

УДК 523+520.84:520.849+52-123

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТЕРОИДОВ 21 ЛЮТЕЦИЯ И 4 ВЕСТА КАК ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

© 2010 г. В. В. Бусарев

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва

Поступила в редакцию 21.12.2009 г.

Астероид 21 Лютеция является одним из объектов европейской космической миссии Rosetta (ESA). Запущенный в 2004 г. КА с идентичным названием должен сблизиться с Лютецией в июле 2010 г., а затем направиться к комете Чурюмова–Герасименко. Астероид 4 Весту предполагается исследовать в 2011 г. с помощью американского КА Dawn (NASA), который стартовал в 2007 г. (его второй объект исследования – это крупнейший астероид 1 Церера). Лютеция и Веста имеют неоднозначные и даже противоречивые наблюдаемые характеристики. Несмотря на интенсивные и разносторонние наземные исследования, происхождение и эволюция этих малых планет остаются неясными или не вполне ясными. Ранее установленные по спектрам типы Лютеции (М) и Весты (V) соответствуют высокотемпературной минералогии, что согласуется со значениями их IRAS-альbedo. Однако, по мнению некоторых специалистов, Лютеция имеет спектральный тип С и, значит, низкотемпературную минералогию. А на поверхности Весты обнаружены локальные гидросиликатные образования. Наши наблюдения также свидетельствуют, что при некоторых значениях относительной фазы вращения спектры отражения Лютеции и Весты имеют особенности, подтверждающие наличие в поверхностном веществе гидросиликатов. Но это возможно согласовать с магматической природой Лютеции и Весты в случае доставки на них гидратированного вещества при падениях примитивных тел. Такие небольшие тела, вероятно, присутствуют во всем Главном поясе астероидов и могут быть реликтами силикатно-ледяных планетезималей из зоны формирования Юпитера или фрагментами астероидов примитивных типов. При интерпретации спектров отражения Лютеции и Весты обсуждается общее значение спектральной классификации Tholen (1984) для оценки минералогического типа астероидов, а также для изучения их происхождения и эволюции.

PACS: 96.30.Ys; 95.75.Fg; 78.40.-q;

ВВЕДЕНИЕ

Наличие спектральных (или многоцветных) данных для значительного количества астероидов Главного пояса (ГПА) позволяет проводить их спектральную классификацию, то есть выделять типы или классы малых планет с похожими спектральными свойствами. И так как спектральные характеристики астероидов (под которыми понимают их спектры диффузного отражения, полученные при соответствующих условиях) непосредственно связаны с химико-минералогическими параметрами их поверхностного вещества, то спектральный тип каждого из них указывает на преобладающую минералогию. А последняя, как известно (см., например, Коржинский, 1957; Deeg и др., 1963), характеризует физико-химические условия формирования вещества этих тел. Для определения минералогических типов астероидов в настоящее время широко используется таксономическая, точнее, спектральная классификация Tholen, насчитывающая 14 астероидных типов (Tholen, 1984; 1989). Популярность этой классификации объясняется тем, что она была выполнена на основе статистического (кластерного) подхо-

да с применением корреляционного метода анализа данных (метод главных компонент или переменных) и имеет простой физический смысл. Она была проведена по результатам восьмичетного фотометрического обзора 589 астероидов (ECAS) (Zellner и др., 1985) в полосах, равномерно распределенных в диапазоне 0.3–1.1 мкм. Эти данные позволили аппроксимировать спектры отражения астероидов в диапазоне, на границах которого находятся две наиболее сильные полосы поглощения силикатов: электронная полоса переноса заряда кислород–металл (с минимумом вблизи 0.2 мкм) и пироксен–оливиновая (с минимумом у 1.0 мкм). Как показали теоретические и экспериментальные исследования, более интенсивная ультрафиолетовая полоса поглощения в спектре диффузного отражения раздробленного силикатного вещества в основном зависит от степени его окисления, а ее длинноволновое крыло (его форма и протяженность) определяет наклон и форму спектра отражения во всем видимом диапазоне (Loeffler и др., 1974; Burns, 1993). Полоса поглощения у 1.0 мкм является суперпозицией полос поглощения, порождаемых разрешенными

