

УДК 524.1, 539.1.05, 550.42

ПОИСК “ОСТРОВА СТАБИЛЬНОСТИ” СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР С ПОМОЩЬЮ ПРИРОДНЫХ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

В. А. Алексеев¹, А. В. Багуля², А. Е. Волков², А. А. Гипшиус², Л. А. Гончарова²,
С. А. Горбунов², Г. В. Калинина¹, Н. С. Коновалова², Н. М. Окальева², Т. А. Павлова¹,
Н. Г. Полухина^{2,3}, Н. И. Старков², Тан Найнг Сое², М. М. Чернявский², Т. В. Щедрина²

Метод использования природных трековых детекторов – кристаллов метеоритного оливина – развит и усовершенствован применительно к задаче поиска в природе, в составе галактических космических лучей (ГКЛ), сверхтяжелых ядер. В новой методике реализована последовательность операций травления, сошлифовки и идентификации треков с использованием автоматизированного комплекса ПАВИКОМ. Данные о длине трека и скорости его травления в сочетании с результатами калибровки на ускорителях тяжелых ядер позволили создать методику определения заряда ядра ГКЛ с точностью ± 2 единицы. На этой основе получен значительный объем экспериментальных данных о сверхтяжелых ядрах природного происхождения (21743 тяжелых ядра ГКЛ с $Z > 20$, в том числе три ядра с зарядом 119_{-6}^{+10}). Минимальное время жизни T_{\min} последних лежит в пределах $50 \text{ лет} < T_{\min} < 100 \text{ лет}$, что на много порядков превосходит время жизни трансфермиевых ядер, синтезированных на ускорителях. Обнаруженные в спектре ГКЛ долгоживущие сверхтяжелые ядра могут принадлежать к области “острова стабильности”.

Ключевые слова: природный трековый детектор, метеорит, оливин, сверхтяжелые ядра, распознавание образов, галактические космические лучи, острова стабильности.

¹ ГЕОХИ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Косыгина, 19.

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

³ МИСиС, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4.

Одной из наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики является поиск в природе трансфермиевых ядер с зарядами $Z > 100$. Теория атомного ядра предсказывает образование очень тяжелых ядер за счет стабилизирующего эффекта ядерных оболочек [1]. Такие сверхтяжелые ядра с продолжительным временем жизни должны существовать в пределах так называемых “островов стабильности”. Эти ядра до сих пор не наблюдались в природе. В настоящее время все ядра с зарядами, большими заряда урана ($Z > 92$), синтезированы искусственно.

Успешные эксперименты по синтезу в лабораторных условиях долгоживущих ядер с атомными номерами больше 100 стимулировали поиск трансфермиевых элементов в природе, прежде всего, в составе галактических космических лучей (ГКЛ). Последние могут возникать в областях Вселенной, где существуют экстремальные состояния вещества и идут процессы эволюции материи, давно завершившиеся в пределах Солнечной системы.

В многочисленных экспериментах по поиску сверхтяжелых ядер в составе ГКЛ с использованием аэростатов или искусственных спутников Земли было зарегистрировано в общей сложности всего несколько десятков событий с $Z > 86$ и совсем небольшое число ядер, относящихся к области трансурановых элементов. Причина в том, что регистрация тяжелых элементов в составе космических лучей чрезвычайно затруднена ничтожностью величин потоков тяжелых ядер в околоземном пространстве ($\sim 1-2 \text{ nucl.}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$). Известно, что поток ядер сверхтяжелых элементов (групп свинец-висмут и торий-уран) более чем на 10 порядков слабее потока ядер водорода.

Природные детекторы ГКЛ, проект ОЛИМПИА. В середине 60-х годов прошлого века был предложен метод изучения потоков и спектров тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах с помощью природных детекторов – железокремнистых метеоритов класса палласитов, которые представляют собой пористую матрицу из никелистого железа с включениями кристаллов оливина [2, 3]. За сотни миллионов лет экспозиции в космическом пространстве кристаллы оливина подвергаются облучению первичными космическими лучами, в том числе тяжелыми и сверхтяжелыми ядрами, сопровождаемому радиационно-стимулированными стабильными изменениями структуры этих кристаллов, т.е. образованием треков. По сравнению с другими экспериментами по поиску тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах, использование метеоритов позволяет весьма существенно увеличить эффективность поиска и идентификации ядер. Г. Н. Флеров оценил, что при возрасте метеорита, составляющем сотни миллионов лет, исследование 1 см^3 метеоритного оливина эквивалентно облучению 1–2 т фотоэмульсии

