Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» №1(27)'2009 ISSN 1819 - 6586 URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h dgggms/1-2009/informbul-1 2009/planet-5.pdf

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИМПЛАНТАЦИИ ГЕЛИЯ В АНАЛОГИ МИНЕРАЛОВ ЛУННОГО РЕГОЛИТА Ануфриев Г.С., Болтенков Б.С. (ФТИ РАН), Дубровский Ф.В., Пименов В.П. (ИМЕТ РАН), Слюта Е.Н., Яковлев О.И. (ГЕОХИ РАН)

slyuta@mail.ru

Ключевые слова: лунный грунт, солнечный ветер, плазма, гелий, имплантация

В работе исследуется малоизученный процесс имплантации гелиевой плазмы в породы, типичные для лунного грунта. Исследовались образцы вулканического стекла (обсидиана), облученные в лабораторных условиях импульсными потоками гелиевой плазмы с кинетической энергией ионов ~ 1 кэВ. Время экспозиции варьировалось в пределах (0,3-1,5 мкс), при этом температура поверхностного слоя образца не превышала 100°C в момент каждого импульсного воздействия. Расчетная плотность потока имплантированного гелия составила 10^{12} атом/см²мкс. Коэффициент имплантации для гелия в обсидиане на основе данных об имплантированном и облучающем потоках оказался незначительным и равным 3.3×10^{-3} %.

Введение

Концентрация захваченных инертных газов солнечного ветра в частицах лунного реголита зависит от химического и минерального состава частиц, от степени зрелости реголита (степени радиационной дефектности кристаллической решетки минерала) и от размеров частиц [1-6]. В зависимости от их состава и структуры концентрация имплантированного гелия в ударном или вулканическом стекле, в основных породообразующих минералах и главных рудных минералах может отличаться до двух порядков. Избирательное обогащение в зависимости от минералогического состава приводит к неоднородному региональному распределению концентрации изотопов гелия в лунном реголите [7, 8].

Солнечный ветер (CB) – сложное явление, характеризуемое многими параметрами [9-12]. При лабораторном моделировании в первую очередь необходимо принять во внимание энергию ионов солнечного ветра. При оценке этого параметра космические исследования показали, что распространение CB на орбите Земли достаточно полно описывается жидкостной моделью, которая учитывает, что скорость любых ионов солнечного ветра одна и та же. В этом представлении энергия описывается единицами W_p /нуклон, где W_p =0,3-3 кэВ энергия (и её вариации) протонов. Следовательно, кинетическая энергия гелия в 4 раза больше энергии протонов, обычно приводящейся в справочной литературе. Отметим также, что соотношение He/H в солнечном ветре может сильно изменяться за счет уменьшения концентрации гелия в зависимости от энергии потока CB и солнечной активности. [12]. Концентрация и относительное содержание гелия в низко-энергичном солнечном ветре существенно ниже, чем его средняя величина, равная 5%. Однако низко-энергичный CB не является частым явлением [9].

Основной целью работы является исследование взаимодействия гелиевой плазмы с земными аналогами лунных минералов и горных пород в лабораторных условиях. Одна из задач исследований заключается в установлении коэффициента имплантации (аккумулирования) ионов, а также в изучении влияния энергии ионов и свойств материалов облучаемых мишеней на процесс имплантации.

Материалы и методики

Эксперименты по облучению образцов проводились на установке «пламенный фокус» ПФ-5М (ИМЕТ РАН) энергосодержанием в 5 кДж с использованием гелия в качестве рабочего газа. Эта установка представляет собой двухэлектродный электроразрядный прибор, в котором наблюдается явление «нецилиндрический Z-пинч» [13]. Принципиальная схема и фотография установки ПФ-5М представлены на рис. 1.

Характерной особенностью установок данного типа является образование в процессе высоковольтного разряда вблизи анода вакуумной камеры сгустка плотной ($\rho \le 10^{19}$ частиц/см³), горячей ($T_{i,e} \le 1$ кэВ) плазмы, который движется в сторону катода со скоростью, порядка 10^7 см/с и со средней кинетической энергией ионов (в нашем случае гелия) $W_i \sim 1$ кэВ. По мере продвижения плазмы вдоль оси разрядной камеры, ее температура снижается, а плотность – уменьшается. При этом практически сохраняется продольный размер сгустка ($l \sim 1$ см) и его скорость. Таким образом, поверхность образца, расположенного на пути плазменного сгустка, подвергается кратковременному импульсному воздействию горячей плазмы (для установки ПФ-5М время импульса $\tau \approx 0.03$ мкс), причем величина энергии взаимодействия плазмы с поверхностью мишени сильно зависит от расстояния, пройденного сгустком с момента его образования. В наших экспериментах, для приближения к условиям воздействия на мишень CB с использованием импульсных потоков плазмы, расстояние от анода установки до мишени было увеличено (оно составляло L = 30 см), а зарядное напряжение – уменьшено до величины 11 кВ, что соответствует ее энергосодержанию в 970 Дж. При таких параметрах облучения образцов гелиевой плазмой температура тонкого поверхностного слоя мишени не превышала 100° С.



