

УДК 524.1,539.1.05

ЗАРЯДОВЫЙ СПЕКТР СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ПОЛУЧЕННЫЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ОЛИМПИА

А. В. Багуля, М. С. Владимиров, А. Е. Волков, Л. А. Гончарова,
С. А. Горбунов, Г. В. Калинина, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева,
Т. А. Павлова, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, Тан Найнг Со,
М. М. Чернявский, Т. В. Щедрина

В статье представлены последние результаты эксперимента ОЛИМПИА по поиску и изучению следов ядер тяжелых и сверхтяжелых элементов галактического космического излучения в кристаллах оливинов из метеоритов. Получен зарядовый спектр космических лучей в области тяжелых ядер, обнаружено и идентифицировано три сверхтяжелых ядра природного происхождения с зарядами в диапазоне $105 < Z < 130$ и временем жизни более 3000 лет, входящих в состав так называемого “острова стабильности”.

Ключевые слова: сверхтяжелые ядра, галактические космические лучи, метеорит, оливин, ОЛИМПИА, трек, травление, трековый детектор, ПАВИКОМ, методы распознавания образов, автоматизированная обработка трековых детекторов.

Измерение потоков и спектров тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах является чувствительным способом изучения состава источников космических лучей, процессов, происходящих как в самих источниках, так и в межзвездной среде, а также является экспериментальной основой для построения моделей удержания космических лучей в галактике. Поиск в составе этих лучей трансфермиевых ядер с зарядами $Z \geq 100$ является одной из наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики [1].

Уникальными природными детекторами для наблюдения тяжелых и сверхтяжелых ядер космического происхождения являются железосодержащие метеориты класса палла-

ситов, представляющие собой пористую матрицу из никелистого железа с включениями кристаллов оливина $((\text{Mg}, \text{Fe})_2[\text{SiO}_4])$. Уникальность этих природных детекторов заключается в длительном времени их экспозиции в космическом пространстве: в составе космических лучей необычайно мало сверхтяжелых ядер, и поэтому для регистрации даже нескольких подобных событий надо располагать либо установкой гигантской площади, либо очень продолжительным временем экспозиции. Метеориты удовлетворяют второму требованию.

Возраст используемых в настоящей работе палласитов (Marjalahti и Eagle Station) составляет, по различным оценкам, от 30 до 200 миллионов лет. Разделяют 1) – возраст метеоритного вещества (радиографический) и 2) космический возраст метеоритов (CRE):

1) Возраст вещества (радиографический) определяется радиометрическим методом с использованием масс-спектрометров. Определяется какая доля некоторого изотопа (“свинец – свинец” или “рубидий 87 – стронций 87”) успела распасться за время существования метеорита. По этой величине, зная период полураспада данного изотопа, можно рассчитать возраст образца. Абсолютный возраст практически всегда идентичен для всех метеоритов: $(4.566 \pm 0.005) \cdot 10^9$ лет.

2) Космический или радиационный возраст (CRE – “cosmic-ray exposure”) отсчитывается от момента разрушения родительских планет и выделения метеоритов как отдельных космических тел. Космические лучи действуют на тело, некоторые ядра в атомах вещества расщепляются, и в образце накапливаются продукты ядерных реакций, количество которых можно установить в лабораторных условиях. Возраст определяют по содержанию космогенных изотопов, образованных в веществе метеоритов под действием космических лучей.

Таким образом, космический возраст используемых в настоящей работе метеоритов: Marjalahti 178-205 миллионов лет; Eagle Station 35-71 миллионов лет.

Физико-химические свойства оливина таковы, что при прохождении через кристалл заряженной частицы, обладающей зарядом $Z > 20$ и энергией несколько ГэВ/нуклон, вдоль ее траектории формируется канал области структурно-фазовых изменений [2]. Скорость растворения материала в этой области специальным многокомпонентным химическим раствором значительно выше скорости растворения неповреждённого материала, что позволяет “проявлять” треки ядер [3] и делает их видимыми в полупрозрачном оливине на оптическом микроскопе.