в космическом пространстве в течение 1 года. Важно, что кристаллы оливина способны регистрировать и сохранять в течение сотен миллионов лет следы прохождения (треки) ядер с зарядами $Z > 24$. Оптические свойства кристаллов оливина (их полупрозрачность) позволяют наблюдать эти треки под оптическим микроскопом после их обработки специальными химическими растворами. Устойчивость оливинов позволяет также сохраняться трекам и при относительно высокой температуре 110 ± 1 °С в процессе травления в кипящем растворе травителя в течение нескольких десятков часов (рис. 1).

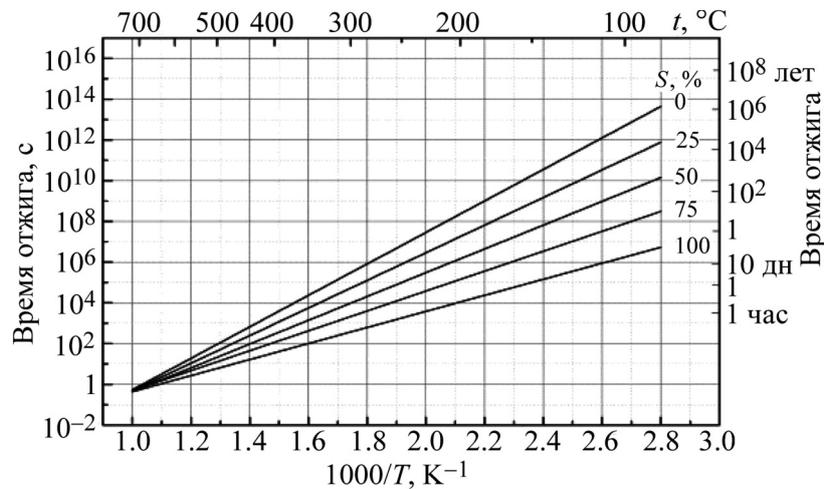


Рис. 1: Сохранность треков (S , %) при отжиге в оливине палласита Eagle Station [2].

В настоящее время поиск треков ГКЛ в оливинах проводится авторами в рамках эксперимента ОЛИМПИА (ОЛИвины из Метеоритов – Поиск тяжелых И сверхтяжелых Ядер) [5, 6]. В исследованиях, проводимых группой сотрудников ФИАН и ГЕОХИ РАН [7], анализируются треки в кристаллах оливина из палласитов Marjalahti и Eagle Station.

Методика исследования основана на регистрации и измерении динамических и геометрических параметров треков – химически травимых участков торможения ядер ГКЛ перед их остановкой в кристаллах оливина. С этой целью для просмотра образцов метеоритного оливина используется современный универсальный измерительный комплекс ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс) [8]. Этот комплекс позволяет в автоматическом режиме решать проблемы распознавания треков частиц, определения их геометрических параметров и сшивки следов при переходе из слоя в слой протравленного оливина. При травлении треков в очередном слое производится процедура его совмещения или сшивки с предыдущим слоем. Для этого

используются реперные координатные метки и прослеживаемые на глубину кристалла, превышающую толщину данного среза, длиннопробежные треки ядер ГКЛ. Полная длина таких треков суммируется после проведения нескольких этапов “травления–измерения–среза–полировки”. Для совмещения таких треков, представляющих собой разные участки одного и того же трека, требуется построение точной схемы ориентации всех исследуемых треков в объеме кристалла, что может быть выполнено только на основе измеренных для каждого из них координат (X , Y , Z) и углов наклона относительно плоскости поверхности травления. Эти данные получаются с помощью специальной программы измерений, проводимых на измерительном комплексе ПАВИКОМ. Сопоставление величин скорости травления длиннопробежных треков, измеренных на первом этапе травления, со значениями скорости травления тех же треков относительно новой поверхности второго этапа позволяет получать наиболее точные результаты по идентификации зарядов ядер.

Поэтапно проводимые последовательные операции “шлифовка–травление–просмотр/регистрация” треков в сочетании с удалением изученных слоев травимой поверхности позволяют проводить: а) наблюдение и фиксацию пространственной ориентации треков в объеме каждого кристалла; б) фиксацию момента окончания травления трека в точке останова ядра; в) определение величины скорости травления V_{TR} на разных участках выявленных и поэтапно прослеживаемых треков; г) использование практически полного объема исследуемых кристаллов.