Рис.1. Принципиальная схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки ПФ-5М

В качестве материала мишеней для первых экспериментов выбран обсидиан – порода с аморфной структурой. Образцы обсидиана изготавливались в форме кубиков 5×5×5 мм, которые были закреплены в держателе внутри вакуумной камеры установки ПФ-5М так, что основному облучению подвергалась грань, направленная на анод плазменной установки. Таким образом, площадь облучения S составляла величину 0,5×0,5 см². Количество импульсов облучения варьировалось от 0 (необлученный, контрольный образец) до 50. Максимальное суммарное время облучения составляло t = 1,5 мкс. Далее облученные образцы извлекались из плазменной установки и помещались в сбрасывающее устройство металлической вакуумной низкофоновой экстракционной установки (ФТИ РАН), включенной в линию с масс-спектрометром (МС). Система сконструирована так, что содержит блок поглотителей (геттеров), нейтральных к гелию и активных к химически активным компонентам, в огромных количествах выделяющихся из образцов вместе с гелием. Температура экстракции, при которой образцы обсидиана плавились, составляла 1200°С. Время нагрева равно 30 минут. Схема экстракционной установки показана на рис. 2. Детали схемы расшифрованы в подписи к рисунку. В качестве масс-спектрометра использовался двулучевой магнитный резонансный масс-спектрометр [14, 15] в режиме низкого разрешения.

Всего было исследовано 8 образцов, из них: один необлученный (контрольный); пять образцов без какой-либо специальной предварительной обработки поверхности, но с различным временем экспозиции; 2 образца с полированной одной гранью куба и с различным временем облучения. При экспериментах в плазменной установке образцы были ориентированы облучаемой гранью (как полированной, так и неполированной) на анод установки.



Рис.2. Схема низкофоновой цельнометаллической установки для экстракции и очистки гелия, выделенного из образцов: 1 - фланцевое соединение для зарядки образцов; 2 - электромагнит; 3 - магнитный толкатель; 4 - сбрасывающее устройство; 5 - кассета с ячейками для образцов; 6 - термоизоляция заслонки; 7 - заслонка; 8 - смотровое окно: 9 - соединительные фланцы; 10 - высоковакуумные вентили; 11 - манометрический датчик; 12 -термопары; 13 - электродвигатель с редуктором; 14 -автотрансформаторы; 15 - корпус вакуумной электропечи; 16 -тигель; 17-электронагреватели; 18,19 - корпуса титанового и угольного геттеров; 20 -стакан для титанового гетера, 21-сосуд Дьюара; 22 - дополнительный объем. Стрелками с индексами А и Б отмечены точки подключения соответственно высоковакуумного и форвакуумного насосов. Стрелка с индексом МС указывает место вакуумного соединения экстракционной установки с масс-анализатором масс-спектрометра

Результаты, расчеты, модели

Основные результаты измерений и некоторых расчетов показаны на табл. 1. Взвешивание образцов (колонка 4, табл. 1) показало, что их масса заметно изменяется. В проведенных расчетах площадь облучаемой поверхности (площадь одной грани) принята постоянной и равной $S=(0.5\times0.5)$ см². Гелий, возникающий в объеме экстрактора при нагревании образца, имеет несколько компонент различной природы. Это фоновый гелий («память» экстрактора от проведенных ранее опытов); гелий, образовавшийся в обсидиане из-за распада природного урана и тория; гелий, захваченный из окружающей среды при формировании обсидиана, а также имплантированный гелий, появляющийся в образце при облучении его в плазменной установке.

