Письма в ЖЭТФ, том 97, вып. 12, с. 811 – 824 

*ПО ИТОГАМ ПРОЕКТОВ*
*РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ*
*Проект РФФИ # 10-02-00375а*

# Поиск сверхтяжелых элементов в галактических космических лучах

*А. В. Багуля, Л. Л. Кашкаров+, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Н. Г. Полухина[1)], Н. И. Старков*

*Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

*+Институт геохимии и аналитической химии им. Вернадского РАН, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 15 мая 2013 г.

В ходе выполнения проекта ОЛИМПИЯ получено зарядовое распределение примерно 6000 ядер с зарядами более 55 в составе галактических космических лучей. Обнаружены три ультратяжелых ядра, заряд которых находится в диапазоне $105 < Z < 130$. Выполненный регрессионный анализ позволил уточнить оценку заряда одного из них ($119^{+10}_{-6}$ с вероятностью 95%). Именно такие ядра должны образовывать острова стабильности. Их обнаружение в природе подтверждает справедливость теоретических предсказаний и оправдывает усилия по их синтезу в земных условиях. Модельные расчеты, выполненные в рамках данной работы, возможно, могут дать объяснение результатов некоторых экспериментов по исследованию зарядового состава космических лучей, в которых были зарегистрированы частицы с зарядом в интервале $94 < Z < 100$ (они не могут входить в состав первичного космического излучения в силу их очень малого времени жизни). Выполненные расчеты позволяют говорить о том, что события с $Z > 92$ не появляются из-за методических неточностей или сбоя в работе аппаратуры, а являются результатом фрагментации более тяжелых ядер из области "острова стабильности". Обнаружено несколько таких событий. Таким образом, трековая методика дает возможность получать чрезвычайно важные для понимания физической картины мира результаты. Полученные в ходе реализации проекта ОЛИМПИЯ 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 тяжелых и сверхтяжелых ядер.

DOI: 10.7868/S0370274X13120114

**Введение.** Исследование космических лучей имеет долгую историю. Первое указание на существование неизвестного источника ионизации чистого воздуха появилось еще в 1900 г. [1]. В 1912 г. Гесс [2] обнаружил, что степень ионизации воздуха быстро растет с высотой над уровнем моря, и выдвинул предположение о внеземном происхождении такого эффекта. Однако прошло еще более 10 лет, прежде чем эта идея получила признание, и более 20 лет, прежде чем ее автору была вручена Нобелевская премия. Такая высокая оценка не является случайной и свидетельствует о важности сделанного открытия. По сути, было обнаружено, что Земля пронизывается мощными потоками элементарных частиц и ядер, несущими информацию о процессах на Солнце и в космосе. Эта информация до сих пор играет существенную роль при проверке астрофизических моделей образования и эволюции звезд и галактик.

Помимо астрофизических задач, исследования космических лучей вносят большой вклад в решение проблем физики элементарных частиц и ядерного взаимодействия при высоких энергиях. В составе космических лучей впервые были обнаружены позитрон, мюоны, пионы, $K^+$- и $K^0$-мезоны, $\Lambda^0$-, $\Sigma^+$- и $\Xi$-гипероны. Продолжаются поиски экзотических частиц: монополей Дирака, частиц темной материи, странглетов, аксионов и т.д. Долгое время космические лучи находились на передовой линии исследований по физике высоких энергий, опережая ускорительные методы и двигаясь по шкале энергий все дальше и дальше по мере развития ускорителей. К настоящему времени в космических лучах обнаружены частицы с энергией вплоть до $10^{20}$ эВ. Особую

1) e-mail: poluhina@sci.lebedev.ru

роль играют исследования, направленные на изучение распространенности химических элементов в составе космических лучей как в области легких (начиная с водорода и гелия), так и в области тяжелых ($Z > 20$) и сверхтяжелых ($Z > 50$) ядер. При этом особое значение имеют исследования ядер ультратяжелой ($82 \leqslant Z \leqslant 92$) компоненты. Регистрация тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах и поиск среди них трансфермиевых ядер с зарядами $Z \geqslant 100$ принадлежат к числу наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики [3].

Вопрос о существовании сверхтяжелых ядер имеет важнейшее значение для понимания свойств ядерной материи. Прежде всего представляет интерес проверка предсказания [4] значительного увеличения стабильности ядер вблизи магических чисел $Z = 114$ и $N = 184$ (где $N$ – число нейтронов), которое могло бы приводить к существованию в этой области "островов стабильности" сверхтяжелых ядер.

Подтверждения этого предсказания были получены в экспериментах под руководством Г.Н. Флерова и Ю.Ц. Оганесяна на ускорителе лаборатории ядерных реакций ОИЯИ [5]. В них были открыты ядра элементов со 105-го по 118-й. Время жизни некоторых из этих ядер составляет несколько секунд, и даже минут. Оно в десятки тысяч раз превышает время жизни ядер с меньшим зарядом.

Несмотря на этот успех, дальнейший поиск сверхтяжелых элементов в природе, в первую очередь в составе космических лучей, сохраняет свою актуальность. Дело в том, что эксперименты на ускорителях позволяют создавать изотопы ядер, находящиеся вблизи зоны стабильности. Такие изотопы имеют время жизни, достигающее в лучшем случае минуты. Оно на много порядков больше, чем у ядер, находящихся в зоне нестабильности ($92 < Z < 100$), но на много порядков меньше времени, которое согласно теоретическим оценкам должны иметь ядра в зоне "островов стабильности". Результаты экспериментов, проведенных на ускорителе ОИЯИ, стимулируют продолжение поиска и регистрации трансфермиевых ядер в природе путем исследования прежде всего космических лучей. Необходим поиск других возможных изотопов сверхтяжелых ядер. Если закономерности, основанные на теоретическом представлении о магических числах протонов и нейтронов в ядрах, продолжают быть существенными и для очень больших значений $Z$ и $N$, то не исключена вероятность существования "островов стабильности" для еще более тяжелых ($Z > 118$) ядер. Можно предположить, что для поиска и обнаружения таких сверхтрансфермиевых ядер использование космического излучения является одним из наиболее целесообразных путей.

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, в которой распространяются космические лучи, а также построения моделей удержания космических лучей в галактике. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные по распространенности сверхтяжелых ядер ($Z > 50$) во Вселенной, а также по энергетическим спектрам и потокам этих ядер в космических лучах весьма ограничены. Для трансфермиевых ядер достаточно надежные экспериментальные данные вообще отсутствуют. Также отсутствуют какие-либо данные и о возможном существовании экзотических сверхтяжелых ядер.

Согласно существующим представлениям элементы от углерода и далее по мере увеличения атомного веса образуются в недрах звезд и при взрывах сверхновых [3]. Сверхтяжелые элементы, находящиеся в Таблице Менделеева за висмутом, образуются в результате r-процессов (от *rapid*), которые происходят при достаточно высокой концентрации нейтронов (более $10^{20}\,\text{см}^{-3}$). При этом могут образовываться ультратяжелые ядра с числом нейтронов вплоть до $N = 184$. Кроме этих традиционных механизмов рассматривается возможность образования еще более тяжелых ядер (с массовым числом до 500), когда плотность нейтронов достигает порядка $10^{30}\,\text{см}^{-3}$, а температура $T < 10^8\,\text{К}$ [6]. Такая ситуация может реализоваться в неравновесных оболочках нейтронных звезд, выбросы из которых приведут к появлению в межзвездной среде ультрасверхтяжелых элементов [7].