Т а б л и ц а 1

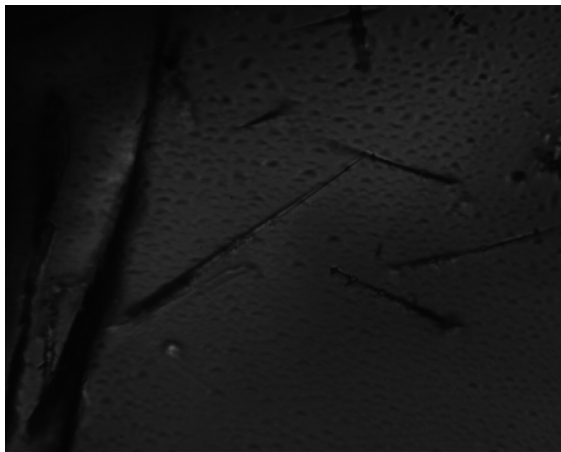
Возраст метеоритов Marjalahti и Eagle Station, радиографический и космический

Публикация	Изотоп	Marjalahti	Eagle Station
1. Т.Р. Zholud' L.K. Levskii, D. Lkhagvansuren, et al., On Preatmospheric Sizes of the Lipovsky Khutor Meteorite, Meteoritika, 1980, no.39, pp. 85-89	^3He	CRE 205×10^6 лет	
	^{21}Ne	CRE 204×10^6 лет	
	^{38}Ar	CRE 178×10^6 лет	
2. G.H. Megrue, Rare Gas Chronology of Hypersthene Acondrites and Pallasites, J. Geophys Res., 1968, vol. 73, pp. 2027-2033	^3He		CRE 47×10^6 лет
	^{21}Ne ^{38}Ar		CRE 35×10^6 лет CRE 51×10^6 лет
		CRE 178×10^6 лет	
3. S. Niemeyer, I-Xe and ^{40}Ar - ^{39}Ar Analyses of Silicate from the Eagle Station Pallasite and Anomalous Iron Meteorite Enon, Geochim. Cosmochim. Acta, 1983, vol. 47, pp. 1007–1012	^{38}Ar		CRE 58×10^6 лет
			Радио- графический возраст 0.86×10^9 лет
4. P. Pellas, C. Perron, G. Crozas G., et al., Fission Track Age and Cooling Rate of the Marjalahti Pallasite, Earth Planet. Sci. Lett., 1983, vol. 64, pp. 319–326		Радиографический возраст $(4.30) \times 10^9$ лет	
5. Yu.V. Bondar, V.P. Perelygin, Fision-track analysis of meteorites: Dating of the Marjalahti pallasite, Radiational Measurements, 40 (2005) 522–527		Радиографический возраст (Pu/U) $(4.32 \pm 0.02) \times 10^9$ лет	

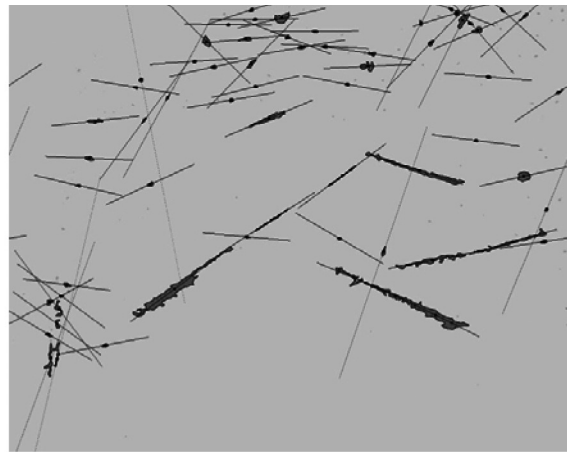
Т а б л и ц а 1 (продолжение)