по спине электронными переходами в ионах Fe^{2+} в кристаллических полях ортопироксена (полоса с центром у 0.90 мкм), клинопироксена (у 1.0 мкм) и оливина (у 1.01 мкм), и характеризует общее содержание в веществе этих породообразующих минералов (Adams, 1975). В классификации фотометрические полосы вблизи 0.2 и 1.0 мкм соответствуют двум главным компонентам, которые контролируют 95% различий между выделенными типами астероидов. Из этого следует, что в рассматриваемой классификации почти все типы установлены по форме спектров отражения астероидов и, фактически, она является спектральной. Альbedo здесь было использовано только в отдельных случаях как вспомогательный параметр, когда, например, имелась необходимость разделить астероидные типы с очень близкими спектральными характеристиками (M, E и P) (Tholen, 1989). Благодаря указанным особенностям классификации выделенные в ней спектральные типы астероидов удалось связать с разными минералогическими разновидностями твердого вещества (Gaffey и др., 1989). В качестве практического применения классификации можно рассматривать работу Bell и др. (1989), которые для описания последовательных этапов эволюции астероидов и изменения состава их вещества ввели суперклассы, состоящие из нескольких классов. Это суперклассы примитивных (включающих классы D, P, C, K, O), метаморфических (T, V + G + F) и магматических астероидов (V, R, S, A, M, E). В эволюционном плане важны распределения по гелиоцентрическим расстояниям как спектральных классов, так и суперклассов астероидов (Gradie, Tedesco, 1982), которые демонстрируют постепенный переход от магматических к метаморфическим, а затем — к примитивным астероидам с удалением от Солнца. Одной интересной особенностью этих зависимостей, к которой мы вернемся в конце данной статьи, является “всеохватывающий” характер распределения астероидов C-типа.

Для сравнения упомянем также одну из последних таксономических классификаций астероидов (Bus, Binzel, 2002b), основанную на спектрах отражения 1447 астероидов (Bus, Binzel, 2002a) и включающую уже 26 типов. Преимуществом новой классификации можно считать дальнейшее развитие “спектрального” подхода. В ней сохранено 11 из 14 типов, а дополнительные классы и подклассы введены для более детальной характеристики спектров отражения и, соответственно, минералогии астероидов. Однако ее недостатком можно считать объединение магматических типов M и E с примитивным типом P (на основании сходства их спектров отражения) в один общий класс X, что создает проблемы при интерпретации эволюционной взаимосвязи разных спектральных типов астероидов.

Таким образом, рассматриваемые здесь астероиды 21 Лютеция и 4 Веста с учетом их спектральных типов (M и V, соответственно) (Tholen, 1989) должны иметь преимущественно магматическую минералогию. Это подтверждается высокими значениями их IRAS-альbedo (Tedesco и др., 2004).