Геометрические параметры треков зависят от заряда частицы, след которой изучается: чем выше у частицы заряд, тем длиннее будет ее трек. Однако, как правило, метеоритные кристаллы оливина небольшие, всего несколько миллиметров, длина трека тяжелого ядра чаще всего гораздо больше, поэтому оценку заряда ядра выполняют с учетом дополнительной информации о скорости травления разных участков трека.

Зависимость геометрических параметров и скорости травления треков от заряда частицы позволяет провести идентификацию заряда. Длина треков характеризует участок пути торможения заряженной частицы, на протяжении которого вокруг траектории движения частицы формируется эффективно травимая зона радиационных микронарушений кристаллической решетки. В рамках подхода, разработанного авторами проекта ОЛИМПИА, в качестве второй основной характеристики протравленных треков, используемой для идентификации заряда ядер, привлекается скорость травления треков в длину. Величина скорости травления различных участков треков не остается постоянной, что позволяет определять заряды частиц с использованием калибровоч-

ных данных о соотношении между скоростью травления треков при разных величинах остаточного пробега ядер и зарядом этих ядер [7].

В процессе исследований было установлено, что полностью протравленные треки-каналы, образовавшиеся при прохождении высокоэнергичных тяжелых ядер, имеют ярко выраженную форму “шприца” и состоят из двух основных частей – конусообразной и цилиндрической. Величина скорости травления на разных участках трека изменяется существенным образом, возрастая в среднем в 5 раз при переходе от конусообразной зоны трека к его основной цилиндрической части. Если за величину остаточной длины пробега RR принять длину пути торможения ядра с зарядом Z и исходной энергией E от начальной точки траектории его движения до полной остановки, то зависимость скорости травления треков в длину (V) от заряда Z и остаточной длины пробега ядер RR может быть представлена как в двумерном (отдельные кривые зависимости V от RR для каждого ядра), так и в трехмерном виде (в виде поверхности, указывающей зависимость V и RR от Z). Разработанная методика определения величины заряда основана на проведении двумерной интерполяции поверхности $Z(RR, V)$, построенной по экспериментально измеренным значениям величин скорости травления V и остаточной длины пробега ядер RR для травимых треков [7].

Результаты исследований. Общий объем статистических данных, полученных при обработке кристаллов оливина из метеорита Marjalahti и Eagle Station в настоящее время составил 21743 трека ядер с $Z > 20$. На основе полученных экспериментальных данных был построен график относительной распространенности $A(Z)$ ядер с $Z \geq 48$ (данные нормированы на содержание ядер железа $A_{(26\text{Fe})} = 10^6$), представленный на рис. 2 в сравнении с результатами крупнейших спутниковых экспериментов по регистрации тяжелых ядер. Сопоставление данных демонстрирует хорошее согласие в пределах ошибок измерений.

В эксперименте ОЛИМПИА были обнаружены три сверхдлинных трека, длина которых составила более 500 мкм, а скорость травления V превысила 35 мкм/час [7]. Если учесть, что экспериментально измеренная максимальная величина скорости травления треков для ядер урана в оливине перед их остановкой равна $V_U = 26 \pm 1$ мкм/час, то становится ясно, что заряды этих ядер существенно превышают заряд урана. Так как в этой области зарядов значения функции $(Z - V - RR)$ неизвестны, то для предварительной оценки заряда была произведена экстраполяция этой зависимости из области известных калибровочных ядер в область трансфермиевых ядер. Выполненный регрессионный анализ [12] позволил уточнить оценку заряда трех зарегистрированных