6. G.F. Herzog, D.L. Cook, M. Cosarinsky, L. Huber, I. Leya, and J. Park, Cosmic-ray exposure ages of pallasites, Meteoritics & Planetary Science 50, No 1, 86-111 (2015) doi: 10.1111/maps.12404	$^{36}\text{Ar}/^{36}\text{Cl}$	CRE $(185 \pm 19) \times 10^6$ лет	CRE $(43 \pm 5) \times 10^6$ лет
	$^{21}\text{Ne}/^{10}\text{Be}$		CRE $(40 \pm 11) \times 10^6$ лет
	$^{38}\text{Ar}/^{10}\text{Be}$		CRE $(48 \pm 13) \times 10^6$ лет
	$^{38}\text{Ar} / ^{21}\text{Ne}$		CRE $(71 \pm 5) \times 10^6$ лет
	Оливин	CRE $(182 \pm 27) \times 10^6$ лет	CRE 35×10^6 лет

Эти структурные изменения и разлёт быстрых электронов, генерируемых в результате взаимодействия налетающей частицы с электронной подсистемой материала, стимулируют возникновение области повышенной химической активности оливина (упругие и дефектные поля, дефектные межатомные связи и т.д.) на расстояниях до 1–5 мкм от траектории тяжёлого ядра. Эти изменения сохраняются в кристаллах оливина в течение сотен миллионов лет.



(а)



(б)

Рис. 1: Изображение одного поля зрения микроскопа 300×400 мкм (а) и результат компьютерной обработки программой для распознавания образов треков (б).

В течение последних 10 лет в ФИАНе осуществляется эксперимент ОЛИМПИА (ОЛИвины из Метеоритов – Поиск тяжелых и сверхтяжелых Ядер) [4], в котором для

просмотра образцов метеоритного оливина с целью поиска и измерения параметров треков тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей используется современный универсальный измерительный комплекс ПАВИКОМ [5–9]. Методика исследования основана на регистрации и измерении динамических и геометрических параметров треков – химически травимых участков следов торможения этих ядер с $Z > 40$ перед их остановкой в кристаллах оливина.

Основными измеряемыми после химического травления кристаллов оливина геометрическими характеристиками треков тяжелых ядер являются полная травимая длина L и диаметр D . Измерения производятся методом последовательного среза и травления исследуемых кристаллов, который позволяет производить поиск треков во всем объеме кристалла. На рис. 1 приведен пример травимой поверхности кристалла оливина с треками тяжелых ядер галактических космических лучей (ГКЛ) – наблюдаемое стандартное поле зрения в оптическом микроскопе (рис. 1(а)), и результат обработки этого кадра – распознавание треков с помощью оригинального программного пакета (рис. 1(б)).