**Теоретические представления о распространенности сверхтяжелых элементов во Вселенной.** Рассмотрим более детально проблему образования сверхтяжелых элементов в процессах, происходящих во Вселенной, на примере последних результатов, полученных в оболочечной модели строения ядер [8]. Для реализации сценария длительной нейтронной экспозиции с плотностью нейтронов более $10^{19}\,\text{см}^{-3}$ необходимы условия, возникающие при выбросе в межзвездную среду сильно нейтронизованного вещества. Это может происходить, например, при слиянии нейтронных звезд в процессе эволюции тесных двойных систем или в потоках струй с поверхности нейтронных звезд [9]. В работе [8] в модели слияния нейтронных звезд

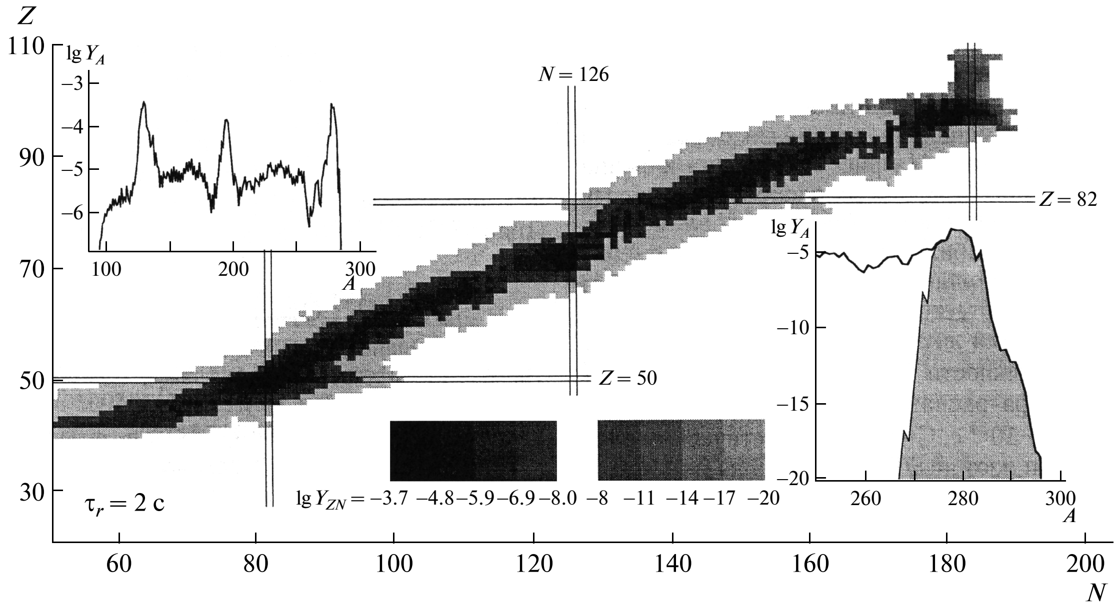


Рис. 1. Распространенность изотопов в условиях высокой плотности нейтронов (различные оттенки серого)

рассматривалась эволюция химических элементов с зарядом в области $20 < Z < 111$. В этих условиях начальное для r-процесса отношение числа нейтронов к числу зародышевых ядер должно быть достаточно большим (более 300). Представленная на рис. 1 картина распространенности элементов относится к моменту наивысшей плотности нейтронного потока. Видно, что область распространенности охватывает и ультрасверхтяжелые элементы с $Z \approx 110$. Последующее спадание плотности нейтронов ниже $10^{19}$ см$^{-3}$, когда убывание числа ядер за счет $\beta$- и $\alpha$-распада начинает превышать число ядер, образующихся в процессе захвата нейтронов, приводит к распаду наиболее короткоживущих радиоактивных ядер. Через $10^{10}$ с остается сравнительно узкая полоска (рис. 1) для относительной распространенности более долгоживущих ядер, в том числе в области $Z = 110$.

Таким образом, постановка экспериментов по поиску и регистрации ядер ультратяжелых элементов представляет собой реальную задачу, хотя поток этих ядер очень мал в силу ограниченности условий, необходимых для их образования.

**Экспериментальные данные о распространенности сверхтяжелых элементов в составе космических лучей [8].** Регистрация сверхтяжелых элементов в составе космических лучей чрезвычайно затруднена из-за ничтожности величины их потоков вблизи Земли. На рис. 2 приведены существующие в настоящее время обобщенные данные

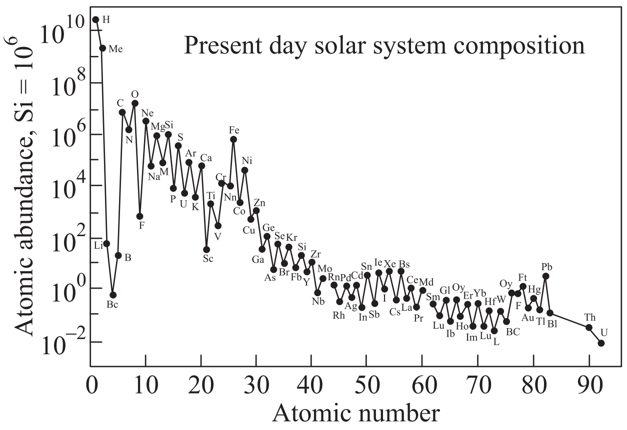


Рис. 2. Обобщенные данные о распространенности элементов, полученные при исследованиях на аэростатах, спутниках и с помощью метеоритов

о распространенности элементов, полученные при исследованиях, проводимых на аэростатах, спутниках и с помощью метеоритов [10]. Видно, что поток ядер сверхтяжелых элементов (групп свинец–висмут и торий–уран) более чем на 10 порядков величины слабее по сравнению с потоком ядер водорода. Это является причиной, по которой экспериментальных данных о содержании сверхтяжелых элементов в космосе получено крайне мало.

**Исследования на аэростатах, искусственных спутниках Земли и космических станциях.** К настоящему времени проведено некоторое количество экспериментальных исследований по распространенности ядер с зарядом $Z > 82$. В большей части экспериментов используются твердотельные трековые детекторы, такие, как толстослойные фотоэмульсии, пластиковые детекторы, стекла и кристаллы минералов. Поскольку при взаимодействии с атмосферой тяжелые ядра быстро теряют свою энергию, их регистрация проводится на больших высотах. Первоначально эксперименты по поиску сверхтяжелых ядер в составе космических лучей проводились с использованием толстых слоев ядерной эмульсии, экспонировавшейся в верхних слоях атмосферы на шарах-зондах и аэростатах. В дальнейшем для этой цели также использовались многослойные детекторы из полимерных материалов в сочетании с черенковскими детекторами, экспонируемыми на искусственных, возвращаемых на Землю спутниках (ИСЗ). Ниже приведено краткое описание основных экспериментов, проведенных до настоящего времени с использованием ИСЗ.

**Skylab** [11]. Прибор, состоящий из 36 камер, каждая из которых содержала 32 слоя лексана, был размещен на космической станции Skylab. Высота полета последней в мае 1978 г. была равна 430 км. Время экспозиции основной части прибора составило 253 дня. Идентификация заряда осуществлялась по величине скорости травления пластика. Результат измерений приведен на рис. 3.

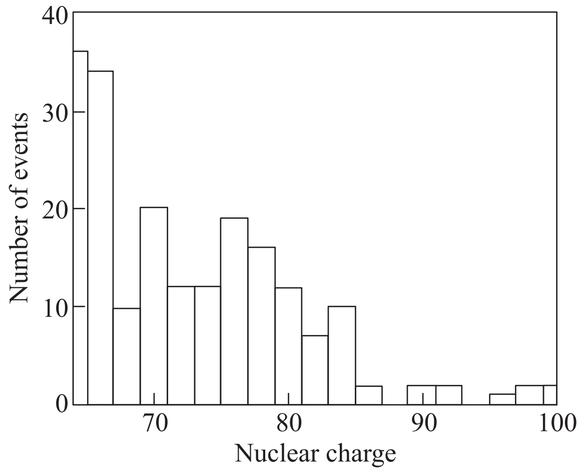


Рис. 3. Skylab [11]; 1978 г.; $Z \geqslant 65$. Спутник, 430 км, 230 дней, пластик (стопки лексана)

**Ariel 6.** ИСЗ Ariel 6 был запущен в июне 1979 г. Он имел в своем составе сферическую камеру, заполненную сцинтиллирующей смесью газов, которая просматривалась системой фотоумножителей. Заряд частицы определялся по величине поступающего от них сигнала. Продолжительность экспозиции составила 427 дней при высоте полета 625 км. Результаты измерений показаны на рис. 4 [12].

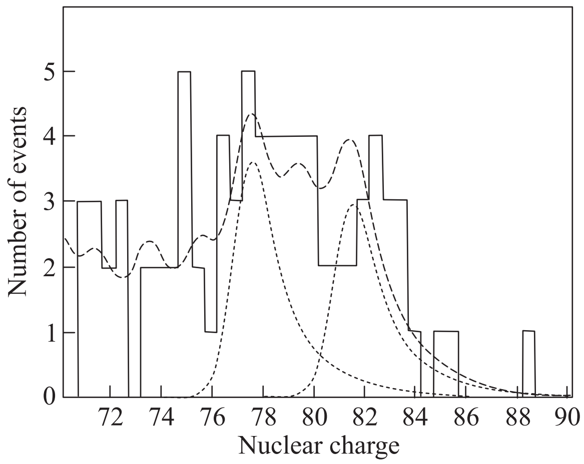


Рис. 4. Ariel 6 [12]; 1987 г.; $Z \geqslant 70$. Спутник, 625 км, 427 дней, электроника

**HNE.** Эксперимент HNE (Heavy Nuclei Experiment) на ИСЗ HEAO 3 (High-Energy Astronomy Laboratory) был начат в сентябре 1979 г. и продолжался 454 дня на высоте 495 км. Прибор состоял из 6 ионизационных камер, черенковского счетчика и многопроволочных ионизационных годоскопов. Результаты измерений показаны на рис. 5 [13].

