

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В КРИСТАЛЛАХ СИЛИКАТНЫХ МИНЕРАЛОВ ЛУННОГО ГРУНТА

Кашкаров Л.Л., Асонов С.С., Ивлиев А.И., Калинина Г.В.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

igeochem@geochem.home.chg.ru

Вестник Отделения наук о Земле РАН, № 1(20)'2002

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2002/informbul-1.htm#planet-4

Введение

Вещество лунного грунта, находясь в поверхностном слое реголита, постоянно облучается ядрами космического излучения, основными составляющими которого являются: низкоэнергетичные ($E_k \sim 1$ кэВ/нуклон) ионы солнечного ветра (*СВ*); ядра солнечных космических лучей (*СКЛ*) с $E_k \sim (1-100)$ МэВ/нуклон и галактические космические лучи (*ГКЛ*) с $E_k \geq 100$ МэВ/нуклон. В результате столь разнообразной радиационной переработки в различных зернах силикатных минералов накапливаются специфические эффекты, позволяющие проводить детальное изучение радиационной истории индивидуальных микрокристаллов [1]. Одним из наиболее интересных эффектов, связанных с ионами *СВ*, были обнаруженные в сильно облученных зернах силикатных минералов лунного реголита микро-пузырьки, ("bubbles") газа [2]. Последующие за этим исследования [3,4] привели к предположению, что эти микро-пузырьки, содержащие очень высокие концентрации газа (в основном – это имплантированный *He*, входящий в состав ионов *СВ*) могли сформироваться в сильно облученных кристаллах силикатных минералов, подвергшихся в дальнейшем существенному нагреву.

Комплексное изучение радиационно-термической истории вещества лунного реголита, проведенное в последние годы с помощью термолюминесцентного и трекового методов [5-7], также показали, что газовые микро-пузырьки, наблюдаемые на поверхности сильно облученных ионами *СВ* отдельных кристаллов силикатных минералов, могли образоваться в результате нагрева до $(500-600)^\circ\text{C}$ при ударно-термических событиях, главным образом, метеоритной бомбардировки вещества на поверхности Луны. В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования процесса формирования газовых микро-пузырьков в индивидуальных кристаллах *Ol*, выделенных из колонки КА Луна-16.

Исследуемые образцы

Для изучения были взяты 30 кристаллов оливина (*Ol*), фракция (120-200) мкм, выделенных из образца 1603 колонки грунта КА Луна-16. Эти кристаллы *Ol* были отобраны примерно из 200 кристаллов, практически не содержащие инородных микровключений и микротрещин. Каждый из отобранных кристаллов характеризовался также высокой дозой радиационного облучения, для оценки которой было проведено химическое травление и подсчет плотности треков (ρ) от *VN*-ядер СКЛ. В результате такого предварительного отбора для дальнейших экспериментов с нагревом и наблюдением образующихся пузырьков были взяты только кристаллы, в которых наблюдается градиент плотности треков: параметры градиента (максимальная величина плотности $\rho \geq 10^8$ см⁻² и более чем 2-х кратное уменьшение плотности треков на глубине ≥ 70 мкм) указывают на облучение данного кристалла на самой поверхности реголита при толщине экранирующего слоя вещества $\leq 10^{-3}$ г·см⁻².

Методика измерения

Для наблюдения и измерения параметров пузырьков газа (размеры, поверхностная плотность, морфология) использовался электронный сканирующий микроскоп типа JEOL- с кратностью увеличения до $\sim 50000\times$. Каждый из отобранных для исследования кристаллов *Ol* раздавливался на 4-5 фрагментов, служащих в дальнейших опытах с нагревом в качестве индивидуальных объектов. Каждый из таких обломков кристаллов помещался в отдельную кварцевую ампулу, которая после этого обезгаживалась до форвакуума и запаивалась. Подготовленные таким образом четыре партии (по 10 обломков кристаллов лунного *Ol* в каждой) исследуемых образцов подвергались нагреву в трубчатой печи при температуре 500, 600, 700, и 800 °С в течение 10 и 60 минут. После нагрева обломки микрокристаллов извлекались из ампул и участки поверхности, соответствующие начальной поверхности

исходного кристалла *Ol*, тщательно просматривались в ЭСМ с целью выявления и измерения параметров приповерхностных газовых микро-пузырьков.

