

К ВОПРОСУ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭФФЕКТОВ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Кашкаров Л.Л.

Институт геохимии и аналитической химии им В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН
ugeochem@geochem.home.chg.ru; тел.: (095) 137-86-14

Ключевые слова: силикаты лунного грунта, радиационные эффекты, треки

Введение

Вещество лунного реголита подвергается воздействию широкого спектра частиц космического излучения. В зависимости от их заряда, массы и энергии в кристаллах силикатных минералов возможны разного рода радиационные эффекты [1]. Одним из них является изменение химического и фазового составов силикатов, облучаемых на самой поверхности реголита наиболее интенсивным потоком ионов солнечного ветра и солнечных космических лучей.

Моделирование процессов модификации силикатов под воздействием низкоэнергетичных ионов H, D, He и Ar [2,3] показало, что химический состав межпланетного вещества может быть существенно изменен в результате его облучения ядерной компонентой космических лучей. В связи с этим, одной из задач космохимии является исследование процессов ионной модификации элементного состава природных объектов, в частности, силикатов лунного грунта.

Целью настоящего исследования является разработка методики поиска, идентификации и отбора индивидуальных микрокристаллов силикатных минералов из вещества лунного реголита с определенными радиационными и радиационно-термическими характеристиками. Отобранные таким образом кристаллы предназначаются для изучения процессов структурной и химической модификации, происходившей в них при облучении ионизирующим излучением СВ и СКЛ во время нахождения на поверхности Луны.

В работе приводятся наиболее характерные случаи облучения микрокристаллов на поверхности лунного реголита. Для индивидуальных кристаллов силикатных минералов на основании измеренных параметров треков ядер группы Fe ($23 < Z < 28$) СКЛ может проводиться количественная оценка величины доз облучения ионами СВ разных элементов с различной энергией.

Эффекты радиационного воздействия на поверхности Луны.

Вещество, находящееся на поверхности Луны в отсутствии экранирующего слоя подвергается облучению наиболее интенсивным потоком ядер СВ и СКЛ. Из-за огромного различия энергии ядер, входящих в состав СВ и СКЛ, практически в каждом из кристаллов, когда-либо облучаемых на лунной поверхности, присутствуют следы разного рода радиационных микронарушений. Наиболее характерными для сильно облученных микрокристаллов силикатов лунного грунта являются аморфные покрытия, образовавшиеся на поверхности кристаллов в результате бомбардировки ионами СВ, а также треки ядер VH-группы СКЛ.

Аморфные покрытия на поверхности кристаллов. Аморфизация верхнего слоя кристаллов происходит в результате имплантации низкоэнергетичных ионов СВ ($E_{\text{ион}} \sim 1 \text{ кэВ} \times \text{нукл}^{-1}$). Толщина аморфного слоя должна соответствовать длине пробега ионов H и He, на долю которых приходится около 99% всего излучения СВ. Однако, как показали многочисленные наблюдения микрокристаллов лунного реголита из колонки "Луны 16", толщина аморфного покрытия изменяется от ~ 10 нм до ~ 100 нм. Можно указать на две основные причины, приводящие к существенному различию толщины аморфного слоя:

1) Геометрия облучения кристалла на поверхности реголита, причем максимальная толщина аморфного слоя будет соответствовать случаю нормально ориентированных к облучаемой поверхности кристалла ионов СВ;

2) Возможное удаление части вещества аморфного покрытия в результате эрозионных процессов. К такому выводу, в частности, приводит обнаружение в некоторых сильно облученных кристаллах лунного грунта, газовых пузырьков, расположенных в приповерхностном тонком (≤ 0.1 мкм) слое этих кристаллов. Формирование газовых пузырьков, как показали экспериментальные исследования [4], происходит в результате нагрева облученных ионами СВ кристаллов. Существенным при этом оказывается то, что при большой поверхностной плотности пузырьков часть из них перекрывается друг с другом, пузырьки вскрываются, и это приводит к

эффективному удалению вещества с поверхности кристалла. Кроме того, эрозия вещества с поверхности силикатов происходит в результате бомбардировки микрометеоритами, а также при выбивании с поверхности отдельных атомов, происходящем при ядерных столкновениях.