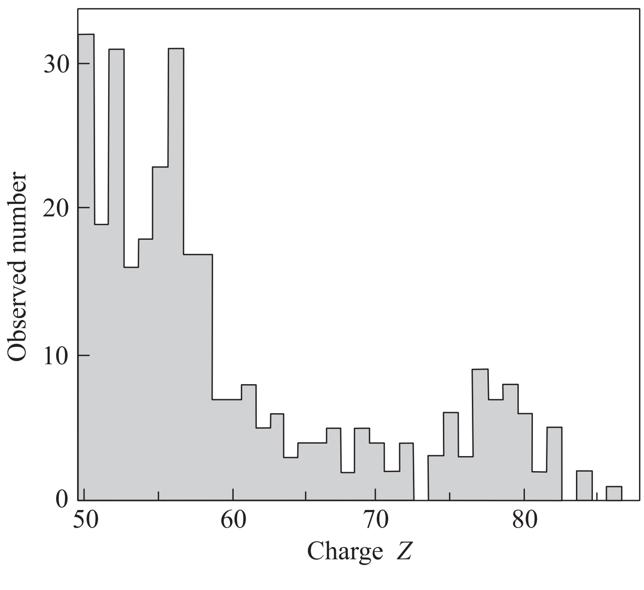


Рис. 5. HNE (HEAO 3) [13]; 1989 г.; $Z \geqslant 50$. Спутник, 495 км, 454 дня, электроника

**UHCRE.** Эксперимент UHCRE (Ultra Heavy Cosmic Ray Experiment) проводился на борту космической станции LDEF (Long Duration Exposure

Facility) с апреля 1984 г. и продолжался почти 69 месяцев на высоте 450 км. Детекторы представляли собой стопки пластин лексана (толщина пластин 250 мкм), между которыми помещались пластины свинца [14]. Величина заряда частицы определялась по величине скорости травления лексана. Все облученные пластины были разделены на несколько групп, обрабатываемых независимо. Всего было зарегистрировано около 2500 треков ядер с $Z > 65$. На рис. 6 и 7 приведены примеры полученных результатов [15, 16].

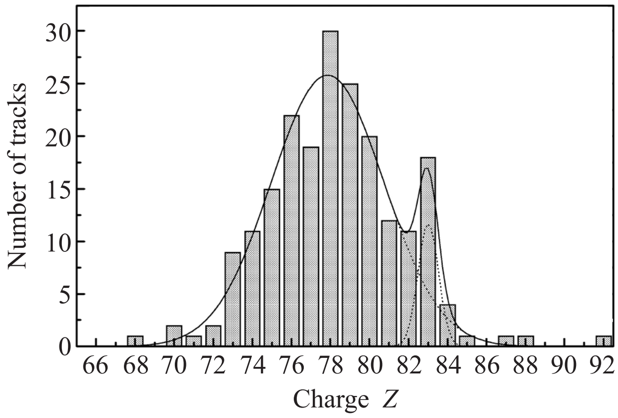


Рис. 6. UHCRE [15]; 1995 г.; $Z \geqslant 68$. Спутник, 450 км, 6 лет, пластик (стопки лексана)

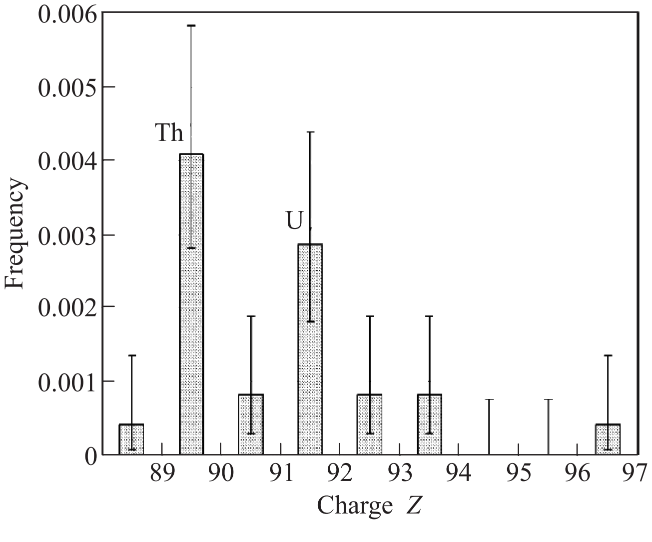


Рис. 7. UHCRE; ICRC-2001 [16]

**TREK.** Эксперимент TREK проводился на космической станции МИР на высоте 450 км начиная с 1991 г. Продолжительность этого эксперимента составила более 40 месяцев. Детектор включал 150 стопок, каждая из которых состояла из 16 слоев барий-фосфатного стекла (BP-1) [17]. После травления было найдено несколько сотен следов, принадлежащих сверхтяжелым ядрам с $Z > 70$ (рис. 8). Как вид-

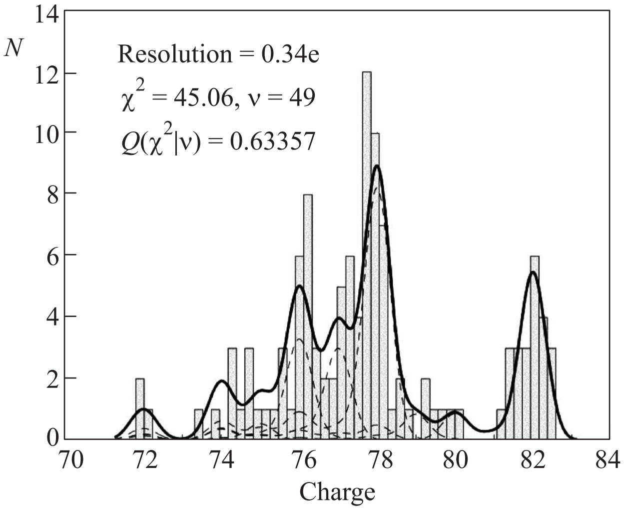


Рис. 8. Trek [17]. Станция Мир, 5 лет, 450 км, стопки стекол

но из приведенных данных, в области ядер с $Z > 86$ зарегистрированно только несколько десятков событий. Сведения об энергетическом распределении этих ядер очень неопределенные. Еще более скудная информация во всех этих экспериментах была получена для ядер, относящихся к области трансурановых элементов. Зарегистрированы лишь единичные разрозненные события, относимые авторами исследований к ядрам с $Z > 92$. Впервые результаты, указывающие на обнаружение таких событий, были получены в экспериментах на шарах-зондах [18–20], а затем – на ИСЗ [11, 16]). К сожалению, эти данные оказались крайне ненадежными. Например они могут быть интерпретированы как события, связанные с ядрами урана ($Z = 92$).

В настоящее время ведется подготовка более масштабных исследований с помощью спутников и международной космической станции [21].

**Исследования с использованием природных трековых детекторов - кристаллов силикатных минералов из метеоритов.** Как уже говорилось, главная трудность при проведении экспериментальных исследований распространенности ядер ультратяжелых ($Z > 86$) элементов в составе космических лучей состоит в ничтожно малых величинах потока этих ядер ($\sim 1{-}2$ ядра на м$^2$ в год). Преодолеть эту трудность можно двумя путями: либо значительно (на несколько порядков) увеличивая площадь детекторов, что в условиях космоса сделать довольно трудно, либо увеличивая время экспозиции детектора в космическом пространстве. Эксперименты на ИСЗ и космических станциях длятся в течение нескольких лет. Однако этого оказывается недостаточно для осуществления эффективной регистрации сверхтяжелых ядер.

В то же время в природе существуют твердотельные "детекторы", облучавшиеся длительное время (десятки и сотни миллионов лет) частицами космического происхождения. Это кристаллы силикатных минералов, входящие в состав вещества метеоритов. Стоит отметить, что наибольшее количество информации, которое легло в основу построения обобщенной кривой распространенности элементов Солнечной системы, было получено из данных по содержанию изотопов элементов в веществе метеоритов [10]. Данные об относительной распространенности элементов, полученные путем изучения фотосферы Солнца и вещества хондритов, хорошо согласуются между собой [10].

Изучение химического состава галактических космических лучей (ГКЛ) с помощью метеоритов началось в середине 60-х годов прошлого века. Тяжелые ядра группы железа ($Z \approx 26$) ГКЛ были впервые обнаружены в метеоритах в 1964 г. [21]. Ядра более тяжелых элементов были зарегистрированы в 1967 г. [22].

