

Идентификация заряда ядер трансурановых элементов галактических космических лучей по химически травимым трекам в кристаллах оливина из палласитов

Л. Л. Кашкаров¹, А. Б. Александров², А. В. Багуля², М. С. Владимиров², Л. А. Гончарова², А. И. Ивлиев¹, Г. В. Калинина¹, Н. С. Коновалова², Н. М. Окатьева², Н. Г. Полухина², А. С. Русецкий², Н. И. Старков²

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, РАН, Москва
leokash@mail.ru

² Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, Москва
poluhina@lebedev.ru

Ключевые слова: треки ядер, оливин палласитов, сверхтяжелые ядра галактических космических лучей, ядра трансурановых элементов

Ссылка: Кашкаров, Л. Л., А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров, Л. А. Гончарова, А. И. Ивлиев, Г. В. Калинина, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Н. Г. Полухина, А. С. Русецкий, Н. И. Старков (2011), Идентификация заряда ядер трансурановых элементов галактических космических лучей по химически травимым трекам в кристаллах оливина из палласитов, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6033, doi:10.2205/2011NZ000163.

Введение

В работе, проводимой по проекту ОЛИМПИА [Ginzburg et al., 2005], получены новые результаты измерения зарядового спектра ядер ультратяжелых элементов ($Z > 70$) галактических космических лучей (ГКЛ). Использовалась разработанная нами методика поиска и высокоточного измерения в автоматическом режиме на ПАВИКОМ [Feinberg et al., 2004; Alexandrov et al., 2008] геометрических параметров длиннопробежных треков, химически травимых в кристаллах оливина из палласитов Марьялахти и Игл Стэйшн. Идентификация заряда ядер проводилась по данным калибровочных экспериментов с ускоренными ядрами ³⁶Kr, ⁵⁴Xe, ⁷⁹Au и ⁹²U, а также теоретически рассчитанной по программам SRIM2006 и GEANT4 травимой длине треков для ядер с разным зарядом [Kashkarov et al., 2008; Александров и др., 2009]. В статье приводится описание методики идентификации заряда трансурановых элементов, основанной на аппроксимации экспериментально определенных геометрических и динамических параметров травимых в кристаллах оливина треков, образованных ядрами с зарядом $82 < Z < 92$ [Александров и др., 2008].

Методика идентификации заряда сверхтяжелых ядер ГКЛ

Для определения заряда ядер сверхтяжелых ($Z > 50$) элементов в составе ГКЛ нами использовались два основных параметра треков, химически травимых в кристаллах оливина из палласитов Марьялахти и Игл Стэйшн: геометрического – измеренной длины (L) и динамического – скорости травления ($V_{TR} = L/t$, где t – время травления трека на данном этапе).

При этом мы исходили из следующего:

(1) Геометрически трека представляет собой “шприц”, состоящий из двух частей – основной, цилиндрической и конусообразной с диаметрами D и d , соответственно, причем ($d \ll D$).

(2) Экспериментальные данные калибровки соотношения величин V_{TR} и RR (остаточный пробег ядер) [Kashkarov et al., 2008; Александров и др., 2009].

(3) Регистрируемая длина L для большинства травимых треков оказывается меньше, чем RR .

(4) Параметры зависимости V_{TR} от RR рассчитаны, исходя из: (а) теоретических оценок с помощью программ SRIM2006 и GEANT4 длин пробега ядер с энергией в интервале $E_{МАКС} - E_{МИН}$, для которого $(dE/dx) > (dE/dx)_{КРИТ}$. $(dE/dx)_{КРИТ} = 18 \pm 2 \text{ МэВ} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{см}^2$; (б) Величина RR соответствует интервалу энергии ядра $E_{ОСН.МАКС} - E_{ОСН.МИН}$ для основной зоны травления; (в) Длина основной зоны треков ядер железа ($Z=26$) $(R_{ОСН})_{26} \approx 0.2 \times (R_{ПОЛН})_{26}$. Исходя из этого, для ядер с зарядом Z $R_Z \approx R_{26} \times (R_{ОСН})_Z / (R_{ОСН})_{26}$.

Исходя из калибровочных экспериментов, выполненных с ускоренными ядрами ³⁶Kr, ⁵⁴Xe, ⁷⁹Au и ⁹²U, для ядер с зарядом Z от 50 до 92 получено соотношение (см. рис. 2) величин

скорости травления (V_{TR}) и травимой длины треков (L_{TR}) при определенных значениях остаточной длины пробега (RR) ядер перед их остановкой.