Астероид Лютеция, имеющий IRAS-диаметр (диаметр, определенный по наблюдениям с ИСЗ Infrared Astronomical Satellite (IRAS)), равный 95.76 км (Tedesco и др., 2004), — один из объектов изучения с помощью КА Rosetta (ESA), который должен сблизиться с ним уже в июле 2010 г. Этим объясняется повышенный интерес к Лютеции в последние годы и значительное количество ее исследований. Однако из-за неоднозначных наблюдаемых характеристик астероида ответы на многие вопросы пока не получены. Кривая блеска Лютеции имеет весьма неправильную форму (Dotto и др., 1992; Michalowski, 1996) при известном периоде вращения $8.^h172$ (Батраков и др., 2000). Пока непонятно, как интерпретировать сложную кривую блеска астероида: крайне неправильной формой тела, альбедными неоднородностями или даже двойственностью или кратностью системы (см., например, Прокофьева и др., 2006; Прокофьева-Михайловская и др., 2007)? Еще один из открытых вопросов — это несоответствие высокотемпературного типа Лютеции спектральным признакам наличия на ее поверхности водно-связанных соединений по спектральным данным вблизи полосы поглощения у 3.0 мкм (Rivkin и др., 2000). Кроме того, в спектрах отражения Лютеции были обнаружены полоса поглощения гидросиликатов у 0.44 мкм (Busarev и др., 2004b; Lazzarin и др., 2004) и необычные вариации спектрального континуума (Nedelcu и др., 2007; Busarev, 2008). По причине сложных свойств этого астероида высказано мнение, что он был ошибочно отнесен к M-типу и, на самом деле, является примитивным объектом C-типа (см., например, Barucci и др., 2008). Однако такое предположение не согласуется с достаточно высоким значением IRAS-альbedo Лютеции — 0.22 (Tedesco и др., 2004).

Астероид 4 Веста является объектом космических исследований, запланированных с борта КА Dawn (NASA). Ожидается, что в 2011 г. этот КА передаст на Землю снимки поверхности астероида с высоким разрешением и другие параметры, которые позволят установить детальную структуру его поверхности, определить химико-минералогический состав, плотность и уточнить имеющиеся геохимические модели. Ранее измеренные значения альbedo и диаметра Весты по IRAS-данным — это соответственно 0.42 и 468.30 км (Tedesco и др., 2004). Период вращения астероида составляет $5.^h334$ (Батраков и др., 2000). Магматиче-

ское происхождение Весты подтверждается такими основными результатами, как обнаружение застывших потоков базальтовой лавы с ИСЗ Hubble Space Telescope (HST) (например, Thomas и др., 1997; Parker и др., 2002) и обнаружение группы астероидов-вестоидов и их вероятных фрагментов — базальтовых HED-метеоритов (ахондритов) (Binzel, Xu, 1993). Однако по спектральным данным в области 3 мкм на Весте были обнаружены гидросиликатные образования на долготях 155° – 195° (Hasegawa и др., 2003). Авторы этой публикации сделали вывод о том, что на поверхность астероида гидросиликаты были доставлены в результате столкновения с примитивным телом углисто-хондритового состава. Самый большой ударный кратер вблизи южного полюса Весты как раз и может быть последствием косоугольного удара, рассеявшего по поверхности астероида вещество такого тела (Hasegawa и др., 2003). Позднее, при более детальных ИК-исследованиях, было подтверждено, что в спектрах отражения Весты, соответствующих ряду ее долгот и широт, имеются признаки слабой полосы поглощения вблизи 3.0 мкм (с относительной интенсивностью $\sim 1\%$) (Rivkin и др., 2006). Это значит, что поверхность Весты во многих местах покрыта пятнами гидратированного вещества.

Ранее мы уже рассматривали похожий “сценарий” доставки гидросиликатных соединений типа углистых хондритов на ряд астероидов магматических типов при столкновениях с небольшими примитивными телами (Busarev, 1998; 2000; Busarev, 2002). Покажем, что наши наблюдательные данные о Лютеции и Весте подтверждают аналогичную интерпретацию происхождения гидросиликатов на их поверхности.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ДАННЫЕ

Уже около сорока лет для оценки состава вещества твердых безатмосферных небесных тел с помощью наземных телескопов успешно используется метод их спектrophотометрии (а в последнее время — ПЗС-спектрометрии) в видимом и ближнем ИК-диапазонах (от 0.35 до 1.1 мкм) (Adams, McCord, 1970; Маккорд, Адамс 1975; Бусарев, 1999). Пределы этого спектрального диапазона задаются границами наиболее протяженного и прозрачного спектрального “окна” земной атмосферы (см., например, Уокер, 1990). Рассматриваемый метод оценки состава вещества твердых небесных тел состоит из двух этапов. Первый — это регистрация с помощью телескопа со спектрографом спектров диффузно-отраженного твердым телом солнечного излучения и спектров одной или нескольких ближайших к нему в период наблюдений звезд — солнечных аналогов. Такие звезды сравнения используются как “замени-

