

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Н.А. Кругликов^{1,2*}, В.И. Гроховский¹, М. Грицевич^{1,3,4}, Т. Когоут^{3,5,6}

¹Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

³Финская болидная сеть, г. Хельсинки, Финляндия

⁴Финский геодезический институт, г. Масала, Финляндия

⁵Университет Хельсинки, г. Финляндия

⁶Институт геологии, Академия наук Чешской республики

*nick@imp.uran.ru

Фундаментальными являются как вопрос классификации астероидов, так и вопрос о соответствии метеоритов разных классов тем или иным родительским телам Солнечной системы. Вопрос определения состава, размеров и орбитальных элементов астероидов и метеороидов, сближающихся с Землей, имеет прямое отношение к прикладным проблемам астероидно-кометной опасности и освоения природных ресурсов безатмосферных тел Солнечной системы.

Известно, что оптические характеристики наиболее многочисленных астероидов S-типа не совпадают с теми же характеристиками наиболее часто падающих на Землю хондритов. Считается, что наиболее вероятными источниками этих объектов являются астероиды, сближающиеся с Землей и имеющие малые перигелийные расстояниями. Такие тела при максимальном сближении с Солнцем испытывают значительное влияние таких факторов, как солнечный ветер, космические лучи и бомбардировка метеоритами. В результате процессов облучения, напыления, кратерообразования и имплантации структура, оптические свойства, химический состав и минералогия поверхности этих тел постепенно меняется, что приводит к изменению их спектров отражения, а альbedo исследуемого тела оказывается довольно низким. В целом эти процессы принято называть космическим выветриванием [1–4]. Кроме того, при сближении с другими телами Солнечной системы возможны явления увеличивающие альbedo и приближающие спектр отражения астероидов к исходному состоянию [5].

Определение массы опасного тела задолго до его сближения с Землей связано с правильной интерпретацией спектров отражения, что не всегда возможно даже при условии правильного определения орбитальных элементов. Заниженная оценка альbedo (например, для темных астероидов) даст заниженную оценку массы. В результате, последствия входа

такого объекта в атмосферу Земли будут гораздо драматичнее, чем предполагалось [6]. Таким образом, одной из ключевых задач изучения и классификации астероидов является сравнение результатов, полученных при исследовании метеоритов, с наблюдениями спектров отражения астероидов различных типов, лунной поверхности и поверхности Меркурия [1, 4]. Не менее актуально изучение явлений, происходящих на поверхности образцов различных земных минералов при воздействиях, аналогичных воздействию космической среды [7].

Впервые о космическом выветривании стало известно после исследования лунного реголита, доставленного на Землю лунными экспедициями Луна и Аполлон в шестидесятые и семидесятые годы прошлого столетия [8]. Данные, которые удалось собрать по этому вопросу, в основном, получены именно на этих образцах [1, 9–13]. Кроме того, недавно были получены образцы с астероида Итокава со следами космического выветривания [14]. По утверждению авторов статьи [15], проводивших подробнейшее электронно-микроскопическое исследование образцов пыли с поверхности астероида Итокава, основной вклад в космическое выветривание его поверхности вносит солнечный ветер за счет облучения и имплантации ионов He в поверхность. Исследования Луны показали, что космическое выветривание уменьшает альbedo лунного реголита, сдвигает наклон его спектра отражения в сторону длинных волн (покраснение) и уменьшает интенсивность характеристических абсорбционных линий его спектра отражения [1–4].

Изменения спектральных характеристик часто связывают с образованием наночастиц железа (npFe⁰) по краям зерен лунного реголита и агглютанатов [10, 11, 13]. К примеру, в статье [16] описываются эксперименты по получению наночастиц железа в порошках силикатных минералов посредством двухступенчатой термообработки в земной атмосфере и в атмосфере

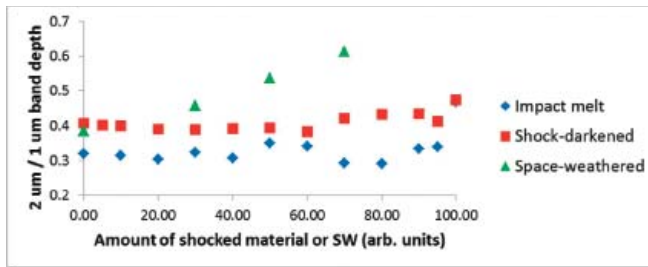


Рис. 1. Соотношение интенсивности пиков, соответствующих длинам волн 2 микрона и 1 микрон для различных литологий метеорита Челябинск [21]