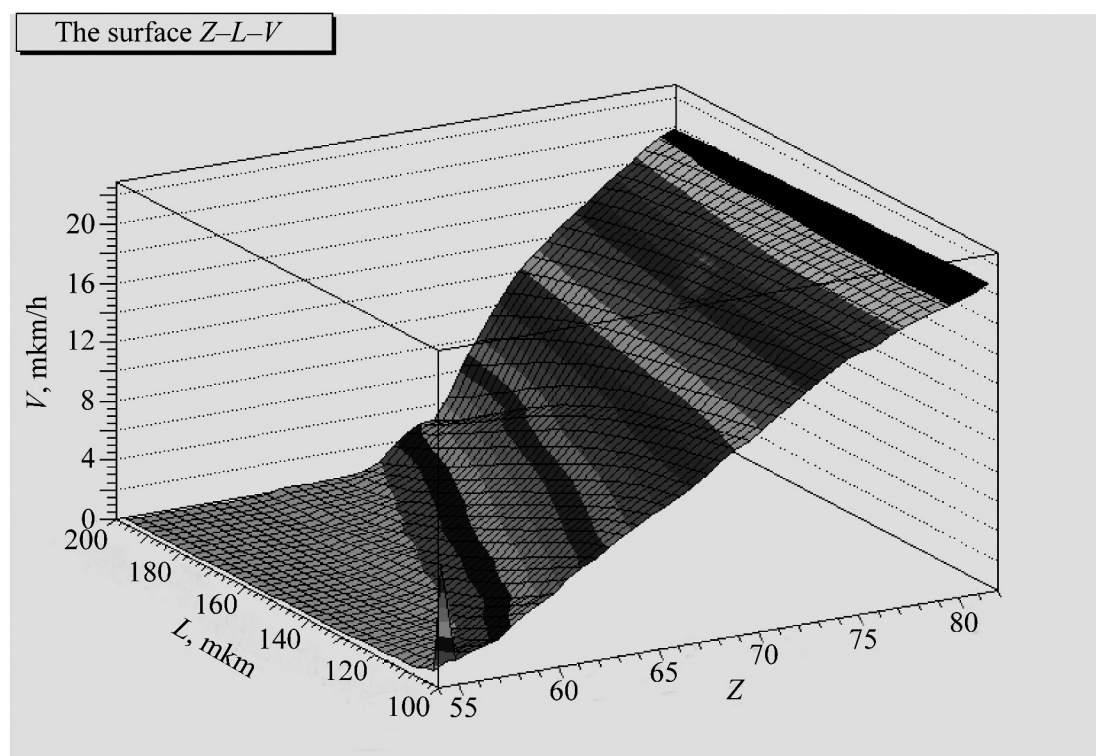


Рис. 2: Зависимость между величинами травимой длины трека (L), скоростью травления трека в длину (V) и зарядом ядра (Z) (поверхность Z - L - V).

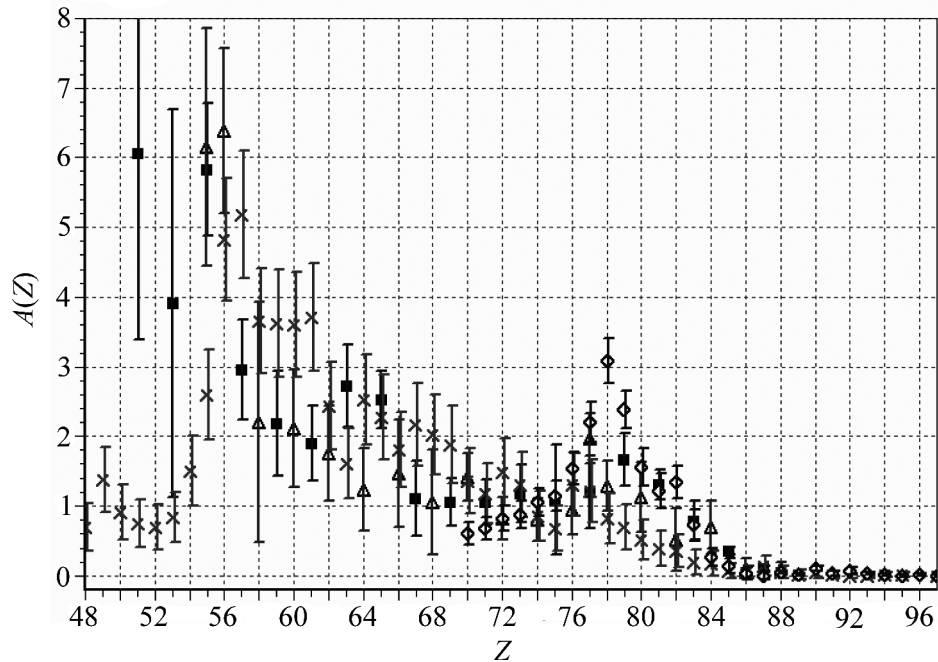


Рис. 3: Зарядовый спектр ядер, зарегистрированных в эксперименте ОЛИМПИА (кресты) в сравнении с результатами других экспериментов: HEAO-3 (квадраты) [10] ARIEL-6 (треугольники) [11] и UHCRE (ромбы) [12].