тели” Солнца, а также для учета атмосферной спектральной прозрачности. Хороших аналогов Солнца по фотометрическим параметрам сравнительно немного, — всего около двух или трех десятков (Hardorp, 1980; Cayrel de Strobel, 1996; Глушнева и др., 2000). Кроме того, для использования в качестве спектrophотометрических стандартов из их числа выбираются те, у которых отсутствует переменность. Наблюдения осуществляются методом дифференциальной спектrophотометрии, позволяющим учесть и исключить влияние на полученные данные разности воздушных масс и спектральной прозрачности земной атмосферы (см., например, Харитонов и др., 1988). Первый этап завершается расчетом спектров отражения твердого тела (в качестве которого мы рассматриваем какой-либо астероид) с использованием его измеренных спектров и спектров одной или двух (для сравнения) звезд — солнечных аналогов. Это общепринятая методика, которая нами уже изложена более подробно (Бусарев, 1999; Бусарев и др., 2007). Спектры Лютеции и Весты были получены в 2004–2008 гг. на 1.25-м телескопе Крымской обсерватории ГАИШ с ПЗС-спектрографом, работающим в диапазоне 0.39–0.91 мкм со спектральным разрешением $\sim 8 \text{ \AA}$. Конструкция этого спектрографа такова, что регистрация спектра объекта осуществляется последовательно двумя частями (0.39–0.71 и 0.65–0.91 мкм), которые затем при обработке “сшиваются”. Эта процедура, как правило, не вносит значительных погрешностей, так как указанные части спектра регистрируются с небольшим интервалом времени (около 10–20 мин, в зависимости от времени экспозиции). Средне-квадратическая ошибка расчетных спектров отражения составляла не более 1%–2% в центре диапазона 0.45–0.70 мкм и была различной вблизи его синей и красной границ (в зависимости от наблюдательных условий и яркости объектов), но, как правило, не превышала 5%–7%. Для исключения шумовой компоненты, возникающей в земной атмосфере и при делении исходного спектра объекта на спектр солнечного аналога (при аппроксимации спектра отражения), применялось сглаживание спектра отражения методом “бегущего среднего” и полиномиальная экстраполяция континуума спектра вблизи синей и красной границ. В разные наблюдательные периоды использовались одни и те же звезды — солнечные аналоги (HD 10307 и 16 Cyg B) для расчета спектров отражения, а также для определения спектральной прозрачности атмосферы. Условия наблюдений астероидов, звезд-аналогов и ошибки спектров приведены в табл., а полученные нормированные спектры отражения Лютеции и Весты изображены на рис. 1–7.

Второй этап изучения спектральных характеристик и оценки состава вещества твердых безатмосферных небесных тел заключается в сравне-

Время, координаты и условия спектральных наблюдений астероидов и звезд — солнечных аналогов