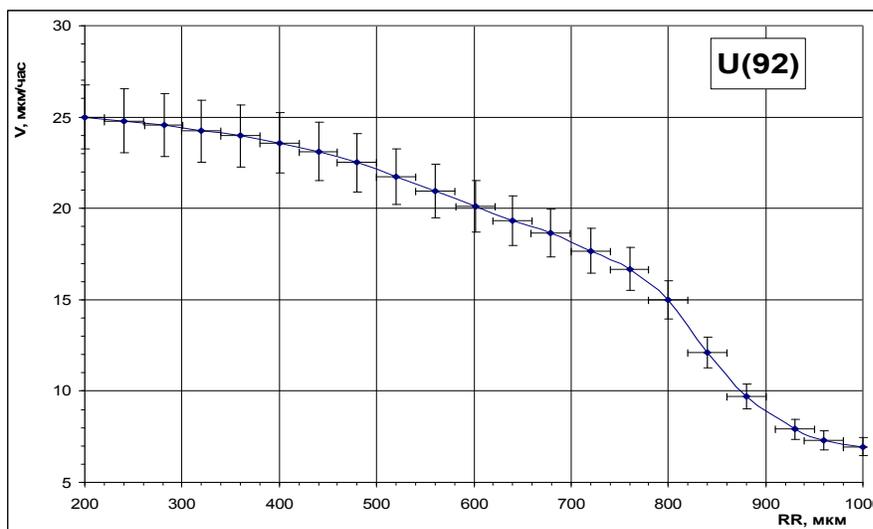


Рис. 1. Зависимость скорости травления треков ядер урана от величины их остаточного пробега в кристаллах оливина из палласита Марьялахти по данным работы [Perron and Maury, 1986].

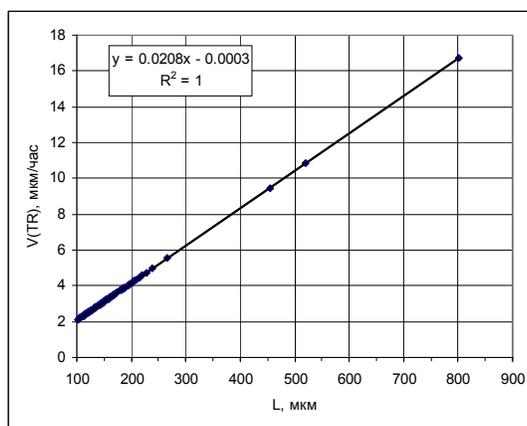


Рис. 2. Зависимость скорости травления треков (V_{TR}) сверхтяжелых ($Z > 55$) ядер ГКЛ от измеренной длины треков ($L_{ИЗМ}$) в оливине палласита Марьялахти.

Приведенный на рис. 2 график зависимости между $V_{TR,L}$ и $L \equiv L_{ИЗМ}$ демонстрирует строго (коэффициент корреляции $R^2 = 1$) линейный характер соотношения между этими параметрами треков в очень широком диапазоне травимой длины треков от ~ 100 мкм до ~ 800 мкм. Отвечающие этому интервалу длин треков величины заряда ядер находятся в интервале $Z \sim (50 - 92)$. Следует отметить, что практически для всех исследуемых треков проводится регистрация лишь некоторой, неопределенной части их полной травимой длины, то есть $L_{ИЗМ} \leq L_{RR}$. Следствием этого должно быть неизбежное систематическое занижение регистрируемой величины $L_{ИЗМ}$, приводящее к соответствующему уменьшению значений определяемой скорости $V_{TR,L}$ и идентифицируемых зарядов ядер. Однако, как показали результаты (см. рис. 2), при более дифференцированном по времени измерении травимой длины треков источник этой систематической погрешности может быть доведен до величины, не превышающей $\sim 10\%$.

На рис. 3 представлен график зависимости идентифицируемого заряда ядер ультра тяжелых ($Z > 80$) элементов ГКЛ от величины остаточного пробега $RR_{ОСН}$. Расчетные параметры полученных прямых этой зависимости приведены в Таблице.

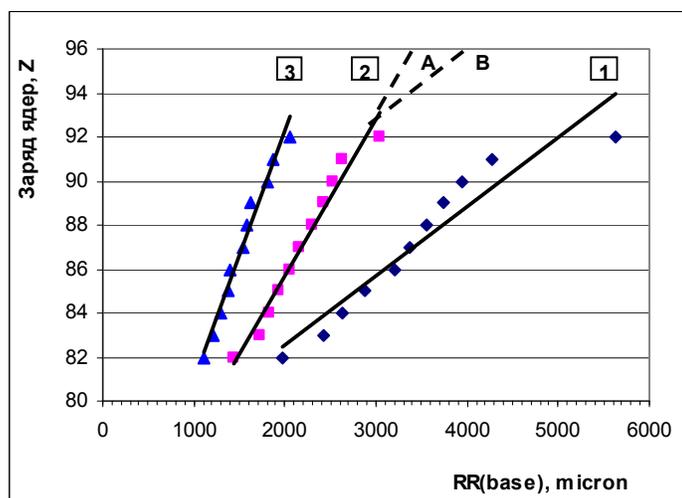


Рис. 3. Зависимость идентифицируемого заряда ($Z > 80$) ядер ГКЛ от теоретически рассчитанных значений их остаточного пробега $RR_{\text{очн}}$ в оливине палласита Марьялахти. Аппроксимирующие прямые 1, 2, 3 отвечают точкам, построенным для $(dE/dx)_{\text{крит}}$, равным 16, 18 и 20 $\text{МэВ}\cdot\text{мг}^{-1}\cdot\text{см}^2$, соответственно. Пунктиром обозначены направления двух аппроксимирующих в область ($Z > 92$) прямых: (А) для случая продолжения линейной зависимости $Z = f(RR_{\text{очн}})$ и (В) для случая нелинейного возрастания $RR_{\text{очн}}$ по мере увеличения заряда ядер.