Измеренная длина протравленного участка трека и скорость травления на этом участке позволяют, с использованием результатов калибровочных экспериментов, оценить заряд ядра, сформировавшего анализируемый трек. Зависимость скорости травления V от L и Z может быть представлена в виде поверхности, изображенной на рис. 2. Представленная зависимость была получена на основе многочисленных калибровочных экспериментов с последующей экстраполяцией в область больших значений Z .

Для повышения точности определения зарядов ядер, а также определения пространственно-временных зависимостей плотности ионизированных состояний, в рамках проекта осуществляется программа калибровочных облучений на ускорителях тяжелых ионов в Германии и Китае. В частности, в 2013 году кристаллы оливина были облучены ядрами Bi с энергиями 2.5 и 4.3 МэВ/нуклон (Ланчжоу, HIRFL – Heavy Ion Research Facility in Lanzhou), 11.1 МэВ/нуклон (Дармштадт, GSI-Gesellschaft für Schwerionenforschung). Параметры треков измерены на ПАВИКОМ, результаты калибровки с подробным анализом готовятся к публикации. С целью проверки результатов модельных расчетов фрагментации тяжелых ядер в оливине выполнено облучение кристаллов оливина ядрами U с энергией 400 МэВ/н, в настоящее время проводится об-

работка полученных данных. Проведенные калибровочные измерения подтверждают правильность выполненных расчетов, используемых при идентификации зарядов ядер.

Предложенная методика поиска и идентификации заряда тяжелых ядер галактических космических лучей позволила получить данные по 11642 трекам ядер с зарядами $Z > 48$ в кристаллах оливина из метеоритов Marjalahti и Eagle Station. На основе полученных данных был построен график относительной распространенности $A(Z)(A(26) = 10^6)$, который представлен на рис. 3 вместе с данными со спутниковых экспериментов. Сравнение данных демонстрирует хорошее согласие.

В числе обработанных треков идентифицировано 384 трека, заряд которых оценивается как $Z \geq 75$, т.е. соответствующие ядра могут относиться к долгоживущим сверхтяжелым элементам, поиск которых в космических лучах является одной из основных задач проекта. Обнаружены и идентифицированы три ядра с зарядами в диапазоне $105 < Z < 130$ и временем жизни более 3000 лет. Выполненный регрессионный анализ позволил уточнить оценку заряда одного из этих трех ядер – он равен $119(+10, -6)$ с вероятностью 95%. Именно такие ядра должны образовывать “остров стабильности”. Обнаружение подобных ядер в природе подтверждает адекватность теоретических предсказаний и оправдывает усилия по синтезу сверхтяжелых элементов в земных условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 13-02-12020.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Л. Гинзбург, УФН **169**, 419 (1999)
- [2] G. Szenes, V. K. Kovacs, B. Pecsz, et al. *Astrophys. J.* **708**, 288, (2010).
- [3] Р. Л. Флейшер, П. Б. Прайс, Р. М. Уокер, *Треки заряженных частиц в твердых телах, в 3-х частях* (М., Энергоатомиздат, 1981).
- [4] В. Л. Гинзбург, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков и др., ДАН **402**(4), 472 (2005).
- [5] A. V. Aleksandrov, I. Yu. Apacheva, E. L. Feinberg, et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **535**, 542 (2004).
- [6] А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(5), 28 (2013).
- [7] А. Б. Александров, М. С. Владимиров, Н. Г. Полухина и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(9), 38 (2012).
- [8] Н. Г. Полухина, УФН **182**(6), 656, (2012).

- [9] A. B. Aleksandrov, N. G. Polukhina, and N. I. Starkov, “Astrophysics”, (In Tech, Pucka (Хорватия), 2012).
- [10] W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner, et al., *Astrophys. J.* **346**, 997, (1989).
- [11] O’Sullivan, A. Thompson, C. Domingo, et al., *Nucl. Track and Rad. Meas.* **15**, 673, (1988).
- [12] J. Donnelly, A. Thompson, D. O’Sullivan, et al., *Astrophys. J.* **747**, 40 (2012).

Поступила в редакцию 6 апреля 2015 г.