Объект	Дата	UT, ч, мин, с	α , ч, мин, с	δ , град., угл. мин, угл. с	Δ , а. е.	r , а. е.	φ , град	V_z зв. вел	ω , L_z , град	$M(z)$	σ_1	σ_2	σ_3
16 Cyg B	2004 11 05	17 55 08	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.221	—	—	—
21 Лютеция (1)	2004 11 05	23 48 27	02 32 55	+11 20 50	1.257	2.245	2.5	9.9	0.000	1.450	0.018	0.005	0.011
21 Лютеция (2)	2004 11 05	23 54 26	02 32 54	+11 20 50	1.257	2.245	2.5	9.9	0.012	1.488	0.018	0.003	0.014
21 Лютеция (3)	2004 11 06	00 00 41	02 32 54	+11 20 49	1.257	2.245	2.5	9.9	0.025	1.526	0.020	0.005	0.011
16 Cyg B	2004 11 07	17 50 05	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.223	—	—	—
21 Лютеция (1)	2004 11 07	21 07 13	02 31 03	+11 15 06	1.263	2.249	3.3	10.0	0.545	1.300	0.037	0.011	0.016
21 Лютеция (2)	2004 11 07	21 13 25	02 31 02	+11 15 05	1.263	2.249	3.3	10.0	0.558	1.323	0.017	0.005	0.026
21 Лютеция (3)	2004 11 07	21 20 54	02 31 02	+11 15 05	1.263	2.249	3.3	10.0	0.573	2.062	0.013	0.007	0.016
21 Лютеция (4)	2004 11 07	21 26 57	02 31 02	+11 15 04	1.263	2.249	3.3	10.0	0.585	2.167	0.013	0.006	0.017
16 Cyg B (1)	2008 10 28	16 37 00	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.123	—	—	—
16 Cyg B (2)	2008 10 28	17 59 30	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.310	—	—	—
4 Веста (1)	2008 10 28	23 24 05	02 33 22	+03 38 35	1.539	2.521	4.3	6.4	0.000; 203.9	1.676	0.036	0.011	0.023
4 Веста (2)	2008 10 29	00 06 36	02 33 20	+03 38 28	1.539	2.521	4.3	6.4	0.133; 251.6	1.984	0.037	0.010	0.024
16 Cyg B	2008 10 29	18 29 30	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.425	—	—	—
4 Веста (1)	2008 10 29	23 28 49	02 32 22	+03 34 52	1.539	2.522	4.2	6.4	0.507; 26.5	1.740	0.033	0.009	0.029
4 Веста (2)	2008 10 30	00 28 30	02 32 19	+03 34 43	1.539	2.522	4.2	6.4	0.694; 93.5	2.288	0.041	0.018	0.015
16 Cyg B	2008 10 30	18 35 30	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.460	—	—	—
4 Веста (1)	2008 10 30	21 35 12	02 31 26	+03 31 33	1.540	2.522	4.2	6.4	0.646; 76.2	1.369	0.017	0.010	0.019
4 Веста (2)	2008 10 30	23 11 02	02 31 22	+03 31 18	1.540	2.522	4.2	6.4	0.945; 183.9	1.666	0.012	0.010	0.020
4 Веста (3)	2008 10 31	00 24 19	02 31 19	+03 31 08	1.540	2.522	4.3	6.4	0.173; 266.2	1.302	0.033	0.016	0.024
HD 10307	2008 11 25	23 25 00	01 41 47	+42 36 48	—	—	—	4.9	—	1.432	—	—	—
21 Лютеция (1)	2008 11 26	01 19 01	04 32 38	+20 41 37	1.430	2.415	2.3	10.3	0.671	1.497	0.033	0.016	0.041
21 Лютеция (2)	2008 11 26	02 37 27	04 32 35	+20 41 33	1.431	2.415	2.3	10.3	0.831	2.128	0.031	0.010	0.031
HD 10307	2008 12 01	22 59 15	01 41 47	+42 36 48	—	—	—	4.9	—	1.422	—	—	—
21 Лютеция (1)	2008 12 02	00 00 57	04 26 00	+20 35 32	1.440	2.425	0.9	10.2	0.133	1.306	0.026	0.010	0.046
21 Лютеция (2)	2008 12 02	01 41 34	04 25 56	+20 35 27	1.440	2.425	0.9	10.2	0.338	1.857	0.067	0.011	0.060

Обозначения: UT — всемирное время; α — прямое восхождение; δ — склонение; Δ — геоцентрическое расстояние; r — гелиоцентрическое расстояние; φ — фазовый угол; V_z — видимая звездная величина; ω — относительная фаза вращения; L_z — долгота на Весте, рассчитанная по формуле из работы Soshran, Vilas, (1998); $M(z)$ — воздушная масса; ошибки спектров отражения астероидов: σ_1 — стандартное отклонение у 0.44–0.45 мкм, σ_2 — стандартное отклонение у 0.59–0.60 мкм, σ_3 — стандартное отклонение у 0.84–0.85 мкм. После названий астероидов в скобках указаны порядковые номера их спектров отражения, полученных в течение одной ночи и приведенных на рисунках с соответствующими датами.