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов*								
N⁰	Число импуль-	Время экспози-	Macca (m),	⁴ He,	⁴ He,			
образца.	сов облучения,	ции (<i>t</i>),	Г.	10 ¹¹ атом/г	$10^{11} \text{ атом/см}^2$			
	N.	мкс.						
1	2	3	4	5	6			
1	необлученный	0	0.406	5±0.85	8±1.1			
	образец.							
5	10	0.2	0.412	5 0+1 0	0.6+1.4			
	10	0.5	0.412	5.9±1.0	9.0±1.4			
2	20	0.6	0.490	7.35±0.95	14±1.4			
3	30	0.9	0.439	6.95±1.4	12±1.9			
4	40	1.2	0.473	12.3±1.3	23.2±2			
6	50	1.5	0.355	не измерено	не измерено			
11	9	0.27	0.411	10.4±1.0	17.2±1.4			

12	20	0.6	0.403	4.9±1.5	8±2			

* Образцы № 11 и 12 с полированной гранью

В наших масс-спектрометрических исследованиях можно считать, что собственный (фоновый) гелий Не_{back}, не связанный с облучением, остается в первом приближении постоянным, а изменение концентрации гелия (He_{impl}) при смене образцов вызывается только изменением времени экспозиции *t*. В этом случае процесс изменения концентрации гелия при изменении времени экспозиции модельно можно представить в виде

(1)

(где He_{total} - общее количество гелия) и оценить результаты при помощи компьютерной программы с учетом ошибок определения концентраций измеренного в опытах гелия (данные колонок 3 и 6, табл. 1).

Результаты компьютерного расчета в виде графика представлены на рис. 3, на котором экспериментальные точки пронумерованы в соответствии с табл. 1. С учетом размерности осей графика получено:

4
He.10⁻¹¹=(7.4±0.94)+(10±1.6)t, (2)

где t – в микросекундах, 4 He – атом см ${}^{-2}$.



Рис.3. Зависимость количества имплантированного гелия от времени экспозиции. Цифры рядом с экспериментальными точками соответствуют номерам образцов в табл. 1

Таким образом, фоновая часть гелия He_{back} (усредненная программой по пяти образцам) составляет величину 7.4×10¹¹ атомов на единицу поверхности. Ошибка определения равна примерно 15%. Плотность потока F_I имплантированного гелия согласно (2) равна величине 1×10¹² атом/см²мкс или 10¹⁸ атом/см² с. Ошибка этого определения составляет также примерно 15%. Заметим, что в величины ошибок включены только случайные ошибки MC-анализов. Коэффициент корреляции графика и экспериментов R = 0,9, то есть достаточно высок. Величину фонового гелия He_{back} более наглядно выражать величиной, отнесенной к массе образца. Это можно сделать компьютерной программой, если использовать данные колонок 3 и 5 (табл. 1). Получим: He_{back} = 4,6.10¹¹ атом/г (1.7×10^{-8} см³ (STP)г⁻¹) с ошибкой в $\cong 15\%$. Таким образом, количество природного гелия в исследованном обсидиане $\le 4,6 \cdot 10^{11}$ атомов на грамм. Вычитание величины собственного фона (памяти) установки уменьшает приведенное значение примерно в два раза.

Влияние полировки поверхности одной грани кубика (образцы №11 и 12) достоверно установить не удалось из-за малого числа измерений. Формально эти результаты можно включить как еще два дополнительных измерения при получении зависимости, представленной графиком (рис.3). Эта операция практически не изменяет величины коэффициентов в выражении (2), но уменьшает величину коэффициента корреляции *R*. Отметим, что измерение гелия образца № 6 сорвалось из-за неожиданного прыжка сетевого напряжения.

Обсуждение

Предложена модель и компьютерный расчет, которые позволяют в валовом составе гелия в образцах идентифицировать природную (постоянную) и имплантированную (переменную, зависящую от времени экспозиции), компоненты гелия. Для модели необходимо использовать несколько образцов с различным временем экспозиции. Это обстоятельство позволяет снизить случайную ошибку определения потока имплантации *F*_L.

Процесс имплантации можно охарактеризовать коэффициентом имплантации K, который равен отношению потока имплантированного гелия F_I к падающему (облучающему) потоку гелия F. В нашем случае этот коэффициент равен:

$$K = \frac{10^{12}}{3.3 \cdot 10^{16}} = 3 \cdot 10^{-5} \tag{3}$$

Таким образом, получено, что коэффициент имплантации гелия K в обсидиан при энергии ионов $E \approx 1$ кэВ и температуре образца около 100°С составляет величину 3.3×10^{-5} , то есть меньше, чем 0.01%. Низкое значение величины коэффициента имплантации предъявляет особые требования к фазе исследований на стадии облучения.

Дальнейшее моделирование процесса имплантации солнечного ветра в лабораторных условиях потребует подвергнуть плазменному облучению различные породы и минералы, типичные для лунного грунта [16], а также использовать вариации энергий облучения с выходом на энергию более 1 кэВ, типичную для солнечного ветра [9-12].