Таким образом, исходя только из факта наличия или отсутствия на поверхности кристаллов аморфного слоя, нельзя сделать однозначный вывод как о вероятном облучении этих кристаллов ионами СВ, так и о суммарной дозе ионного облучения.

Треки ядер VH-группы СКЛ. Глубина проникновения ядер VH-группы, образующих в силикатах видимые следы своего торможения, в зависимости от энергии составляет от ~ 0.1 мкм до ~ 15 мкм для $E_{Fe} \approx (0.1 - 10) \text{ МэВ} \times \text{нуклон}^{-1}$. Ядра с такой энергией входят в состав СКЛ и являются основным источником треков, наблюдаемых в силикатах, когда-либо оказавшихся на лунной поверхности.

В плане рассматриваемой проблемы необходимо указать на следующие характерные особенности трековых исследований: (1). Плотность треков от VH-ядер СКЛ в области низких ($\leq 1 \text{ МэВ} \times \text{нуклон}^{-1}$) энергий достигает $10^{10} - 10^{11}$ трек $\times \text{см}^{-2}$. Кристаллы микронных размеров с такой плотностью треков изучаются с помощью высоковольтного электронного микроскопа [5]. Однако условия наблюдения в этом случае не дают возможности для дальнейшего отбора и исследования микрокристаллов с максимальной дозой имплантированных ионов СВ. (2). Кристаллы размером больше ~ 10 мкм, имеющие так же очень высокую ($\sim 10^{10}$ трек $\times \text{см}^{-2}$) плотность треков, с помощью описанной выше методики просматриваться не могут из-за поглощения электронов. Для изучения треков с помощью электронного сканирующего микроскопа, однако, необходимо проводить предварительное "мягкое" химическое травление треков.

Заключение

Изложенное выше приводит к необходимости применения следующей методики обнаружения и отбора индивидуальных кристаллов лунного грунта, предназначенных для изучения в них процессов ионной модификации под действием имплантированных ионов СВ и сравнительно низкоэнергетичных ядер СКЛ: (1) Для исследования из вещества лунного грунта отбираются кристаллы силикатов размером не менее $\sim (50 - 100)$ мкм; (2) Кристаллы монтируются в эпоксидные таблетки, шлифуются, полируются и протравливаются в условиях "мягкого" травления с целью выявления наиболее сильно облученных образцов; (3) После предварительного просмотра и идентификации кристаллов с плотностью треков не ниже $\sim 10^8$ трек $\times \text{см}^{-2}$ отобранные таким образом кристаллы монтируются вторично на новую таблетку, с помощью которой проводится детальное измерение параметров треков на электронном сканирующем микроскопе. При этом главным критерием облучения данного кристалла на лунной поверхности становится наличие градиента плотности треков. Характер изменения плотности треков в приповерхностном (около 20 мкм) слое кристалла является, в частности, индикатором степени его эрозионной переработки. Для кристаллов с высокой плотностью треков по всему объему, не обнаруживающих градиента, возможно облучение в течение длительного времени на некоторой глубине от поверхности реголита. В данном случае радиационное воздействие от ионов СВ ставится под сомнение.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 04-05-64930)

Литература

1. *Kashkarov L.L.* 1996. *Advanced Mineralogy*. Springer-Verlag, V.3. P. 73.
2. *Шилобреева С.Н., Кузьмин Л.Е.* 2003, *Астрон. Вестн.* Т.37, №2, с.144;
3. *Шилобреева С.Н., Кузьмин Л.Е.* 2004, *Астрон. Вестн.* Т.38, №1, с.1.
- 4 *Kashkarov L.L. et al.* 1998. *Abstr. of the 3rd Internat. Conf. on the explor. and utilizat. of the Moon*, 1998, P. 24.
5. *Borg J. et al.* 1976. *Earth Planet. Sci. Lett.* V.29. P. 161.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(22) 2004

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2004 года (ЕСЭМПГ-2004)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1/planet-3.pdf

Опубликовано 1 июля 2004 г.

© *Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2004*

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на "Вестник Отделения наук о Земле РАН" обязательна