

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОМЕТЕОРИТНОЙ БОМБАРДИРОВКИ ПОВЕРХНОСТИ ФОБОСА И НИЗКОАЛЬБЕДНЫХ АСТЕРОИДОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ УГЛИСТОГО ХОНДРИТА МИГЕИ

Шингарёва Т.В., Базилевский А.Т., Фисенко А.В., Семёнова Л.Ф. (ГЕОХИ РАН)

Мороз Л.В. (Институт планетологии (DLR), Германия)

Хирои Т., Питерс К.М. (Университет им. Брауна, геологический ф-т, США)

Коротаева Н.Н. (МГУ, геологический ф-т)

shingareva@geokhi.ru; тел.: (095) 137-49-95

Введение

Преобразование поверхности безатмосферных малых тел Солнечной системы ударами микрометеоритов является одним из основных процессов «космического выветривания», изменяющих вещественный состав и оптические свойства самого верхнего слоя реголита этих тел. Для моделирования процесса ударного плавления и последующего затвердевания продуктов плавления на поверхности Фобоса и низкоальбедных астероидов был использован твердотельный микросекундный лазер, с помощью которого облучалось вещество метеорита СМ2 **Мигеи**. Считается, что углистые хондриты похожи по составу на вещество С- и D-астероидов и, возможно, Фобоса [1]. Таким образом, целью предлагаемой работы было изучение минералогическо-петрографических и оптических изменений, происходящих при бомбардировке углистого вещества микрометеоритами.

Описание эксперимента

Метеорит **Мигеи** относится к углистым хондритам II типа. Матрица метеорита представлена гидратными железо-магнезиальными силикатами (точилинитом и серпентином) [2]. Вторым по распространенности минералом является слагающий хондры оливин. Кроме того, в метеорите обнаружены в незначительном количестве (менее 1%) троилит, никелистое железо и хромит. Метеорит содержит большое количество углерода (2.5%), входящего в состав углистого вещества и обуславливающего черный цвет метеорита [3]. Образец был растерт в порошок <40 μm , его состав представлен в табл. 1. Ударное плавление было смоделировано с помощью облучения образца твердотельным квазинепрерывным лазером ИАГ:Nd³⁺ (1.064 μm , 30–40 кГц, 1.2 кВт) в вакууме (2–3) $\times 10^{-4}$ мм рт. ст. [4]. Диаметр лазерного пучка, сфокусированного на поверхности образца, ~ 100 μm , длительность импульсов составляла 0.5–1 μs . Наличие легколетучих соединений в образце приводило при облучении к «микровзрывам» и, как следствие, к разбрызгиванию вещества. При этом исходный вакуум в момент облучения ухудшался почти на порядок. В результате лазерной обработки частицы порошка плавилась и превращались в шарики стекла диаметром от 20 μm до 100 μm , часть которых слиплась с образованием стекловатых агрегатов размером 125–300 μm . Кроме того, сильно диспергированное изначальное вещество за счет действия электростатических сил слипалось в комочки-агломераты размером до 1–2 мм. В агломератах наблюдаются цепочки сквозных «дырок» и «воронок» диаметром до 100 μm , края которых покрыты таким же расплавом с металл-сульфидными выделениями, как и поверхности шариков измененного вещества.

Спектры

Полученное вещество было рассеяно на несколько размерных фракций (<40; 40–75; 75–125; 125–200 и >200 μm) для спектрального изучения. Наблюдения под бинокулярным микроскопом показали, что фракция >125 μm представляет собой только расплавленный (или измененный) материал. А остальные фракции по мере уменьшения их размерности включают все большее количество неизмененных частиц. Часть вещества фракции >125 μm была растерта в порошок с размером частиц < 40 μm , таким образом, была получена дополнительная фракция измененного вещества. Спектры отражения в интервале 0.3–25 μm измерялись в Университете Брауна на спектрометрах Nicolet 740 и Nexus 870 FTIR. В целом спектр **Мигеи** имеет «красный» наклон в ближней ИК области, зависящий от размера частиц и наличия оливина [5]. В нем практически отсутствуют характеристические полосы поглощения, за счет присутствия тонкодисперсных