Результаты и обсуждения

Из 30-ти изученных кристаллов *Ol* лунного грунта, относящихся по трековым характеристикам к микрообъектам, облученным достаточно высокой дозой ($\Sigma \geq 10^{18} \text{ см}^{-2}$) ионов *He* в составе *CB*, только в четырех кристаллах после нагрева при 600°C в течение 60 мин, или при 700°C в течение 10 мин были обнаружены вновь образовавшиеся пузырьки газа. Поверхностная плотность пузырьков газа для изученных кристаллов лежит в пределах $(10^9 \div 10^{11}) \text{ см}^{-2}$, что соответствует величинам плотности, наблюдаемых нами для кристаллов *Ol*, *Pl* и *Px* колонки Луны-16, не подвергавшихся нагреву в лабораторных условиях [5]. Относительное число таких кристаллов составляет ~10%, что указывает на сложность процесса формирования газовых пузырьков в природных условиях, в частности – в верхнем слое лунного реголита. Размер газовых пузырьков, наблюдаемых на поверхности кристаллов *Ol*, в виде овальных (от сферической до эллипсоидальной формы) образований, варьирует в широких пределах – от ~10 до 100 нм.

Проведенные нами ранее с помощью 1 МэВ высоковольтного электронного микроскопа исследования морфологии и структуры микрокристаллов лунного грунта показали, что на поверхности сильно облученных ионами *CB* кристаллов наблюдается слой аморфного вещества. Толщина слоя, как правило, не превышает ~100 нм, что отвечает слою полного поглощения ионов *CB*.

Исходя из приведенных результатов, процесс формирования газовых пузырьков в приповерхностной зоне кристаллов силикатных минералов может быть представлен следующим образом. В кристаллах, облученных ионами *CB* с суммарной дозой $\Sigma \geq 10^{18} \text{ ион-см}^{-2}$, образуется поверхностный аморфизованный слой. В случае сравнительно кратковременного (менее часа) нагрева до температуры $T \sim (600-700)^\circ\text{C}$ в этом аморфном слое за счет диффузии и миграции атомы *He* эффективно концентрируются в газовых микро-пузырьках, начальные размеры которых не превышают ~нм. Дальнейшее (или более длительное по времени) нагревание приводит к тому, что размер этих пузырьков увеличивается до ~100 нм, причем на поверхности кристалла появляются воронки, соответствующие вскрытым пузырькам.

Следует отметить, что исследование термoluminesценции, проведенное нами для индивидуальных кристаллов лунного грунта [6] показало наличие в них следов ударно-термического воздействия, что подтверждает наше предположение о микрометеоритной бомбардировке на лунной поверхности, как об одном из наиболее вероятных источников нагрева сильно облученных кристаллов.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования процесса формирования газовых микро-пузырьков в кристаллах оливина лунного грунта показали, что:

- 1) Микро-пузырьки наблюдаются только в кристаллах с градиентом плотности треков при ее максимальной величине на поверхности кристалла $\rho \geq 10^8 \text{ см}^{-2}$, что соответствует интегральному потоку ионов *He* в составе *CB* $\Sigma \sim (10^{17}-10^{18}) \text{ см}^{-2}$;
- 2) Образование газовых микро-пузырьков происходит при нагреве сильно облученных кристаллов до $T = (600-700)^\circ\text{C}$ в течение $\sim (1-0.1)$ часа, соответственно;
- 3) Наиболее вероятным механизмом формирования газовых пузырьков являются диффузия и миграция имплантированных ионов *He CB*. В результате *He* концентрируются в газовые пузырьки с размерами ~нм. Так как вещество поверхностного слоя микрокристаллов, облученных ионами *CB* дозой $\Sigma \geq 10^{18} \text{ см}^{-2}$, находится в аморфном состоянии, то это способствует формированию сферических пузырьков размером до нескольких сотен нм.
- 4) Источником локального нагрева вещества лунного реголита являются многократные импактные события, происходящие под действием выпадающих на поверхность Луны микрометеоритов. В результате такого практически “точечного” процесса нагрева относительное число кристаллов *Ol* микро-пузырьками составляет около 10%.
- 5) Экстраполяция полученных результатов на более короткие (~сек.) интервалы времени дает нижнее граничное значение температуры образования микропузырьков $T \sim 1000^\circ\text{C}$.

Литература

1. *Кашкаров Л.Л.* (1988). Изв. АН СССР, сер. физ. Т.52, №12. 2321 с.
2. *Akai. J.* (1994). Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites.V.7. 94 p.
3. *Futagami, T. et al.* (1993). GCA V.57. 3177 p.
4. *Brownlee, D. et al.* (1998). Lunar Planet. Sci. 29. P.1869.
5. *Kashkarov L.L. et al.* (1998). Abstr.3rd Int. Conf. on Explor. and Utilizat. of the Moon. P.37.
6. *Kashkarov L.L. et al.* (1999). Abstr. 30th Microsymposium on comparative planetology, Moscow. 1999. P.41.
7. *Kashkarov L.L. et al.* (2000). Abstr. 20th Int. Conf. on Nuclear Tracks in Solids, Portoroz, Slovenia, P.532.