С середины 70-х годов прошлого века в лаборатории ядерных реакций ОИЯИ под руководством Г.Н. Флерова были развернуты работы по поиску треков сверхтяжелых ядер ГКЛ в кристаллах оливина из метеоритов типа палласитов [23]. Была разработана эффективная методика выявления треков ядер сверхтяжелых ($Z > 60$) элементов путем химического травления образцов кристаллов оливина, предварительно подвергнутых высокотемпературному отжигу. Целью последнего было практически полное удаление треков от значительно более распространенных ядер ГКЛ с зарядом $Z < 40$. Среди выявленных таким образом треков сверхтяжелых ядер более 1000 было отнесено к трекам ядер группы тория–урана. Измеренная полная длина отожженных треков для них находилась в интервале 190–220 мкм. Вместе с тем было обнаружено несколько треков длиной 365 мкм, которые авторы интерпретировали как треки ядер с $Z \geqslant 110$ (рис. 9) [24–27].

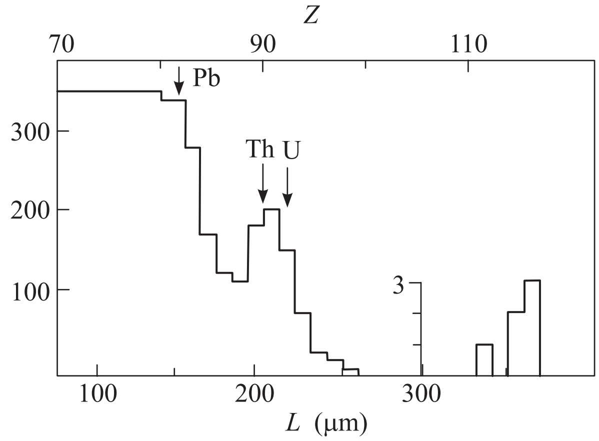


Рис. 9. Распределение количества найденных и идентифицированных сверхтяжелых ядер [25]

**Поиск и идентификация ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ в кристаллах оливина из метеоритов – эксперимент ОЛИМПИЯ.** В 2005 г. группа сотрудников ФИАНа выступила с предложением эксперимента ОЛИМПИЯ (ОЛИвины из Метеоритов – Поиск тяжелых И сверхтяжелых Ядер), в котором для просмотра образцов с целью поиска и измерения параметров треков тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов предполагалось использовать современный высокоэффективный измерительный комплекс ПАВИКОМ [28]. Как и в предыдущих работах с оливинами, в основе эксперимента ОЛИМПИЯ лежит использование метода твердотельных трековых детекторов, в котором частицы регистрируются по производимым ими радиационным повреждениям в объеме вещества детектора. При поиске реликтовых треков, образованных частицами космических лучей в кристаллах силикатных минералов (оливинов, пироксенов и т.д.), входящих в состав метеоритов [29, 30], используется способность этих кристаллов регистрировать и сохранять в течение длительного времени (> 108 лет) треки ядер с $Z > 20$ [22]. Наиболее подходящими для проведения трековых исследований химического состава ГКЛ являются метеориты типа палласитов, около 60% объема которых занимают кристаллы оливина. Радиационный возраст палласитов и, следовательно, время их экспозиции в потоке ГКЛ составляют $\sim 185$ млн. лет для Марьялахти (Marjalahti) и $\sim 300$ млн. лет для Игл Стэйшн (Eagle Station). Именно поэтому кристаллы оливина из этих двух метеоритов содержат большое число треков космических ядер. Как показывают оценки [24, 31], в 1 см$^3$ кристаллов оливина из этих палласитов, расположенных на глубине $\lesssim 5$ см от доатмосферной поверхности метеороида, за $10^8$ лет может быть образовано $10^2$–$10^3$ треков ядер с $Z > 90$, а в кристаллах из приповерхностных участков метеороида глубиной до $\sim 1$ см – до $10^4$ таких треков. Таким образом, использование фактора длительной экспозиции метеоритов в космосе приводит к огромному преимуществу данного метода по сравнению с методами, основанными на использовании различных детекторов, экспонированных на ИСЗ, космических станциях и аэростатах. Следует отметить, что измерение параметров треков в кристаллах оливина, находящихся на разной глубине от доатмосферной поверхности метеоритов, дает возможность не только идентифицировать заряд ядер, но и оценивать их энергию.

**Методические основы трековых исследований кристаллов оливина из палласитов.** Метеориты класса палласиты состоят из железо-никелевой "матрицы", в объеме которой находятся многочисленные включения кристаллов оливина (прозрачного минерала слегка желтоватого цвета) размером до 1–2 см (рис. 10). Для трековых исследований пригодны только образцы кристаллов размером не более 2–3 мм. Это связано с наличием многочисленных трещин, возникших, по-видимому, при ударных воздействиях на вещество метеороида как в процессе его формирования, так и в течение всей последующей истории его существования в космическом пространстве.

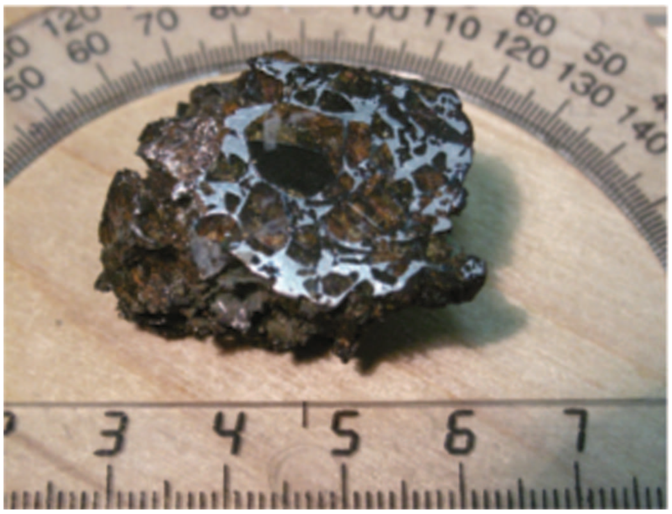

Рис. 10. Образец метеорита Игл Стейшн, используемый для исследований в проекте ОЛИМПИЯ

Возможность поиска, регистрации и идентификации ядер тяжелых элементов с помощью метеоритов основана на том, что тяжелые ядра, проходя через оливин, создают в его кристаллической решетке структурные нарушения. В результате вдоль следа торможения ядра образуется сквозной канал области повреждений с поперечным размером $\sim 30-70$ Å. Существенным при этом является огромное (до примерно 200-кратного) отличие скорости травления вещества оливина вдоль следа ядра по сравнению с нарушенной радиационно областью кристалла. Травление проводится с помощью специально подобранного химического раствора при определенных температуре и давлении [29, 30]. При травлении поверхности кристалла оливина в местах прохождения тяжелого ядра образуется пустотелый канал, длина и ширина которого зависят от степени повреждений кристаллической решетки.

Физико-химический механизм травления треков заключается в том, что эффективность удаления вещества кристалла оливина из области вдоль траектории торможения ядра оказывается намного больше таковой для ненарушенного кристалла только при превышении некоторой критической величины степени повреждения кристаллической структуры оливина. Степень повреждений определяется в основном величиной удельных ионизационных потерь энергии тормозящим ядром. Существует минимальная величина потерь энергии, характерная для каждого из используемых в качестве трековых детекторов силикатных минералов. Для оливина пороговая величина удельных ионизационных потерь энергии составляет $(dE/dx)_{el}^{th} \approx 18$ МэВ/(мг·см$^{-2}$). На рис. 11 представлены результаты расчета удельных потерь

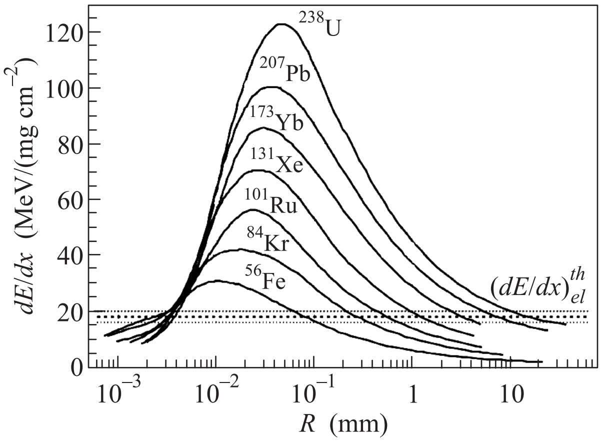


Рис. 11. Ионизационные потери энергии ядер $^{56}_{26}$Fe, $^{84}_{36}$Kr, $^{101}_{44}$Ru, $^{131}_{54}$Xe, $^{173}_{70}$Yb, $^{207}_{82}$Pb, $^{238}_{92}$U в оливине палласита Марьялахти в зависимости от их остаточного пробега

энергии ядер с зарядом $Z \geqslant 26$ на взаимодействие с электронами тормозящей среды оливина как функции остаточного пробега частицы, полученные с помощью программы SRIM2006 [32]. Горизонтальными линиями отмечены пороговое значение $(dE/dx)_{el}^{th}$ и интервал $\Delta(dE/dx)_{el}^{th} = \pm 2$ МэВ/(мг·см$^{-2}$), являющийся переходной областью между двумя сильно отличающимися между собой режимами травления треков в оливине. Таким образом, только для ядер, энергетические потери которых превышают $(dE/dx)_{el}^{th} = 18 \pm 2$ МэВ/(мг·см$^{-2}$) при энергии $E < < E_{\max}$ (рис. 11), вещество из зоны повреждения вдоль следа торможения может быть эффективно химически удалено. Образующийся при этом пустотелый канал с диаметром микронных размеров становится видимым в оптический микроскоп при 600–900-кратном увеличении.