затемняющих фаз (таких, как тоцилинит и троилит). Наиболее выражены: полоса поглощения в интервале 2.7-3 μm , связанная с присутствием групп OH в гидросиликатах матрицы, и полосы, связанные с наличием Fe^{3+} переходов в УФ области и около 0.75 μm . В спектре измененного образца интенсивность всех этих полос заметно уменьшилась за счет дегидратации (рис. 1). В спектре фракции < 40 μm появилась слабая широкая полоса около 1 μm за счет Fe^{2+} переходов в оливине и обогащенном железом стекле. Хотя в измененном образце преобладает Mg-оливин (Fo_{74}), связанные с его наличием полосы поглощения, по-видимому, подавлены. Это объясняется присутствием большого количества тонкодисперсных субмикронных железистых включений в стекловатом мезостазисе (см. ниже), а также возможной карбонизацией органического вещества.

Минералогия и петрография

Полированные аншлифы измененного образца изучались при помощи РЭМ CamScan 4 DV и прибора Link AN-10000 на Геологическом факультете МГУ. Лазерное облучение не привело к полному плавлению исходного вещества. Некоторые шарики расплава содержат непереплавленные угловатые зерна оливина, причем двух составов Fo_{99} и Fo_{82} . По-видимому, разный состав объясняется тем, что в изначальном образце был оливин разного происхождения: чистый форстерит (Fo_{99}) содержался в хондрах, а более железистый (Fo_{82}) был представлен отдельными зернами в матрице. Непереплавленные кристаллы оливина имеют размеры от 6 до 35 μm в длину. На наиболее крупных из них видно, что они окаймлены узкими (~1-2 μm) оплавленными оболочками более железистого состава (Fo_{68}). Кристаллизация расплава привела к образованию двух типов структур: интерсертальной, местами балочной, и микропорфировой. Шарики расплава с балочной структурой содержат игольчатые и скелетные кристаллы зонального Mg-оливина Fo_{74} с узкими (~0.5 μm) внешними более железистыми зонами. Размеры игольчатых кристаллов колеблются от 8 до 150 μm в длину и от 2 до 13 μm в ширину. Они сцементированы мезостазисом заметно более железистого состава (FeO 34%). По сравнению с исходным веществом, валовой состав расплава (оливин + мезостазис) обеднен железом, никелем и серой и пропорционально обогащен всеми остальными компонентами (Табл. 1). Недосток железа, по-видимому, объясняется как выделением металл-троилитовых включений (которые не входили в анализируемые участки), так и частичным испарением. В мезостазисе при большом увеличении наблюдаются очень мелкие субмикронные (0.1- 0.5 μm) округлые точечные включения, которые, судя по изображениям в отраженных электронах, обогащены железом. Капли расплава также содержат большое количество газовых пузырьков размером от ~0.1 до 70 μm в диаметре, а также металл-сульфидные включения размером до 60 μm . Во многих крупных металлических выделениях также заключены газовые пузырьки, иногда образующие сплошные полости на границе расплав/металл.

Усредненные химические анализы Табл. 1.

	Неизм. обр.		Мигей после облучения		
	Матр.	Вал. состав	Вал. расплав	Оливин	Мезостазис
SiO_2	32.54	33.96	38.72	38.38	40.83
TiO_2	-	0.14	0.15	0.06	0.36
Al_2O_3	2.55	2.53	3.38	1.47	7.51
FeO	32.21	28.01	25.91	22.15	33.75
MnO	0.33	0.4	0.33	0.31	0.36
MgO	21.44	21.07	26.59	35.53	7.12
CaO	1.73	1.55	2.41	1.31	6.02
Na_2O	0.56	1.24	0.64	0.26	0.51
K_2O	-	0.27	-	-	-
Cr_2O_3	0.58	0.65	0.62	0.56	0.80
P_2O_5	0.29	0.39	-	0.07	-
SO_3	5.81	7.68	0.43	0.08	1.23
CoO	н.о.	0.33	0.18	-	0.33
NiO	1.87	1.79	-	-	-
Σ	99.42	100.01	99.38	100.18	98.81