Таблица. Параметры прямых зависимости идентифицируемого заряда ($82 \leq Z \leq 92$) ядер ГКЛ от теоретически полученных значений их остаточного пробега $RR_{\text{очн}}$ в оливине палласита Марьялахти

$(dE/dx)_{\text{крит}}, \text{МэВ}\cdot\text{мг}^{-1}\cdot\text{см}^2$	$Z = f(RR_{\text{очн}})$	$R^2^{(*)}$
16	$Z = 0.0032 \cdot RR_{\text{очн}} + 76.2$	0.9077
18	$Z = 0.0071 \cdot RR_{\text{очн}} + 71.411$	0.9713
20	$Z = 0.0112 \cdot RR_{\text{очн}} + 69.75$	0.9772

Примечание: $(*) R^2$ – коэффициент корреляции.

Результаты

К настоящему времени изучено около 120 кристаллов оливина, выделенных из палласитов Марьялахти и Игл Стэйшн. Зарегистрировано более 1500 треков от ядер с зарядом $50 < Z < 92$, относительная распространенность которых находится в удовлетворительном согласии с данными других исследований, проводимых с помощью измерительной аппаратуры [Shapiro, and Silberberg, 1974; Israel, 1981].

Из общего числа этих ядер около 200 треков относятся к ядрам ГКЛ с $Z > 70$ и шесть к Th-U - группе актиноидов ($90 < Z < 92$). Поток последних по отношению к ядрам группы железа составляет $\sim 6 \times 10^{-7}$. Обнаружен также один трек, параметры которого указывают на его формирование ядром трансуранового элемента с идентифицированным путем аппроксимации зарядом $Z \approx 108$.

Заключение

В работе приводится рассмотрение проблемы идентификации заряда ядер, треки от которых при $L_{\text{TR}} > L_{\text{TR,U}}$ травятся со скоростью $V_{\text{TR}} > V_{\text{TR,U}}$, что указывает на их формирование в результате торможения ядер трансурановых ($Z > 92$) элементов.

На основании выполненных теоретических расчетов значений полной травимой длины треков и экстраполяции калибровочных параметров треков в область зарядов вплоть до $Z \approx 110$ получена оценка величины эффективного заряда единственного ядра, сверхдлинный трек от которого был обнаружен нами в кристалле оливина из палласита Игл Стэйшн.

Литература

Александров А. Б., А. В. Багуля, М. С. Владимиров, Л. А. Гончарова, А. И. Ивлиев, Г. В. Калинина, Л. Л. Кашкаров, Н. С. Коновалова, Н. Г. Полухина, А. С. Русецкий, Н. И. Старков, В. А. Царев (2008), Методика определения заряда ядер космических лучей по трекам в кристаллах оливина из метеоритов. *Краткие сообщения по физике ФИАН*. №7. 19-27

Александров А. Б., 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, В. А. Царев (2009), Калибровочные измерения характеристик треков ядер сверхтяжелых элементов в кристаллах оливина из метеоритов. *Приборы и техника эксперимента. Техника ядерного эксперимента*. №2. 38–42.

Alexandrov A. B., L. L. Kashkarov, N. G. Polukhina, N. I. Starkov (2008), The pattern recognition software for automatic treatment of track detector data at the PAVICOM completely automated measuring facility. *Radiation Measurements*. 43. S120–S124.

Feinberg E. L., K. A. Kotelnikov, N. G. Polukhina (2004), Completely Automated Measuring Complex (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing. *Phys. Particles and Nuclei*. 35. 409–423.

Ginzburg V. L., N. G. Polukhina, E. L. Feinberg, N. I. Starkov, V. A. Tsarev (2005), Problems and Horizons of the Search for Tracks of Heavy and Superheavy Nuclei in Olivine Crystals from Meteorites (OLIMPIYA project). *Dokl. Physics*. 50, 283-285.

Israel M. H. (1981), Ultraheavy cosmic rays – HEAO-3 results. *17th International Cosmic Ray Conference*. 12. 53–65.

Kashkarov L. L., N. G. Polukhina, N. I. Starkov, G. V. Kalinina, A. I. Ivliev, A. B. Alexandrov, L. A. Goncharova, I. Yu. Tarasova (2008), Geometrical track parameters in the pallasite olivine: Identification of the cosmic ray heavy nuclei. *Radiation Measurements*. 43. S266–S268.

Perron C. and M. Maury (1986), Very heavy ion track etching in olivine. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 11, № (1-2). 73–80.

Shapiro M. M., R. Silberberg (1974), Cosmic-ray nuclei up to 10^{10} eV/u in the Galaxy. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A*. 277. 319–348