Кроме облучения пород, представляется целесообразным подвергнуть облучению некоторые техногенные материалы в качестве модельных имитаторов природных пород и минералов. Это позволит получить более полную информацию о влиянии атомной и молекулярной структуры мишеней, сравнить результаты и выяснить более полно закономерности процесса имплантации.

Выяснить количественную сторону влияния чистоты обработки поверхности на имплантацию в этом цикле опытов не удалось из-за недостаточности экспериментальных данных. Проведенные исследования в лабораторных условиях процесса имплантации гелия в вулканическое стекло показали, что можно реализовать достаточно чувствительную методику измерений. Кроме того, для количественной характеристики процесса имплантации целесообразно ввести параметр – плотность потока имплантированного гелия. Предложена методика расчета величины этого параметра.

Литература

1. Eberhardt P., Geiss J., Graf H., Grogler N., Krahenbuhl U., Schwaller H., Schwarzmuller J., Stettler A. Trapped Solar Wind Noble Gases, Kr81/Kr Exposure Ages and K/Ar Ages in Apollo 11 Lunar Material // Science. 1970. V. 167. Issue 3918. P. 558-560.

2. Morris R.V., Gose W.A. Ferromagnetic resonance and magnetic studies of cores 6000960010 and 60003: Compositional and surface-exposure stratigraphy // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. 1976. P. 1-11.

3. Hintenberger H., Weber H. W., Voshage H., Wanke H., Begemann F., Vilscek E., Wlotzka F. Rare Gases, Hydrogen, and Nitrogen: Concentrations and Isotopic Composition in Lunar Material // Science. 1970. V. 167. Issue 3918. P. 543-545.

4. Taylor L.A. Evidence of Helium-3 on the Moon: Model assumptions and abundances // Second Wisconsin Symp. on Helim-3 and Fusion Power. Wisconsin. 1993. P. 49-56.

5. Taylor L. Helium-3 on the Moon: model assumptions and abundances. - Eng. Constr. Oper. in Space IV // ASCE Publ., Proc. of Space'94. 1994. P. 678-686.

6. Галимов Э.М., Ануфриев Г.С. Гелий-3 в лунном грунте по глубине колонки, отобранной автоматической станцией Луна-24 // ДАН. 2007. Т. 412. №3. С. 388-390.

7. *Slyuta E.N., Abdrahimov A.M., Galimov E.M.* The estimation of helium-3 probable reserves in lunar regolith // Lunar and Planet. Sci. Conf. 38th. 2007. Abstr. #2175.

8. Slyuta E.N., Abdrahimov A.M., Galimov E.M. Does helium-3 abundance decrease in dependence on depth at Mare Crisium? // Lunar and Planet. Sci. Conf. 39th. 2008. Abstr. #1054.

9. Коваленко В.А. Солнечный ветер // М.: Наука. 1983. 272 С.

10. Ануфриев Г.С., Болтенков Б.С., Усачева Л.В., Капитонов И.Н. Вариации изотопного состава инертных газов во время солнечных вспышек (по образцам лунного грунта) // Известия АН СССР. Сер. физ. 1983. Т. 47. №.9. С. 1830-1837.

11. Wiens R.C., Bochsler P., Burnet D.S., Wimmer-Schweingruber R.F. Solar- wind isotopic composition // EPSL.2004. V. 222. P. 694-712.

12. Schwenn R. Solar wind sources and their variation over solar cycle // Space Sci. Rev. 2006. V. 124. No 1. P. 51-76.

13. Dubrovsky A.V., Gribkov V.A. Installations based on high efficiency high rep rate miniature DPF chambers for material science // Nukleonika. 2000. 45. 3: P. 159-162.

14. Ануфриев Г.С., Бронштейн А.М., Гудкова И.В., Ефис Ю.Н., Иванов И.А., Клешков Е.М., Кострин М.С., Мамырин Б.А., Рафальсон А.Э., Рутгайзер. Ю.С., Соколов Б.Р., Семенов В.В. Магнитный резонансный масс-спектрометр с системой управления и обработки информации МИ9303. В сб.: Научное приборостроение // Л.: Наука. 1987. С. 101-104.

15. Ануфриев Г.С., Болтенков Б.С., Рябинков А.И. Масс-спектры высокого разрешения остаточного газа в металлической вакуумной системе // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 3. С. 105-114.

16. Роде О.Д., Иванов А.В., Тарасов Л.С., Корина М.И. Общая литолого-морфологическая характеристика колонки реголита «Луны-24» // Геохимия. 1977. № 10. С. 1465-1476.

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h dgggms/1-2009/informbul-1 2009/planet-5.pdf

Опубликовано 1 сентября 2009 г.

© Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009 При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)