Следует отметить, что вдоль пути торможения ядер с энергией, превышающей $E_{\max}$, эффективность травления зоны нарушения кристалла оливина многократно снижается. В этом случае химическое травление трека происходит со значительно меньшей скоростью и для получения видимого канала необходимо проведение намного более длительного травления.

Более наглядное представление о размерах и геометрической форме химически травимых в оливине треков дает рис. 12. С уменьшением энергии части-

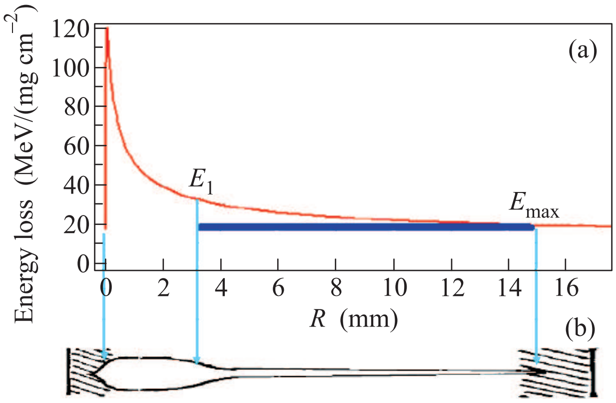


Рис. 12. Схема формирования травимого участка трека в оливине. (a) – Удельные ионизационные потери энергии ядра. (b) – Геометрическая форма различных участков трека

цы, начиная с $E_{\max}$, когда удельные потери энергии становятся больше пороговой величины $D$ – 2 МэВ/(мг·см$^{-2}$), скорость травления вдоль трека начинает превышать скорость травления неповрежденных участков оливина и постепенно растет до тех пор, пока не будет достигнута величина потерь $D + 2$ МэВ/(мг·см$^{-2}$) (энергия $E_1$). Этому участку трека соответствует узкий иглообразный протравленный канал (рис. 12b). При дальнейшем торможении частицы ($E < E_1$) скорость травления резко возрастает. Травимая область этого основного цилиндрического участка имеет большой диаметр. В конце трека перед остановкой частицы потери энергии снова резко падают ниже порога $D$. Канал заканчивается узким острием (рис. 12b). Таким образом, общий вид полностью протравленных каналов различных участков пути торможения тяжелых ядер перед их остановкой имеет форму “шприца”.

На рис. 13 приведены примеры микрофотографий реально наблюдаемых в оптический микроскоп треков сверхтяжелых ядер, протравленных в кристаллах оливина из метеорита Марьялахти. Видна четкая граница раздела каждого трека на два участка, диаметр канала на которых различается в 2–3 раза. Более тонкий конусообразный участок относится к “игле шприца”, а наиболее эффективно растравливаемая основная зона трека большего диаметра и практически цилиндрической формы – к “цилиндру шприца”. Таким образом, геометрические формы и параметры травимых треков подтверждают описанный выше механизм формирования зон структурного нарушения кристалла вдоль следа торможения ядер.

Как видно из рис. 11, длина травимого канала треков для ядер с $Z < 70$ достигает нескольких мм, а для ядер урана – порядка 10 мм. В то же время размеры большинства кристаллов оливина, пригодных для проведения трекового анализа, составляют 2-3 мм. Отсюда следует, что для очень тяжелых ядер часть травимого участка трека оказывается за пределами кристалла. Кроме “стандартных”, простых по форме треков встречаются более сложные конфигурации, такие, например, как приведенные на микрофотографиях рис. 14.

Травимая часть каналов может иметь начало или конец внутри объема кристалла. При этом возникает проблема, связанная с эффективностью поступления травящего раствора в зону нарушения кристалла. В исследованиях, проводимых группой В.П. Перелыгина, указанная проблема решалась методом выявления и наблюдения “трек в треке” [33]. До начала травления кристаллы облучались ускоренными тяжелыми ионами (в основном Kr или Xe) с энергией $E < E_{\max}$. Во время травления, наряду с треками от тяжелых ядер ГКЛ, следы которых пересекали поверхность травления кристалла в первую очередь, происходило травление каналов от внедренных ускоренных ядер. По пустотелым каналам-трекам этих ядер, плотность которых составляла $\sim 10^5$ см$^{-2}$, раствор проникал внутрь объема оливина. Это приводило к травлению треков ядер космических лучей, находящихся внутри объема и пересекающихся с треками ядер из пучка ускорителя. Следует, однако, отметить, что методика травления треков ядер ГКЛ с помощью химического раствора, поступающего через узкие каналы “подводящих раствор” треков ускоренных ядер, не позволяет просле-

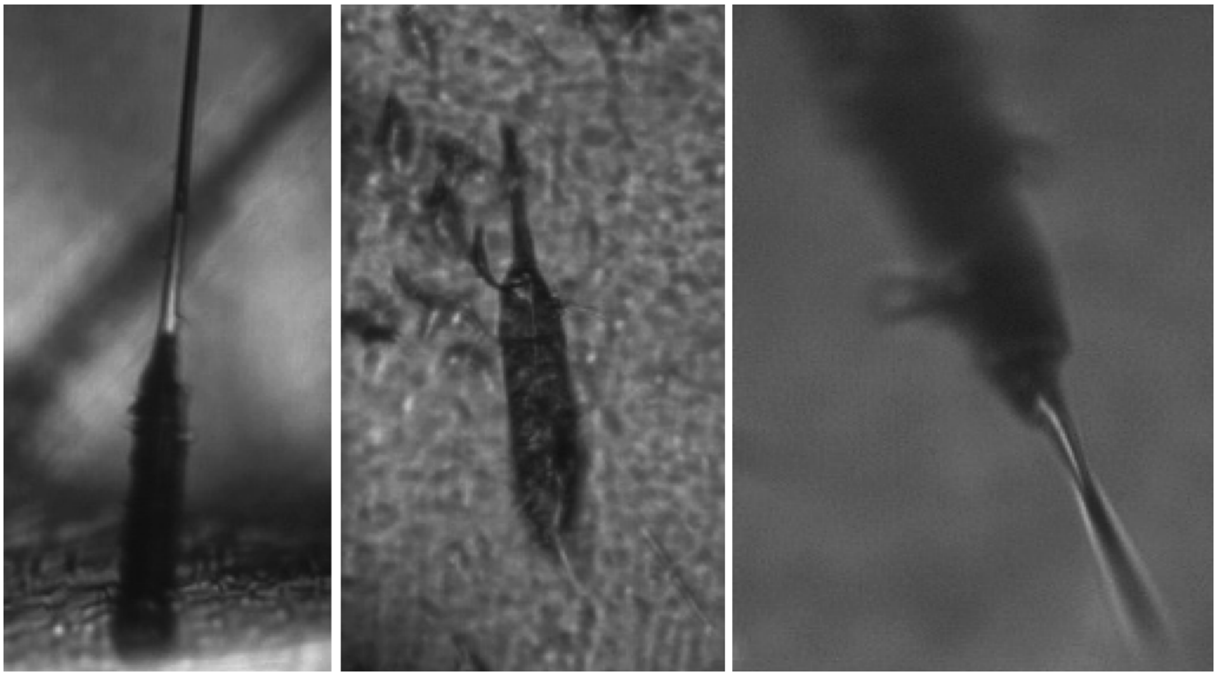

Рис. 13. Микрофотографии треков ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ, травимых в кристаллах оливина из палласитов, в области перехода от иглообразной к основной части трека. Размер поля зрения на всех микрофотографиях $\sim 100\times 140$ мкм$^2$