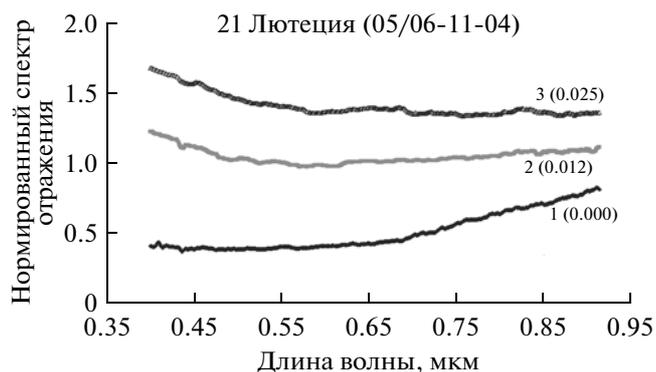


Рис. 1. Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 21 Лютеции, полученные 5–6 ноября 2004 г. Спектры 1–3 приведены в хронологическом порядке и смещены друг относительно друга для удобства восприятия. Значение относительной фазы вращения астероида указано в скобках после номера спектра. Фаза вращения самого первого спектра условно принята за нулевую.

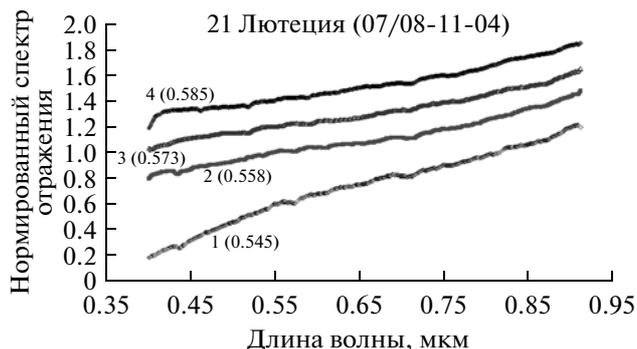


Рис. 2. Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 21 Лютеции, полученные 7–8 ноября 2004 г. Спектры 1–4 приведены в хронологическом порядке и смещены друг относительно друга для удобства восприятия.

нии их спектров отражения с лабораторными спектрами отражения их вероятных образцов-аналогов. Аналогами вещества астероидов являются метеориты как их возможные фрагменты, а также земные горные породы и минералы. Считая преобладающий состав реголита Лютеции и Весты известным на основании их установленных магматических типов (это может быть набор из пироксенов, оливинов и других высокотемпературных минералов и соединений) (Gaffey и др., 1989; 2002), а также известными спектральными характеристиками перечисленных минералов, рассмотрим спектральные свойства углистых хондритов и земных гидросиликатов, которые могут себя проявить “на фоне” вещества с высокотемпературной минералогией.

