

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОНДРИТОВ ПОСЛЕ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**Кругликов Н.А.^{1,2,3}, Муфтахетдинова Р.Ф.¹, Гроховский В.И.¹, Крушинский В.В.¹**¹*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, gizrozka91@bk.ru*²*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, nick@imp.uran.ru*³*Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург*

Наблюдения цветовых характеристик астероидов были начаты в первой половине XX века. В работе [Bobrovnikoff, 1929] были проанализированы спектры 12-ти астероидов в интервале длин волн 0.39-0.47 мкм и, кроме того, по изменению цвета Весты был определен период ее вращения. Систематические исследования в этой области начались лишь в 50-х годах с появлением фотометров-умножителей. На тот момент было выделено две группы астероидов [Wood, 1963]. Первая классификация астероидов, основанная на использовании узкополосной спектроскопии, была предложена после внимательного изучения спектров отражения значительного количества астероидов в видимом диапазоне спектра [Chapman, 1975]. Это позволило не только создать обзор спектров 277 астероидов, но и сравнивать результаты дистанционных наблюдений с данными, полученными на минералах [Chapman, 1979]. Пика своего развития данная деятельность достигла во время 8-ми цветного обзора, который позволил с использованием восьми узкополосных фильтров, полосы пропускания которых покрывали основные детали спектров астероидов, получить обзор шестисот астероидов. Этот обзор лег в основу классификации Толена [Tholen, 1984] (рис. 1). Такой подход позволяет классифицировать астероиды, имеющие достаточный для спектrophотометрических наблюдений блеск, в течение ближайших двух-трех десятков лет [Бусарев, 2007]. Дальнейшее развитие эта деятельность получила благодаря изобретению ПЗС-матриц, которые позволяли снимать сразу весь спектр и учитывать прозрачность атмосферы, что дало возможность избавиться от необходимости вести съемку только при хороших погодных условиях и устранить погрешность, вызванную вращением астероидов.

Современная классификация астероидов Баса-ДеМео [DeMeo, 2009] основана на анализе формы спектров отражения астероидов (рис. 1), получаемых методами наземной астрономии в видимом и ближнем ИК диапазоне. Фактически таксономия определяет границы кластеров в пространстве признаков классификации. Такая таксономия была рассчитана на ис-

пользование орбитальных телескопов, но количество наблюдательного времени на таких телескопах крайне ограничено. Поэтому, чаще всего, для наблюдений с использованием наземных телескопов используется усовершенствованная таксономия Баса-Бинзеля для видимого диапазона, основанная на использовании ПЗС-матриц.

По мере накопления наблюдательного материала классификация астероидов постоянно усложняется, поскольку форма спектров весьма разнообразна. Можно было бы предложить классификацию не по форме спектра, а по составу и степени метаморфизма. То есть классификация могла бы строиться на более общих принципах. Такой подход открывает возможность упрощения таксономии. Но для этого необходим существенный объем лабораторных исследований, проводимых на Земле. Именно это мы пытаемся реализовать на веществе обыкновенных хондритов, обладающих неплохой отражательной способностью в неметаморфизированном состоянии. Их спектры отражения можно ассоциировать с астероидами S-типа. На настоящем этапе мы пытаемся использовать спектроскопию в видимой области, поскольку объектов, для которых проведены дистанционные наблюдения в этой области, существенно больше. Кроме того, представляет интерес сравнение спектров отражения хондритов со спектрами отражения астероидов R-типа, поскольку именно этот тип принято связывать с метаморфизированным веществом, по составу близким к хондритам.

Материал и методика эксперимента

Для получения данных о спектральных характеристиках вещества метеоритов после космического выветривания были использованы три спектрометра Perkin Elmer Lambda 35, Perkin Elmer LS-55 и ИК фурье-спектрометр SIMEX FT801 с инфракрасным микроскопом Micran-2. Снимали спектры отражения в ИК области и в видимом диапазоне. Кроме того, были получены спектры фотолюминесценции при возбуждении длиной волны 250 нм на светлой литологии метеорита Челябинск для того, чтобы

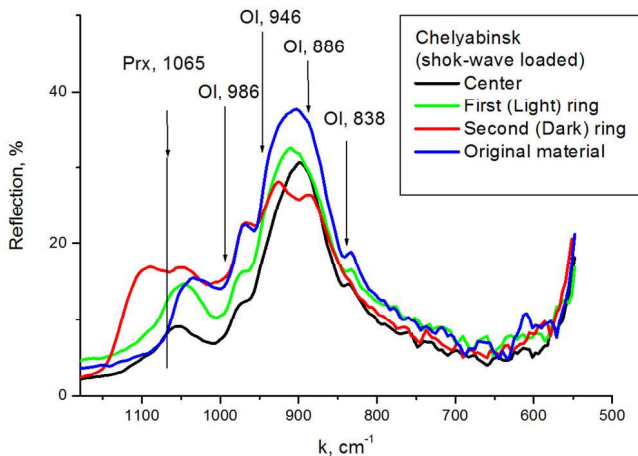


Рис. 1. Спектры отражения различных структурных составляющих метеорита Челябинск в инфракрасном диапазоне, полученные при помощи фурье-спектрометра SIMEX FT801c инфракрасным микроскопом Micran-2 [Kruglikov, 2018]

учесть эффекты поглощения на этой длине волны (и излучения в видимом диапазоне) во время измерений.