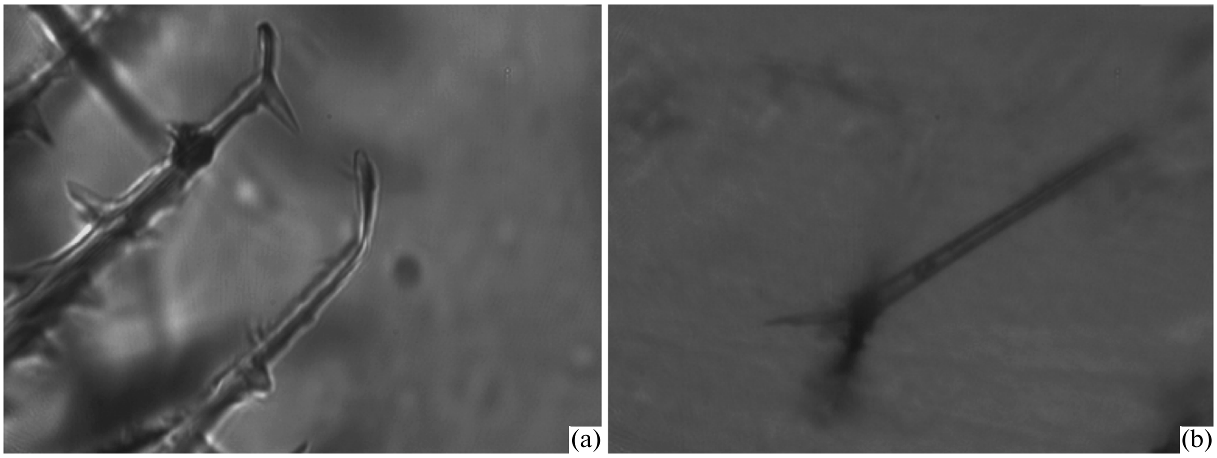


Рис. 14. (а) – Распад остановившегося ядра (короткие треки, пересекающие каналы трех основных треков; наблюдаются вдоль всей их длины и в конце; по-видимому, это треки от ядер группы железа ГКЛ). (б) – Образование ядра отдачи при торможении тяжелого ядра ГКЛ в кристалле оливина

дить динамику травления исследуемых треков. Эффективность удаления травимого вещества из зоны нарушения кристалла зависит от соотношения травимых длин и диаметров этих треков. В каждом конкретном случае это соотношение может принимать свое значение, учесть которое не представляется возможным.

Другой методической особенностью трековых исследований группы В.П. Перелыгина являлось проведение предварительного, предшествующего процессу травления термического отжига кристаллов. Цель этой процедуры – существенно сократить длину травимых треков ядер ГКЛ, а также устранить фон, образуемый треками ядер группы железа, затрудняющий просмотр и обнаружение треков от более тяжелых ядер. При этом значительно легче и точнее осуществляются выявление и измерение параметров треков, находящихся внутри

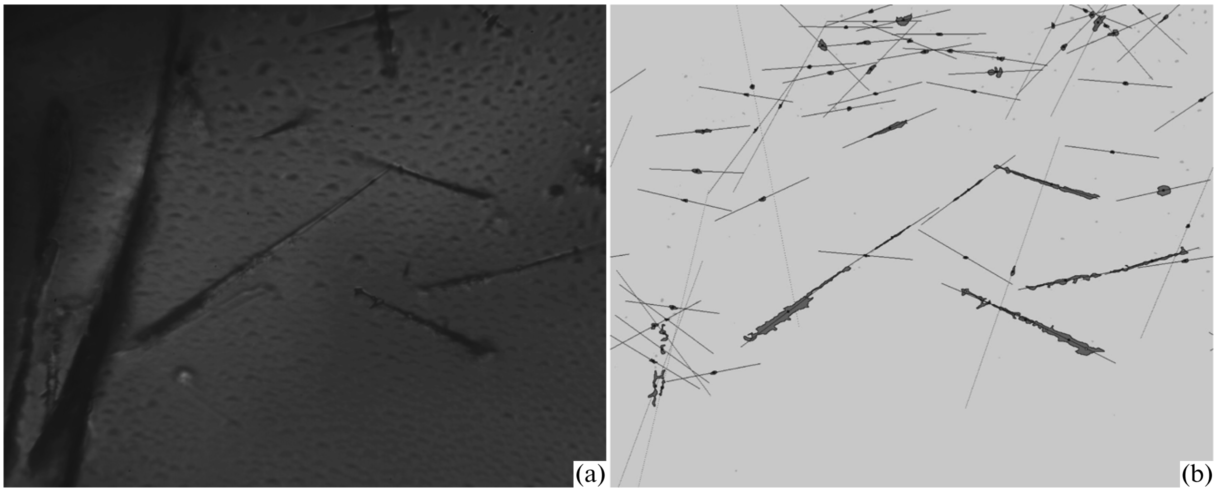


Рис. 15. Изображение одного поля зрения микроскопа 300×400 мкм$^2$ (a) и результат его компьютерной обработки с помощью программы распознавания образов (b)

объема кристалла. Однако, как показали дальнейшие калибровочные эксперименты, предварительный отжиг кристаллов приводит к дополнительным непредсказуемым изменениям длин треков. В частности, было обнаружено, что травимая в отожженных кристаллах оливина из метеорита Марьялахти длина треков зависит от ориентации направления треков относительно кристаллографических осей симметрии оливина [34]. Это вносит большую неопределенность при идентификации заряда ядер.

В разработанной и используемой нами методике для измерения длины с последующим расчетом скорости травления треков на ПАВИКОМе используется процедура последовательного среза и травления поверхности внутреннего среза исследуемых кристаллов оливина. При этом травление полированной плоской поверхности внутреннего среза кристалла происходит послойно: после травления очередного слоя срезается часть кристалла определенной толщины и проводится травление вновь вскрытой на большей глубине поверхности. Таким образом, появляется возможность измерения параметров треков ядер ГКЛ путем их сканирования во всем объеме каждого исследуемого кристалла.

Толщина удаляемого с очередной поверхности травления слоя находится в пределах 40–70 мкм (точность измерения толщины среза составляет несколько мкм) и подбирается исходя из наблюдаемого на данном этапе травления распределения глубины проникновения исследуемых треков. После каждой процедуры травления производятся измерения и запись в банк памяти геометрических параметров каналов, соответствующих каждому из фиксируемых длиннопробежных треков. При травлении треков в очередном слое производится процедура его геометрического совмещения (или сшивки) с предыдущим слоем. Для этого используются специально наносимые реперные координатные метки, а также прослеживаемые на глубину кристалла, превышающую толщину данного среза, длиннопробежные треки ядер ГКЛ. Полная длина таких треков определяется путем суммирования после проведения всех этапов травления–измерения–среза–полировки для данного кристалла. Расчет длины треков, травимой на отдельных этапах, проводится с учетом угла наклона их траектории относительно нормали к травимой поверхности кристалла. Для поиска треков на автоматизированных оптических микроскопах ПАВИКОМ кристаллы оливина упаковываются по несколько штук в эпоксидную таблетку размером 10×20 мм$^2$, затем шлифуются, полируются и травятся.

На рис. 15 приведен пример стандартного поля травимой поверхности кристалла оливина с треками тяжелых ядер ГКЛ, наблюдаемого в оптический микроскоп (рис. 15a), и результат обработки этого кадра (распознавание изображений) с помощью оригинального программного комплекса (рис. 15b). Тонкими линиями обозначены оси соответствующих кластеров дефектоструктуры кристалла, ориентированных вдоль следов торможения ядер с различными зарядом и энергией.

**Идентификация заряда ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ.** Как уже указывалось, основная задача проекта ОЛИМПИЯ заключается в определении зарядового состава ГКЛ в области тяжелых и сверхтяжелых ядер. Характеристики протравленных треков связаны с величиной заряда тормозящихся ядер. Основной из них является травимая длина $L$. Однако, как уже отмечалось, для ядер с зарядом $Z > 70$ $L$ превышает средние размеры исследуемых образцов кристаллов оливина и в большинстве случаев не может быть полностью измерена.

Для выхода из создавшегося положения авторами было предложено использовать дополнительный параметр – скорость травления трека в длину $V_L$ [35–38]. При травлении разных участков трека величина существенным образом изменяется, возрастая в среднем в 5 раз при переходе от конусообразной зоны трека к его основной части (см. рис. 12). Максимальные значения скорости травления, характерные для ядер различных элементов, достигаются по мере приближения траектории движения ядер к точке их остановки [39, 40]. На рис. 16 показана зависимость

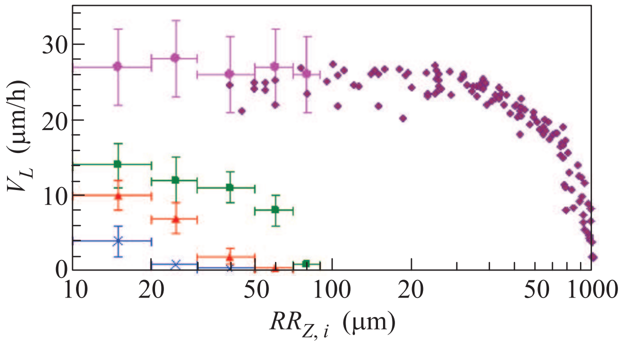


Рис. 16. Зависимость скорости травления треков от остаточной длины пробега ядер Fe, Kr, Xe и U

скорости травления треков от остаточной длины пробега $RR_{Z,i}$ ядер Fe, Kr, Xe и U. За величину $RR_{Z,i}$ принимается длина пути торможения ядра с зарядом $Z$ от точки траектории движения с энергией $E_i$ до его полной остановки [40–42].