водорода. Авторам удалось получить зависимость между размером и количеством наночастиц железа на поверхности образцов и характеристиками спектра отражения порошка оливина после термообработки. Эксперименты также ставятся и на веществах с низким содержанием железа. Исследования [17] наглядно демонстрируют разницу между спектрами отражения образцов с различным содержанием железа, облученных лазером. В случае изменения спектра бедных железом образцов плагиоклаза авторы ассоциируют изменения спектров с изменением текстуры образцов, а не с появлением наночастиц железа на поверхности образцов.

Наше исследование направлено на получение количественных оценок явлений, происходящих в поверхностном слое объектов Солнечной системы, лишенных атмосферы. За объемное почернение метеоритного вещества, обнаруженное авторами во фрагментах метеорита Челябинск, могут быть ответственны динамические и ударные эффекты [18, 19]. На рисунках 1 и 2 показаны различия между вариантами потемнения, вызванными разными причинами. Хорошо видно, что спектральные характеристики вещества хондритов, подвергнутого космическому выветриванию, значительно отличаются от того же вещества после импактного события.

Количественная оценка вклада событий обоих типов может быть дана на основании соотношения интенсивности пиков, соответствующих длинам волн 1 и 2 микрона спектра отражения вещества хондритов (рис. 1). На рис.2, построенном методом главных компонент по экспериментальным данным [20], демонстрируется переход спектральных характеристик вещества хондритов от характеристик, соответствующих Q-типу к другим типам в зависимости от приложенного воздействия [21]. Метод главных компонент обычно используется для упрощения визуализации данных при помощи выделения наиболее значимых признаков и построения соответствующих диаграмм [20]. Диаграмма на рис.2 была построена в базисе главных компонент $PC1'$ и $PC2'$,

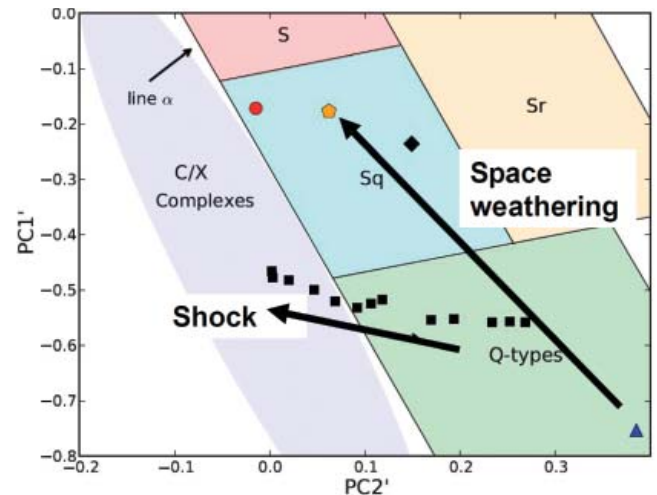


Рис. 2. Направления изменений спектральных характеристик вещества хондритов, подвергнутого ударному и радиационному воздействию (в пространстве метода главных компонент) [21]

связанных с интенсивностью отражения длин волн 1 и 2 мкм, опираясь на работу [22], посвященную классификации астероидов. Фоновое изображение рис. 2 фактически служит для современной классификации астероидов и также построено при помощи метода главных компонент авторами [22]. Таким образом, данные для построения рис.2 получены как при помощи спектрофотометрических наблюдений за астероидами разных типов [22], так и при помощи измерения спектральных характеристик различных литологий метеорита Челябинск [19].

Из рис. 2 видно, что космическое выветривание, обусловленное радиационным повреждением, может обеспечивать переход спектральных характеристик объекта от Q-типа к S-типу, а в случае ударного воздействия к C-типу. Авторы выражают признательность членами коллектива Spectra Measurement Consortium: A.Penttila, D.Britt, V.Reddy, P.Mann, J.Haloda, P.Halodova, J.Cuda, J.Filip, K. Muinonen, R. Zboril за помощь.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Деформация», № 01201463327) и при частичной поддержке гранта РФФИ № 15-35-21164 мол_a_вед.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hapke, B. Space weathering from Mercury to the asteroid belt // *J. Geophys. Res.* 2001. 106. P. 10039–10073.
2. Clark B.E., Hapke B., Pieters C., and Britt D. Asteroid space weathering and regolith evolution // In *Asteroid III*, ed. By Bottke W., Cellino A., Paolicchi P. And Binzel R.P. Tucson, Arizona: University of Arizona Press. 2002. P. 585–599.