Поверхность массивных образцов вземного вещества подвергалась механической шлифовке и тщательной полировке по стандартной методике подготовки шлифов для горных пород. Образцы метеорита Сеймчан использовались для независимого получения данных о спектральных характеристиках как силикатной (оливин), так и металлической (железоникелевый сплав) фаз, поскольку размер зерна этого метеорита позволяет различить сигналы от обеих фаз даже без использования специализированного микроскопа.

Фрагменты метеорита Челябинск были выбраны таким образом, чтобы присутствовали как различные литологии (светлая, темная), так и различные структурные элементы (хондры, кора плавления). Как предполагалось ранее, темная литология образовалась в результате импактного события, в то время как, кора плавления была образована в результате плавления вещества метеорита при вхождении в атмосферу Земли.

На предыдущем этапе нашего исследования мы внимательно изучили спектральные особенности различных литологий обыкновенных хондритов методами инфракрасной спектроскопии. На настоящем этапе было принято решение провести исследование и на литологиях, метаморфизированных после экспериментов по моделированию космического выветривания. Таким образом, удалось получить данные для определения влияния интенсивности нагружения на изменение формы спектров отражения.

Для того, чтобы получить результаты, которые можно сравнивать с результатами наземных

телескопических наблюдений безатмосферных тел Солнечной системы, мы решили расширить спектральный диапазон наших исследований и на видимую область. Измерения на спектрометре Lambda 35 проводились при размере пучка 5x2мм, что позволяло выбирать крупные элементы структуры и однозначно определять литологию, с которой производилась съемка. Спектры снимались с нескольких точек для того, чтобы однозначно определить действительную форму спектра и исключить влияние преимущественных ориентировок кристаллитов. Отличия были не существенные, и при нормировке спектра это было хорошо заметно. В качестве объекта сравнения использовался эталон белого цвета USRS-99-010 (S-99).

Наземные телескопические наблюдения астероида R-типа Dembowska проводились в декабре 2017 года в Коуровской астрономической обсерватории на 1.2-метровом телескопе с возможностью подключения спектрографа. Погодные условия и загрузка прибора позволили провести однократное наблюдение.

Выводы:

- 1) отработана методика измерения спектров отражения для метеоритов различного типа в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой частях спектра;
- 2) проведено измерение спектров отражения на образцах метеоритов Сеймчан, Челябинск и Царев в видимой и ИК области;
- 3) получены данные о сдвиге линий спектра отражения в ИК области в результате различных воздействий на вземное вещество на образцах нескольких метеоритов;
- 4) в видимой области наблюдается существенная корреляция между формой спектра, его наклоном в различных интервалах и интенсивностью воздействия;
- 5) форма спектров отражения вещества обыкновенных хондритов в видимой области может соответствовать разным типам астероидов;
- 6) существенное влияние на форму спектра может оказывать фотолюминесценция при возбуждении в УФ области, что необходимо учитывать.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00598, а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проекты 5.4825.2017/6.7, 5.3451.2017/4.6), и в рамках государственного задания (тема «Давление», № АААА-А18-118020190104-3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Бочков В.В. Спектральный и спектрально-частотный методы исследования безатмосферных тел Солнечной системы. *Успехи физических наук*. 2007. Т. 177. № 6. С. 663-675.
2. Bobrovnikoff N.T. The spectra of minor planets. *Lick Obs.Bull.*, 1929, 14, 18–27.
3. Chapman C.R. and Gaffey M.J. Reflectance spectra for 277 asteroids. In *Asteroids* (T. Gehrels, ed.), Univ. of Arizona, Tucson. 1979, P. 655–687.
4. Chapman C.R., Morrison D. and Zellner B. Surface properties of asteroids: A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry. *Icarus*, 1975, 25, 104-130.
5. DeMeo F.E., Binzel R.P., Slivan S.M., Bus S.J. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared, *Icarus* 2009, 202, 160–180.
6. Kruglikov N.A., Grokhovsky V.I. Mid-infrared microspectroscopy on shock-wave loaded Chelyabinsk LL5 olivine // *Meteoritics & Planetary Science*. 2018. V. S53. p. 6356.
7. Tholen D.J. Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry. Ph.D. thesis, 1984, University of Arizona, Tucson.
8. Wood J.H. and Kuiper G.P. Photometric studies of asteroids. *Astrophys. J.*, 1963, 137, 1279–1285.