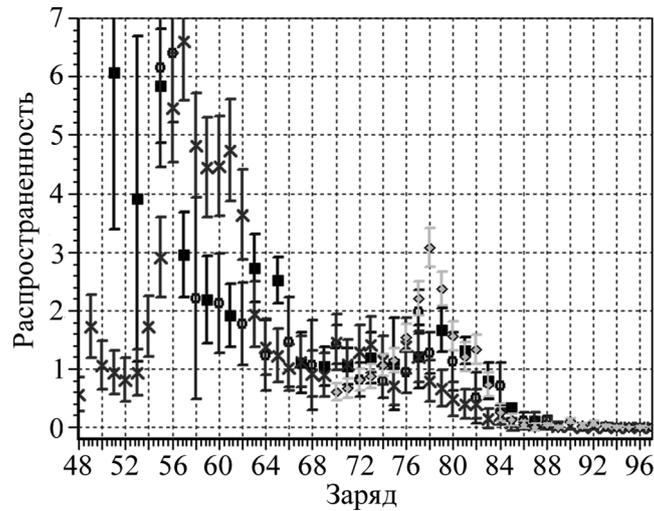


Рис. 2: Относительная распространенность тяжелых ядер ГКЛ, зарегистрированных в эксперименте ОЛИМПИА (кресты), в сравнении с результатами других экспериментов: HEAO-3 (квадраты) [9], ARIEL-6 (ромбы) [10] и UHCRE (круги) [11].

ультратяжелых ядер галактических космических лучей, оказавшегося равным 119_{-6}^{+10} с вероятностью 95%. Согласно оценке [7] минимальное время жизни таких ядер T_{\min} лежит в пределах $50 \text{ лет} < T_{\min} < 100 \text{ лет}$, что на много порядков превосходит время жизни трансфермиевых ядер, синтезированных на ускорителях (при синтезе ядер на ускорителях невозможно достижение таких плотностей энергии, как в астрофизических процессах).

Заключение. В развитие метода использования природных трековых детекторов (кристаллов метеоритного оливина) авторами впервые предложена и успешно реализована оригинальная идея поиска и идентификации треков галактических космических лучей путем последовательных стадий “травления оливина” – “поиска и идентификации треков ядер” – “сошлифовки протравленного и обработанного слоя” – “травления оливина” – “поиска новых и продления обнаруженных ранее треков ядер” с использованием автоматизированного измерительного комплекса ПАВИКОМ.

Данные о длине трека и скорости его травления в сочетании с результатами калибровки на ускорителях тяжелых ядер позволили создать методику определения заряда ядра ГКЛ с точностью ± 2 единицы. На основе этой методики получен значительный объем экспериментальных данных о сверхтяжелых ядрах природного происхождения, набор данных продолжается. Объем данных – 21743 тяжелых ядра ГКЛ ($Z > 20$), включающий три ядра с зарядом 119_{-6}^{+10} , позволяет оценить этот банк данных как са-

мый большой из существующих. Результаты работы по проекту являются весомым вкладом в мировую статистику экспериментов по поиску сверхтяжелых ядер в природе и позволяют сделать вывод об их существовании и распространенности в природе. Таким образом, результаты ОЛИМПЦИИ, как и других авторов, подтвердили наличие в зарядовом спектре ГКЛ сверхтяжелых ядер, которые могут принадлежать к области “острова стабильности”.

Авторы благодарят академика Ю. Ц. Оганесяна за постоянный интерес и поддержку исследований.

Работа частично поддержана Программой № 7 фундаментальных исследований Президиума РАН и договором ФИАН № Р317-П49-2017/2065.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Goerpert Mayer, *Science* **145**, 999 (1964).
- [2] R. L. Fleischer, P. V. Price, R. M. Walker, et al., *Journal of Geophysical Research* **72**(1), 355 (1967).
- [3] Г. Н. Флеров, О. Отгонсурен, В. П. Перельгин, *Известия АН СССР* **39**(2), 388 (1975).
- [4] J. N. Goswami, R. Jha, D. Lal, *Earth and Planetary Science Letters* **71**, 120 (1984).
- [5] V. L. Ginzburg, E. L. Feinberg, N. G. Polukhina, et al., *Doklady Physics* **50**, 283 (2005).
- [6] Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, *Письма в ЖЭТФ* **97**(12), 811 (2013).
- [7] V. A. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, et al., *The Astrophysical Journal* **829**(2), 120 (2016).
- [8] А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., *Успехи физических наук* **180**(8), 839 (2010).
- [9] W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner, et al., *The Astrophysical Journal* **346**, 997 (1989).
- [10] D. O’Sullivan, A. Thompson, C. Domingo, et al., *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* **15**, 673 (1988).
- [11] J. Donnelly, A. Thompson, D. O’Sullivan, et al., *The Astrophysical Journal* **747**, 1 (2012).
- [12] А. В. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров, et al., *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **77**(11), 1343 (2013).

Поступила в редакцию 20 октября 2017 г.