяжёлых ионов, образу-

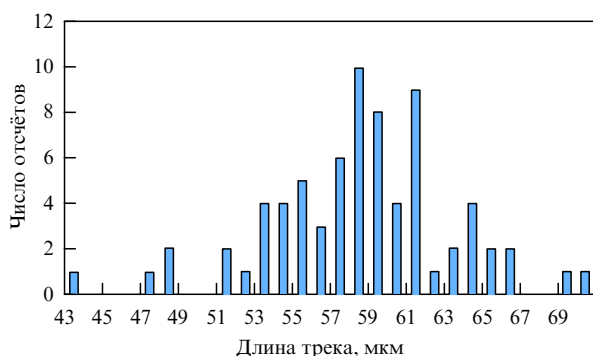


Рис. 3. Распределение длин треков ядер Au с энергией 11,4 МэВ на нуклон.

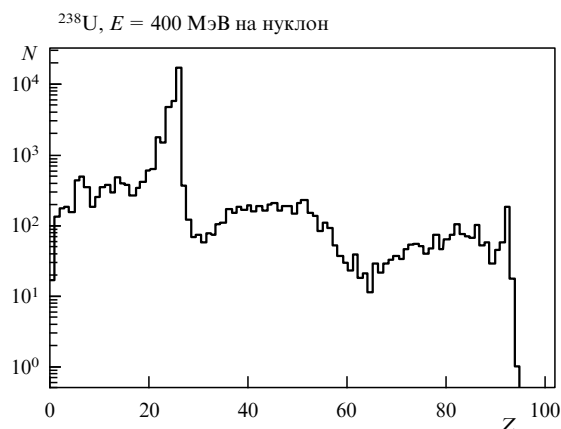


Рис. 4. Модельное зарядовое распределение тяжёлых ионов, обработанных в мишени из железа.

шихся по всей глубине мишени (слоя вещества), а также вылетающих из мишени. Первые полученные результаты показывают, что влияние фрагментации на спектр космического излучения может быть значительным.

4. Заключение

Таким образом, полученные в ходе реализации проекта ОЛИМПИА результаты позволяют утверждать, что изучение треков галактических космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов открывает новые

возможности в исследовании потоков и спектров космических лучей в области тяжёлых и сверхтяжёлых ядер, имеющих большое значение для ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики.

Список литературы

1. Гинзбург В Л (Ред.) *Астрофизика космических лучей* (М.: Наука, 1984) [Ginzburg V L (Ed.) *Astrophysics of Cosmic Rays* (Amsterdam: North-Holland, 1990)]
2. Гинзбург В Л *О физике и астрофизике* (М.: Наука, 1985) [Ginzburg V L *Physics and Astrophysics, A Selection of Key Problems* (Oxford: Pergamon Press, 1985)]
3. Гинзбург В Л *УФН* **169** 419 (1999) [Ginzburg V L *Phys. Usp.* **42** 353 (1999)]
4. Binns W R et al. *Astrophys. J.* **634** 351 (2005)
5. Kodaira S et al. *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A* **78** 138 (2009)
6. Fowler P H et al. *Proc. R. Soc. Lond. A* **301** 39 (1967)
7. Fowler P H et al., in *15th Intern. Cosmic Ray Conf.* Vol. 11 (Budapest: Dept. of Cosmic Rays, Central Res. Inst. for Physics of the Hungarian Acad. of Sci., 1977) p. 165
8. Shirk E K, Price P B *Astrophys. J.* **220** 719 (1978)
9. Перельгин В П, Стеценко С Г *Письма в ЖЭТФ* **32** 622 (1980) [Perelygin V P, Stetsenko S G *JETP Lett.* **32** 608 (1980)]
10. Perelygin V P, Stetsenko S G, Flerov G N, JINR Commun. E-7-85 (1985) p. 5
11. Перельгин В П, Стеценко С Г *Письма в ЖЭТФ* **49** 257 (1989) [Perelygin V P, Stetsenko S G *JETP Lett.* **49** 292 (1989)]
12. Perelygin V P et al. *ЯФ* **66** 1612 (2003) [*Phys. At. Nucl.* **66** 1569 (2003)]
13. Aleksandrov A B et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **535** 542 (2004)
14. Гинзбург В Л и др. *Докл. РАН* **402** 472 (2005) [Ginzburg V L et al. *Dokl. Phys.* **50** 283 (2005)]
15. Александров А Б и др. *Краткие сообщения по физике ФИАН* (7) 19 (2008)
16. Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U *The Stopping and Range of Ions in Solids* (New York: Pergamon Press, 1985)
17. Horn P et al. *Z. Naturforsch. A* **22** 1793 (1967)
18. Егоров В К, Кашкаров Л Л, Полухина Н Г, Царев В А, в сб. *Структура и разнообразие минерального мира: Материалы Междунар. минералогического семинара, Сыктывкар, Респ. Коми, Россия 17–19 июня 2008 г.* (Сыктывкар: Геопринт, 2008) с. 139
19. Александров А Б и др. *ПТЭ* (2) 38 (2009) [Aleksandrov A B et al. *Instrum. Exp. Tech.* **52** 187 (2009)]
20. Hubert F, Bimbot R, Gauvin H *At. Data Nucl. Data Tabl.* **46** 1 (1990)
21. Binns W R et al. *Astrophys. J.* **346** 997 (1989)
22. Binns W R et al. *Astrophys. J.* **297** 111 (1985)

Charge spectrum of galactic cosmic ray nuclei as measured in meteorite olivines

A.B. Aleksandrov, A.V. Bagulya, M.S. Vladimirov, L.A. Goncharova, N.S. Konovalova,

N.M. Okat'eva, N.G. Polukhina, A.S. Rusetskii, N.I. Starkov

P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,

Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation

E-mail: bagulya@lebedev.ru, poluhina@sci.lebedev.ru

A.I. Ivliev, G.V. Kalinina, L.L. Kashkarov

V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences

ul. Kosygina 19, 119991 Moscow, Russian Federation

E-mail: leokash@mail.ru

This paper presents experimental results on galactic cosmic ray nuclei in olivine crystals from Marjalahti and Eagle Station pallasites. The charge spectrum of the nuclei is measured to be in good agreement with the experimental data from the HEAO-3 and ARIEL-6 satellite missions.

PACS numbers: 21.10.Ft, **26.40.+r**, 95.55.Vj, 96.30.Za, 96.50.sb

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201008c.0839

Bibliography — 22 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **180** (8) 839–842 (2010)

Received 24 December 2009, revised 19 May 2010

Physics—Uspekhi **53** (8) (2010)