К сожалению, данных экспериментальных исследований зависимости скорости травления от $RR$ и $Z$ к настоящему времени имеется недостаточно. Наиболее детальные измерения были проведены в калибровочном эксперименте с ядрами U, ускоренными до энергии 190 МэВ/нуклон. Его результаты представлены в работах Perron, Pelas. В исследованиях группы ОИЯИ калибровка параметров треков, образованных ускоренными ядрами урана в кристаллах оливина из палласитов, проводилась после термического отжига следов торможения. Это полностью исключает возможность ее использования в наших работах. Часть образцов оливина из палласитов Марьялахти и Игл Стэйшн, облученных на ускорителе GSI (г. Дармштадт) ускоренными до энергии 11.4 МэВ/нуклон ядрами Xe и U, была изучена нами с использованием программного комплекса ПАВИКОМ.

К настоящему времени авторами проведен ряд дополнительных облучений кристаллов оливина ядрами Au и U с энергией от 11.4 до 500 МэВ/нуклон на ускорителе GSI (г. Дармштадт). На рис. 16 полученные нами результаты для U, Au, Xe и Kr показаны точками с соответствующими пределами ошибок измерений. Сравнение полученных нами в эксперименте длин треков ядер Au (77±5 мкм) и U (91±5 мкм) с энергией 11.4 МэВ/нуклон с рассчитанными по программам SRIM и GEANT4 значениями (69±6 и 89±5 мкм соответственно) показывает достаточно хорошую сходимость результатов. Продолжение калибровочных облучений ядрами других элементов с различной энергией является одной из ключевых задач при проведении дальнейших исследований.

Зависимость скорости травления треков в длину $V_L$ от заряда $Z$ и остаточной длины пробега ядер $RR$ может быть представлена в трехмерном виде (в виде поверхности, указывающей зависимость $V_L$ при определенных $RR$ от $Z$).

Таким образом, методика оценки величины заряда в наших исследованиях основана на проведении двумерной интерполяции поверхности (рис. 17), построенной по экспериментально измеренным значениям $V$ и $RR$ для травимых в кристаллах оливина треков. Следует отметить, что полная длина пробега, когда измеренная величина $L$ совпадает с остаточной длиной пробега ядер ($L = RR$), регистрируется только в случаях фиксации точки остановки

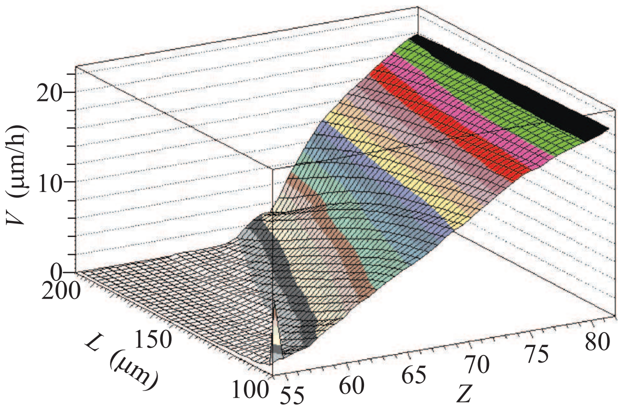


Рис. 17. Связь между зарядом, травимой длиной и скоростью травления в трехмерном представлении

данного ядра в объеме кристалла оливина. Во всех остальных случаях значение $L$ оказывается меньше $RR$. Это является одним из основных факторов, приводящих к систематическому занижению величины определяемой скорости травления и, соответственно, величины идентифицируемого заряда ядра. Однако несмотря на наблюдаемые для большинства детектируемых треков занижения величин $L$ по сравнению с расчетными значениями $RR$, существенно зависящие от положения точек на плоскости $V = f(L)$, точность определения заряда ядер по рассматриваемой методике для ядер тяжелее свинца ($Z = 82$) составляет ±1–2 ед. заряда (см. рис. 17).

**Результаты проведенных исследований.** На рис. 18 приведены результаты проведенных нами трековых исследований кристаллов оливина из ме-

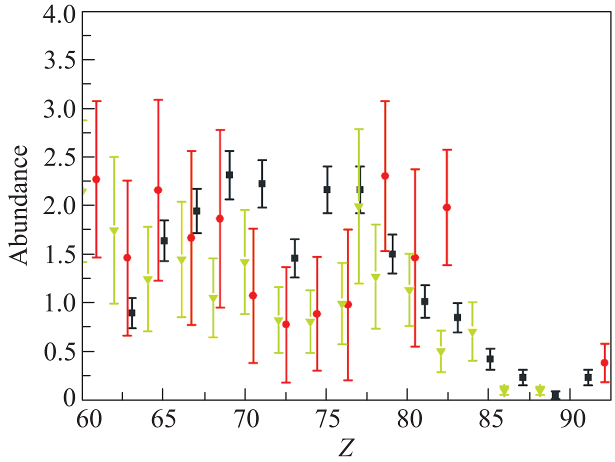


Рис. 18. Распределение ядер по зарядам, полученное в работе [43] (квадраты), в сравнении с экспериментальными данными HEAO-3 (треугольники) [13] и ARIEL-6 (круги) [12]

теоритов Марьялахти и Игл Стейшн. Всего к настоящему времени обработано более 6000 треков с зарядом, превышающим 40 ед. Из них около 2500 треков относится к ядрам с зарядом более 55.

Ранее уже указывалось на то, что измерения длины $L$ длиннопробежных (длиной более 100 мкм) треков не всегда дают полную травимую длину из-за сравнительно небольших (миллиметровых) размеров кристаллов оливина. Поэтому результаты, приведенные на рис. 18, представляют собой распределение нижних границ зарядов ядер, прошедших через оливин. Для сопоставления с результатами других исследований данные настоящей работы были нормированы с учетом относительной распространенности ядер Fe ($10^6$). Видно, что в пределах указанных ошибок измерений и статистики зарегистрированных событий имеется хорошее соответствие между полученными в наших исследованиях данными и результатами работ, выполненных с помощью электронной аппаратуры [12, 13, 43].

В начале 2011 г. в ходе выполнения проекта ОЛИМПИЯ были обнаружены три сверхдлинных ($L_{tr} > 700$ мкм) трека, скорость травления которых $V_{tr} > 35$ мкм/ч. Поскольку экспериментально измеренная максимальная величина скорости травления треков в оливине для ядер урана перед их остановкой $V_{tr,\mathrm{U}} = (26 \pm 1)$ мкм/ч, ясно, что заряды этих ядер существенно превышают $Z = 92$. Так как в этой области зарядов функция $Z(RR, V_{tr})$ неизвестна, для оценки заряда трансурановых ядер в первом приближении нами была произведена ее экстраполяция в область трансфермиевых ядер при остаточной длине пробега $RR \approx 50$. Для этих ядер имеются экспериментальные данные калибровочных измерений (рис. 19). В результате в первом приближении была получена оценка границ идентифицируемого заряда трех зарегистрированных нами треков ультратяжелых ядер галактических космических лучей: $105 < Z < 130$ [44]. Выполненный регрессионный анализ позволил уточнить оценку заряда одного из этих ядер, оказавшегося равным $119^{+10}_{-6}$ с вероятностью 95%. Именно такие ядра должны образовывать "острова стабильности". Их обнаружение в природе подтверждает справедливость теоретических предсказаний и оправдывает усилия по их синтезу в земных условиях.