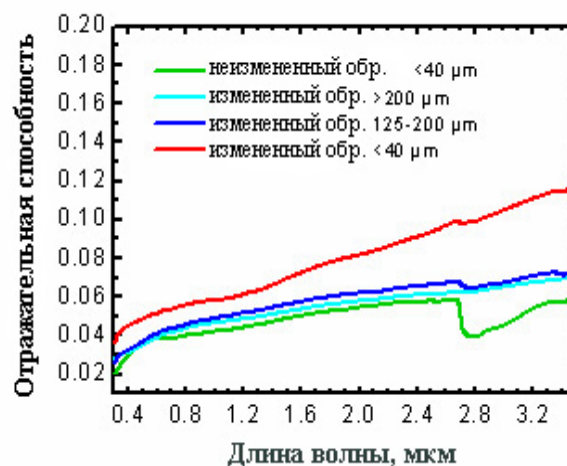


Рис. 1. Спектры отражения изначального образца Мигей и 3-х фракций измененного вещества.

Обсуждение

В наших экспериментах лазерные импульсы по энергии эквивалентны ударам частиц диаметром 10 мкм и плотностью 2-3 г/см³ со скоростями 14-17 км/с. Т.е. мы моделировали часть процесса «космического выветривания», дополняя эксперименты других авторов, использовавших наносекундные импульсы [6-8]. Лазерное облучение **Мигеи** завершает серию наших экспериментов, включавшую также обыкновенный хондрит L5 Царев и искусственную смесь, моделирующую углистый хондрит (СМ*) [9]. В результате всех экспериментов произошло локальное плавление вещества с образованием капель расплава и их последующей частичной кристаллизацией при закалке. При этом образовывались зональные кристаллы Mg-оливина, сцементированные обогащенным железом расплавом, содержащим большое количество субмикронных железистых включений. Состав полученного оливина в целом зависит от соотношения Mg/Fe в исходных образцах. Летучие компоненты, такие как H₂O в гидросиликатах и CO₂ в карбонатах, очевидно, испарились при плавлении. Поэтому в результате облучения произошло практически полное исчезновение 3 мкм абсорбционной полосы и заметное сглаживание спектральной кривой. Предварительное сравнение спектров измененного образца **Мигеи** со спектрами низкоальбедных астероидов показывает, что они «краснее» С-астероидов и близки спектрам Р-, D-, и Т-астероидов, у большинства которых также отсутствует 3 мкм абсорбционная полоса. Предварительное сравнение со спектрами Фобоса показало, что спектр измененного вещества **Мигеи** имеет наклон промежуточный между наклонами спектров двумя оптически разных материалов, обнаруженных на этом спутнике [10].

Выводы

Результаты наших экспериментов и работы других исследователей (см. например, [6-8]) показывают, что химический и минералогический состав зрелого реголита на S-астероидах (родительские тела обыкновенных хондритов), на С- и D-астероидах (родительские тела углистых хондритов), а также на Фобосе (возможное родительское тело углистый хондрит Kaidun [11]), должны значительно отличаться от таковых неизмененного вещества этих тел, а это должно фиксироваться в спектрах отражения этих тел. В частности, причиной спектрально наблюдаемой дегидратации поверхности С- и D-астероидов, а также спутников Марса, очевидно, является микрометеоритная бомбардировка, приводящая к образованию на этих телах зрелого дегидратированного реголита.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований грант № 02-05-65156

Литература

1. Pang K.D. et al. 1978. Science. 199. N 4324. PP. 64–66.
2. Zolensky M., McSween H. 1988. In: Meteorites and the early Solar System // Univ. of Arizona Press, Tucson. PP. 114-143.
3. Вдовыкин Г.П. 1964. Метеоритика. Вып. 25. PP. 134-155.
4. Moroz L.V. et al. 1996. Icarus, 122. PP. 366-382.
5. Moroz L.V., Pieters C.M. 1991. LPSC XXII. P. 923.
6. Yamada M. et al. 1999. Earth Planets Space. 51. PP. 1255-1265.
7. Sasaki S. et al. 2001. Nature. 410. PP. 555-557.
8. Hiroi T., Sasaki S. 2002. Meteor. Planet. Sci. 36. PP. 1587-1596.
9. Shingareva T.V. et al. 2003. LPSC XXXIV. #1321.
10. Murchie S., Erard S. 1996. Icarus. 123. 63.
11. Иванов А.В. 2004. Астро. Вест. 38. PP. 113-125.

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-7.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