

## Эффект увеличения полной длины пробега ускоренных ионов железа в кварцевом стекле, содержащем треки

Л. Л. Кашкаров, С. Н. Шиловреева, Г. В. Калинина  
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН  
[leokash@mail.ru](mailto:leokash@mail.ru)

*Ключевые слова: следы торможения ядер, треки, силикатные минералы, облучение космическими лучами*

**Ссылка:** Кашкаров, Л. Л., С. Н. Шиловреева, Г. В. Калинина (2011), Эффект увеличения полной длины пробега ускоренных ионов железа в кварцевом стекле, содержащем треки, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6034, doi:10.2205/2011NZ000164.

### Введение

Ионизирующее космическое излучение является одним из важнейших факторов, влияющих на структуру и фазовый состав облучаемых силикатов. Для исследования модификации силикатов под воздействием заряженных частиц, имитирующих космическое излучение, авторами в последние годы проведено, в частности, моделирование миграции углерода в оливинах метеоритов под воздействием ионизирующего излучения [Шиловреева, Кузьмин, 2003]. Моделированию процессов ионной модификации силикатной пыли в протопланетных дисках посвящена работа [Шиловреева, Кузьмин, 2004]. Перераспределение имплантированных в кварц атомов железа, стимулированное последующим протонным облучением, моделирующим воздействие космических лучей, изучалось в работах [Шиловреева и др., 2006; Shilobreeva et al. 2007]. Экспериментальное изучение модификации силикатов вещества лунного грунта, происходившее под воздействием солнечных космических лучей, проведено в работах [Kashkarov et al., 2006; Кауикаров и др., 2007; Kashkarov et al., 2010]. Выполненные работы показали необходимость продолжения как экспериментальных, так и теоретических исследований в этом направлении.

В настоящей работе приводятся предварительные результаты теоретической оценки величины предполагаемого эффекта увеличения полной длины пробега ускоренных (энергия  $E = 85$  кэВ) ионов железа в кварцевом стекле, подвергнутом предварительному облучению ускоренными ионами железа с той же энергией. Количественная оценка возможного влияния этого эффекта на экспериментально исследуемое объемное распределение ионов, имплантируемых при проведении модельных экспериментах в силикатное вещество, может иметь существенное значение.

### Механизм изменения длины пробега ионов в кварце

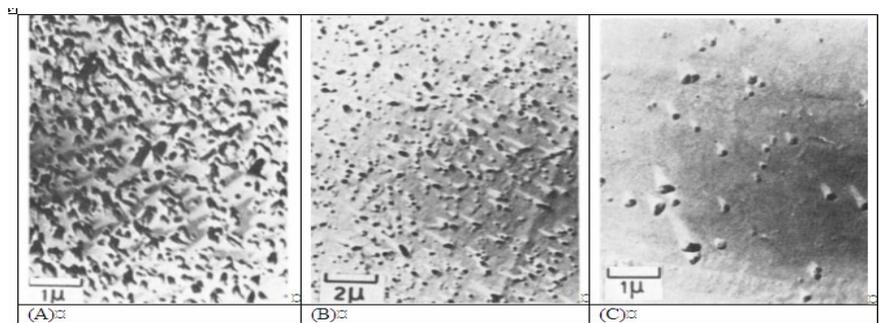
Предположение о возможном механизме изменения длины пробега ионов в диэлектрическом твердом веществе, в частности, в кварце основано на следующем:

(а) При прохождении высокоэнергичных ионов в твердом, диэлектрическом веществе в результате взаимодействия с электронами и ядрами среды вдоль каждого следа торможения формируется цилиндрическая область диаметром (10-30) Å дефекто-структурных нарушений, представляющая собой после соответствующего химического травления пустотелый трек;

(б) Облучение вещества определенной дозой ионов первого облучения приводит к образованию соответствующей объемной плотности зон нано-структурных нарушений;

(в) При прохождении этих зон ионы следующего облучения испытывают (по аналогии с эффектом каналирования, наблюдаемым при прохождении заряженных частиц между плоскостями симметрии кристаллической решетки силикатов) менее интенсивное, главным образом, ядерное взаимодействие, что приводит к соответствующему уменьшению их удельных потерь энергии. В результате, последнее приводит к эквивалентному увеличению полной длины пробега ионов последующего, второго и т.д. этапов облучения.