**Фрагментация ядер в веществе метеоритов.** В рамках проекта ОЛИМПИЯ был создан и модернизирован с учетом экспериментальных данных программный пакет из комплекса GEANT4. Полученные результаты позволили не только провести анализ характера изменения выхода ядер-продуктов фрагментации с глубиной от поверхности облучаемого тела палласита, но и количественно оценить вклад в группу ядер с $Z = 60{-}75$ от ядер более тяжелых элементов ГКЛ, распавшихся при фрагментации в веществе метеорита-палласита. Использование расчетных данных позволило определить изменения спектров заряженных частиц, которые могут применяться для внесения поправок в исследуемый спектр космического излучения. Получены расчетные характеристики зарядового и энергетического спектров ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ на входе в регистрирующие кристаллы оливина после прохождения определенной толщины вещества метеороида. Для продолжения этого крайне важного направления исследований необходимо проведение специальных калибровочных экспериментов по облучению кристаллов оливина, совмещенных с пакетом пластиковых трековых детекторов и мишенью из вещества палласита, на ускорителе тяжелых ионов ядрами с зарядом $Z = 82$ и 92 для ряда значений энергии вплоть до 1000 МэВ/нуклон. Целью этих экспериментов, кроме получения прямых экспериментальных данных о снижении потока первичных, падающих на поверхность метеороида ядер сверхтяжелых элементов и нахождения уточненных характеристик идентифицируемых ядер-продуктов фрагментации, является экспериментальная проверка выполненных модельных расчетов.

**Заключение.** В ходе выполнения проекта ОЛИМПИЯ, поддержанного грантами РФФИ, было обработано примерно 170 кристаллов, размеры которых не превышают 2–3 мм. Получено зарядовое распределение около 6000 ядер галактических космических лучей с зарядом более 55. Найденное отношение распространенности ядер с $Z \geqslant 88$ к распространенности ядер с $74 \leqslant Z \leqslant 87$ равно $0.045 \pm 0.015$ (Марьялахти) и $0.025 \pm 0.02$ (Игл Стейшн). Эти величины несколько больше, чем в эксперименте UHCRE ($0.0147 \pm 0.0032$) [15, 16], но хорошо согласуются с данными экспериментов TREK, HEAO и Ariel [12, 13, 17]. В зарядовом распределении ОЛИМПИИ, полученном при обработке детекторов со временем наблюдения 185–300 млн. лет, присутствуют намного более тяжелые ядра [43]. Результаты модельных расчетов, выполненных в рамках данной работы, возможно, могут дать объяснение целому ряду событий, наблюдавшихся в экспериментах на спутниках при изучении состава космических лучей в области сверхтяжелых ядер ($Z > 65$) [11, 16, 27]. Помимо стабильных ядер с $Z \leqslant 92$, в этих экспериментах были зарегистрированы отдельные сигналы от частиц с зарядом в интервале $94 < Z < 100$. Частицы с таким зарядом не могут входить в состав первичного космического излучения в силу их очень малого времени жизни. Авторы указанных статей природу этих частиц не комментируют. По нашему мнению, события с $Z > 92$ не появляются из-за методических неточностей или сбоя в работе аппаратуры, а являются результатом фрагментации более тяжелых ядер из области «острова стабильности». Несколько таких событий было обнаружено и в наших исследованиях треков сверхтяжелых частиц в оливинах из метеоритов.

Таким образом, трековая методика дает возможность получать результаты, чрезвычайно важные для понимания физической картины мира. Полученные в ходе реализации проекта ОЛИМПИЯ 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 тяжелых и сверхтяжелых ядер. Подобные сведения имеют большое значение для ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики.

---


1. J. Elster and H. Geitel, Phys. Zs. **2**, 560 (1900); C. T. R. Wilson, Proc. Camb. Phys. Soc. **11**, 32 (1900).
2. V. Hess, Phys. Zs. **13**, 1084 (1912).
3. В. Л. Гинзбург, УФН **169**, 419 (1999).
4. V. M. Strutinsky, Nucl. Phys. A **95**, 420 (1967).
5. Ю. Ц. Оганесян, Вестн. РАН **71**, 590 (2001).
6. Я. Б. Зельдович, ЖЭТФ **38**, 1123 (1960).
7. Г. С. Бисноватый-Коган, В. М. Чечеткин, УФН **127**, 263 (1979).
8. И. В. Панов, И. В. Корнеев, Ф.-К. Тилеман, Ядерная физика **72**, 1070 (2009).
9. J. M. Lattimer and D. N. Schramm, Astrophys. J. Lett. **192**, L145 (1974).
10. K. Lodders, H. Palme, and H.-P. Gail, *4.4 Abundance of the elements in the Solar Syastem, Springer Materials. The Landolt-Bornstein Database 4B: Solar system*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009; http://www.springermaterials.com.
11. E. K. Shirk and P. B. Price, Astrophys. J. **220**, 719 (1978).
12. P. H. Fowler, N. F. Walker, R. W. Masheder et al., Astrophys. J. **314**, 746 (1987).
13. W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner et al., Astrophys. J. **346**, 997 (1989).
14. D.O'Sullivan et al., Nucl. Tracks and Rad. Meas. **15**, 673 (1988).
15. J. Font and C. Domingo, Acta Physica Polonica B **29**, 357 (1998).
16. J. Donnelly, A. Thompson, D. O'Sullivan et al., *The abundances of actinide nuclei in the cosmic radiation as clues to cosmic ray origin*, Proceedings of 27-th ICRC, Hamburg, Germany, 2001, p. 1715.
17. B. A. Weaver and A. J. Westphal, Astrophys. J. **569**, 493 (2002).
18. P. H. Fowler, V. M. Clapham, V. G. Cowen et al., Proc. Roy. Soc. A **318**, 1 (1970).
19. P. B. Price, P. H. Foweler, I. M. Kidd et al., Phys. Rev. D **3**, 815 (1971).
20. G. E. Blanford, in *Proc. 12 Inter. Cosmic Ray Conf.*, Hobart, Australia, 1971, v. 1, p. 269.
21. M. Maurette, P. Pellas, and R. M. Walker, Nature **204**, 821 (1964).
22. R. L. Fleischer, P. B. Price, R. M. Walker et al., Journal of Geophysical Research **72**, 331, 355 (1967).

23. O. Otgonsuren, V. P. Perelygin, S. G. Stetsenko et al., Astrophys. J. **210**, 258 (1976).
24. В. П. Перелыгин, С. Г. Стеценко, Письма в ЖЭТФ **32**, 622 (1980).
25. В. П. Перелыгин, С. Г. Стеценко, Г. Н. Флеров, Краткие сообщения ОИЯИ **7—85**, 5 (1985).
26. В. П. Перелыгин, С. Г. Стеценко, Письма в ЖЭТФ **49**, 257 (1989).
27. V. P. Perelygin, Yu. V. Bondar, R. Brandt et al., Ядерная физика **66**, 1612 (2003).
28. В. Л. Гинзбург, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков и др., Доклады АН **402**, 472 (2005).
29. С. Дюррани, Р. Балл, *Твердотельные ядерные детекторы*, М.: Энергоатомиздат, 1990.
30. Р. Л. Флейшер, П. Б. Прайс, Р. М. Уокер, *Треки заряженных частиц в твердых телах*, в 3-х частях, М.: Энергоатомиздат, 1981.
31. D. Lhagvasuren, O. Otgonsuren, V. P. Perelygin et al., *Solid State Nuclear Tracks Detector*, Oxford: Pergamon Press, 1980, 997 p.
32. J. F. Ziegler, J. P. Blersack, and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Pergamon Press, N.Y., Oxford, 1985.
33. D. Lal, R. S. Rajan, and A. S. Tamhane, Nature **221**, 33 (1969).
34. C. Perron, M. Bourot-Denise, V. P. Perelygin et al., Nucl. Tracks Radiat. Meas. **15**, 231 (1988).
35. А. Б. Александров, А. В. Багуля, Л. А. Гончарова и др., Вестник отделения наук о Земле РАН **1(25)** (2007); ISSN 1819 – 6586; URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-(2007)/informbul-1_(2007)/planet-8.pdf.
36. L. A. Goncharova, A. I. Ivliev, G. V. Kalinina et al., *Abstracts of papers to 38th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, 2007; CD-ROM #1575.
37. А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **7**, 19 (2008).
38. А. Б. Александров, А. В. Багуля; М. С. Владимиров и др., Вестник отделения наук о Земле РАН **1**(25), (2007); ISSN 1819 – 6586; URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-(2008)/informbul-1_(2008)/planet-15.pdf.
39. C. Perron and M. Maury, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. D: Nuclear Track **11**, 73 (1986).
40. C. Perron and M. Bourot-Denise, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. D: Nuclear Track **12**, 29 (1986).
41. А. Б. Александров, А. В. Багуля, Л. А. Гончарова и др., Вестник отделения наук о Земле РАН **1(25)** (2007); ISSN 1819 – 6586; URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-(2007)/informbul-1_(2007)/planet-9.pdf.
42. А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., Приборы и техника эксперимента **2**, 1 (2009).
43. А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., УФН **180**, 839 (2010).
44. Н. Г. Полухина, УФН **182**, 656 (2012).