3. Chapman C.R. Space weathering of asteroid surfaces // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2004. 32. P. 539–567.
4. Кринов Е.И. Основы метеоритики. М, 1955. 392 с.
5. D. Nesvorný, W.F. Bottke, D. Vokrouhlický, C.R. Chapman, S. Rafkin. Do planetary encounters reset surfaces of near Earth asteroids? *Icarus* // 2010. 209. P. 510–519.
6. Грицевич М.И., Стулов В.П., Турчак Л.И. Последствия столкновений природных космических тел с атмосферой и поверхностью Земли // *Космические исследования*. 2012. 50, № 1. С. 59–67.
7. Бусарев В.В. Изучение природы астероидов методами спектродетекции. Автореферат на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М, 2012. 24с.
8. Виноградов А.П., Барсуков В.П., Урусов В.С., Иванов А.В. Свойство неокисленности ультрадисперсных форм простых веществ (в частности железа, титана, кремния), находящихся на поверхности космических тел. *Открытие* №219, 15.04.1980.
9. Napke B., Cassidy W., Wells E. Effects of vapor phase deposition processes on the optical, chemical, and magnetic properties of lunar regolith // *The Moon*. 1975. 13. P. 339–353.
10. Keller L.P., McKay G. The nature and origin of rims on lunar regolith grains // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. 61. P. 2331–2341.
11. Pieters C.M., Taylor L.A., Noble S.K., Keller L.P., Napke B., Morris R.V., Allen C.C., McKay D.S., Wentworth S. Space weathering on airless bodies: Resolving a mystery with lunar samples // *Meteoritics & Planetary Science*. 2000. 35. P. 1101–1107.
12. Taylor L.A., Pieters C.M., Keller L.P., Morris R.V., McKay D.S. Lunar Mare soils: Space weathering and the major effects of surface-correlated nanophase Fe // *Journal of Geophysical Research E*. 2001. 106. P. 27985–27999.
13. Noble S.K., Pieters C.M., Keller L.P. Evidence of space weathering in regolith breccias // *Meteoritics & Planetary Science*. 2005. 40. P. 397–408.
14. Noguchi T., Nakamura T., Kimura M., Zolensky M.E., et. al. Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles // *Science*. 2011. 333. P. 1121–1125.
15. Noguchi T., Kimura M., Hashimoto T., Konno M., Nakamura T., et. al. Space weathered rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles // *Meteoritics & Planetary Science*. 2014. 49. P. 188–214.
16. Kohout T., Cuda J., Filip J., Britt D., Bradley T., et.al. Space weathering simulations through controlled growth of iron nanoparticles on olivine // *Icarus*. 2014. 237. P. 75–83.
17. Moroz L.V., Starukhina L.V., Rout S.S., Sasaki S. et.al. *Icarus*. 2014. 235. P. 187–206,
18. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Yu., Dudorov A., Grokhovsky V.I., et al. (the Chelyabinsk Airburst Consortium). Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*. 2013. 342. P. 1069–1073.
19. Kohout T., Gritsevich M., Grokhovsky V.I., Yakovlev G.A., Haloda J., Halodova P., Michallik R.M., Penttilä A., Muinonen K. Mineralogy, reflectance spectra, and physical properties of the chelyabinsk 115 chondrite – insight into shock-induced changes in asteroid regoliths // *Icarus*. 2014. 228. P. 78–85.
20. Зиновьев А. Ю. Визуализация многомерных данных. Красноярск: КГТУ, 2000.
21. T. Kohout, A. Penttilä, M. Gritsevich, D. Britt, V. Reddy, P. Mann, J. Čuda, J. Filip, O. Malina, V. I. Grokhovsky, G. A. Yakovlev, J. Haloda, P. Halodova, K. Muinonen, R. Zbořil. Can we distinguish between shock-darkened and space-weathered asteroids? // 46th Lunar and Planetary Science Conference, 2015. LPI Contribution No. 1832, p. 2072.
22. F.E. DeMeo, R.P. Binzel, S.M. Slivan, S.J. Bus. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared // *Icarus*. 2009. 202. P. 160–180.