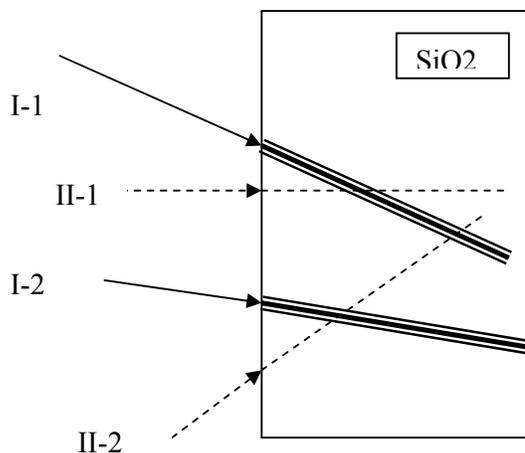
На микрофотографиях рис.1 приведены примеры наблюдения химически травимых в кристаллах оливина из лунного грунта треков с варьирующей в широких пределах поверхностной плотностью.



**Рис. 1.** Микрофотографии треков ядер группы железа солнечных космических лучей, химически протравленных в кристаллах оливина, выделенных из вещества колонки лунного грунта АЛС «Луна 16». Плотность треков (ед. трек/см<sup>2</sup>): (А)  $\sim 10^9$ ; (В)  $\sim 3 \cdot 10^8$ ; (С)  $\sim 5 \cdot 10^7$ .

Очевидно, что величина предполагаемого эффекта увеличения длины пробега ядер в силикатном веществе будет прямо пропорционален объемной плотности треков от предшествующего ядерного облучения.

На рис.2 схематически изображены следы торможения ядер тяжелых элементов, вдоль которых образуются зоны (треки) радиационного повреждения кристаллической решетки облучаемого силиката. Показаны участки пересечения одних треков другими. В области этих участков удельные потери энергии ядер, пролетающих в веществе в последующие промежутки времени. Будут более низкими по сравнению с ядрами, тормозящимися на более раннем этапе облучения.



**Рис.2** Схематическое изображение хаотически ориентированных следов торможения двух ионов «первого» этапа облучения (I-1, I-2) и пересечение этих следов ионами (II-1, II-2) последующего облучения.

#### Результаты расчетов

В рамках предполагаемой модели получено, что при дозе первого облучения ионами железа  $(1-10) \cdot 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> средняя длина пробега ионов железа второго облучения возрастает на (5-10)%.

#### Выводы

Получены теоретически рассчитанные данные об инициированном радиационным воздействием удлинении длины пробега ускоренных ионов железа, имплантируемых в кварцевое стекло, содержащее хаотически ориентированные следы торможения ионов железа предварительного облучения.

Характер распределения концентрации имплантируемых ионов железа по глубине от облучаемой поверхности кварца изменяется в зависимости от энергии и интегральной дозы ионов железа.

## КАШКАРОВ И ДР.: ДЛИНА ПРОБЕГА УСКОРЕННЫХ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА В СТЕКЛЕ

Рассматриваемый эффект может быть использован при обсуждении результатов экспериментального исследования радиационного воздействия, модельно имитирующего отдельные виды космического излучения на силикаты.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-05-00253-а*

### **Литература**

Кашкаров Л. Л., С. Н. Шилобреева, Г. В. Калинина (2007), К проблеме радиационно-индуцированной модификации силикатов: определение степени разупорядочения структуры микрокристаллов оливина лунного грунта под действием космических лучей. "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-12.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2007/informbul-1_2007/planet-12.pdf)

Шилобреева С. Н., Л. Е. Кузьмин (2003), Моделирование миграции углерода в оливинах метеоритов под воздействием ионизирующего излучения. *Астрономический Вестник*, 37, №2, 144-149.

Шилобреева С. Н., Л. Е. Кузьмин (2004) Моделирование процессов ионной модификации силикатной пыли в протопланетных дисках. *Астрономический Вестник*, 38, №1, 63-70

Шилобреева С. Н., Л. Л. Кашкаров, М. Ю. Барабаненков, А. Н. Пустовит, В. И. Зиненко, Ю. А. Агафонов. (2006), Протонно-стимулированное перераспределение атомов железа в кварце: экспериментальное моделирование воздействия космического излучения. *ДАН*, 411, №5, 676-679.

Kashkarov L. L., S. N. Shilobreeva, G. V. Kalinina (2006), Chemical modification of the Luna 24 olivine grains under solar cosmic ray irradiation. *Abstr. Lunar and Planetary Science XXXVII, Houston, CD-ROM*, #1080.

Kashkarov L., S. Shilobreeva, G. Kalinina (2010), Irradiation by solar cosmic ray nuclei: disordering and chemical modification of lunar soil silicate grains. *Abstracts 22<sup>nd</sup> European Cosmic Ray Symposium. 3-6 August 2010, Turku, Finland*. 144-145.

Shilobreeva S. N., L. L. Kashkarov, M. Yu. Barabanenkov, A. N. Pustovit, V. I. Zinenko, Yu. A. Agafonov (2007), Proton and temperature-induced competitive segregation of iron on surface and volume sinks of silica. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (B)*, 256, No1, 216-218