Ранее мы выполнили лабораторные исследования спектров отражения углистых хондритов групп С1 и СМ, как наиболее примитивных и гидратированных метеоритов (Busarev, Taran, 2002). В частности, углистые хондриты группы С1 состоят практически целиком из смеси тонкозернистых частиц (с субмикронными размерами) низкотемпературных гидросиликатов (до 90 вес. %), содержащих до 17–22 вес. % связанной воды (Dodd, 1981; Jarosewich, 1990) и углеродистого аморфного вещества (до 6 вес. %) (Hayes, 1967) — так называемой “матрицы”. На рис. 8, взятом из нашей предшествующей работы (Busarev, Taran, 2002), представлены спектры отражения четырех раздробленных образцов углистых хондритов. Из рисунка видно, что общей особенностью спектров отражения всех этих образцов является наличие широкой полосы поглощения в диапазоне 500–1000 нм, вызываемой электронным переносом заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ в гидратированном силикатном веществе с центром у 0.75–0.80 мкм (Пла-

тонов, 1976; Бахтин, 1985; Burns, 1993). Ультрафиолетовый край поглощения в этих спектрах наблюдается у 380 нм, поскольку измерения выполнены в земной атмосфере. В вакууме край поглощения в спектрах углистых хондритов наблюдается на более коротких длинах волн (Wagner и др., 1987). Поэтому важно отметить, что для углистых хондритов характерна общая вогнутая форма спектра отражения во всем видимом диапазоне. Похожую форму имеют и спектры отражения серпентинов. На рис. 9 из другой нашей работы (Busarev и др., 2004a) изображены спектры диффузного отражения раздробленных образцов земных серпентинов lizardite-хризотиловой разновидности. Она образуется на начальном и наиболее низкотемпературном этапе формирования гидросиликатов из предшествующих им минералов или пород (Deeg и др., 1963). На рисунке видно, что для данной разновидности серпентинов характерна достаточно интенсивная полоса поглощения в диапазоне 0.40–0.49 мкм с центром у 0.44–0.45 мкм. Как было установлено при мёсбауэровских исследованиях этих образцов, эквивалентная ширина полосы поглощения у 0.44–0.45 мкм тесно коррелирует с содержанием в них Fe^{3+} (Busarev и др., 2008). Дополнительными индикаторами окисленного вещества можно также считать полосы поглощения с центром у 0.60 и 0.67 мкм, обнаруженные в спектрах отражения окисленных Fe- и Fe–Ni-соединений и минералов группы шпинели, представляющих собой сложные оксиды Fe, Mg, Al, и Cr (Hiroi и др., 1996). Покажем, что перечисленные спектральные особенности гидратированных, высокоокисленных или окисленных соединений присутствуют в спектрах отражения Лютеции и Весты.

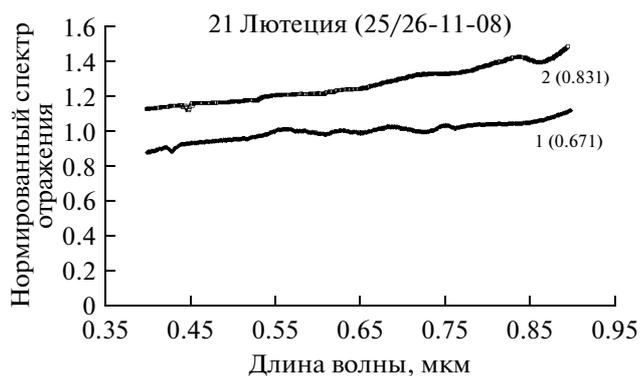


Рис. 3. Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 21 Лютеции, полученные 25–26 ноября 2008 г. Спектры 1 и 2 приведены в хронологическом порядке и смещены друг относительно друга для удобства восприятия.

ОБСУЖДЕНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Лютеция

Из рис. 1, где изображены нормированные спектры отражения Лютеции, полученные 5–6 ноября 2004 г. при близких значениях относительной фазы вращения (ФВ) (ФВ 0.000–0.025, за нулевую условно принята ФВ самого первого спектра), видно, что они имеют вогнутую форму, типичную для примитивных VGF-астероидов, близких к С-астероидам (Tholen, 1989). Как уже отмечалось, такая форма спектров отражения в видимом диапазоне свойственна богатым гидросиликатами углистым хондритам и земным гидросиликатам (см. рис. 8–9), что является признаком наличия в веществе ионов железа Fe^{2+} и Fe^{3+} и их электронного взаимодействия. Кроме того, в спектрах отражения Лютеции имеется еще один индикатор содержания Fe^{3+} – слабая полоса поглощения у 0.43–0.45 мкм (рис. 1). Существенно другую форму со значительным положительным наклоном, характерную для D-астероидов (Tholen, 1989), имели спектры отражения Лютеции 7–8 ноября 2004 г. (рис. 2), соответствующие ее диаметрально противоположной стороне (ФВ 0.545–0.585). Кроме слабых признаков полосы поглощения у 0.43–0.44 мкм, а также абсorptionной детали неизвестного происхождения у 0.71–0.72 мкм, общих особенностей на этих спектрах нет. Небольшой положительный наклон и слегка вогнутую форму имели спектры отражения Лютеции 25–26 ноября 2008 г. при других значениях ФВ (0.671–0.831) (рис. 3). Такая форма спектров отражения характерна для С-астероидов (Tholen, 1989). И, наконец, спектры отражения Лютеции 1–2 декабря 2008 г. (рис. 4), имели форму, свойственную S-астероидам (спектр 1, ФВ 0.133) и M-астероидам (спектр 2, ФВ 0.338) (Tholen, 1989).

В спектре 1 на этом рисунке видны отчетливые признаки типичной для S-астероидов пироксен-оливиновой полосы поглощения у 1.0 мкм, а в спектре 2 – слабая полоса пироксенов у 0.51 мкм (Платонов, 1976) и несколько более интенсивная полоса поглощения окисленных металлических соединений (Higo и др., 1996). Следует подчеркнуть, что спектры отражения, показанные на последовательных рис. 1 и 2, а также 3 и 4, характеризуют примерно противоположные стороны астероида (в соответствии с указанными значениями ФВ). Таким образом, представленные здесь спектры отражения Лютеции охватывают весь период ее вращения и свидетельствуют о значительной переменности спектральных характеристик, которые при разных фазах вращения соответствуют астероидным спектральным C-G-, D- или M-S-типам. Похожие вариации спектров отражения Лютеции в видимом диапазоне отмечались и во время ее оппозиции в марте 2006 г. (Nedelcu и др., 2007; Busarev, 2008). Этому можно сопоставить изменения среднего состава вещества Лютеции от гидросиликатов и углеводов до высокотемпературных минералов и/или металлических соединений. В земной коллекции метеоритов уже имеется образец вещества подобного рода – ударная брекчия Кайдун, представляющая собой “сбор” крайне разнородных материалов (Иванов и др., 1998; Zolensky, Ivanov, 2003; Bischoff и др., 2006). Как отмечают авторы указанных публикаций, Кайдун мог быть фрагментом поверхности родительского тела, которое испытало интенсивную ударную эволюцию в процессе перемещения с периферии ГПА до орбиты Земли.

В отличие от метеорита Кайдун, Лютеция имеет достаточно большие размеры, но может также представлять собой фрагмент более крупного тела. В соответствии с существующей парадигмой (Bell и др., 1989), как один из M-астероидов, Лютеция может быть частью металлического ядра дифференцированного родительского тела. Но, вероятно, она значительно не меняла своего гелиоцентрического расстояния за все время существования, так как находится на внутреннем краю распределения известных M-астероидов в Солнечной системе (Gradie, Tedesco, 1982). Поэтому возможны два варианта интерпретации весьма неоднородного состава вещества Лютеции. Первый – она является “промежуточным” фрагментом родительского тела, отколовшимся на границе его металлического ядра и силикатной (или даже гидросиликатной) мантии и сохранившим вещество этих разных оболочек. В этом случае Лютеция должна состоять из двух отличающихся по составу частей, с преимущественно металлическим и силикатным (или гидросиликатным) составами. Возможно, что спектры отражения Лютеции, представленные на рис. 1 и 2, а также 3 и 4, характеризующие ее противоположные сто-

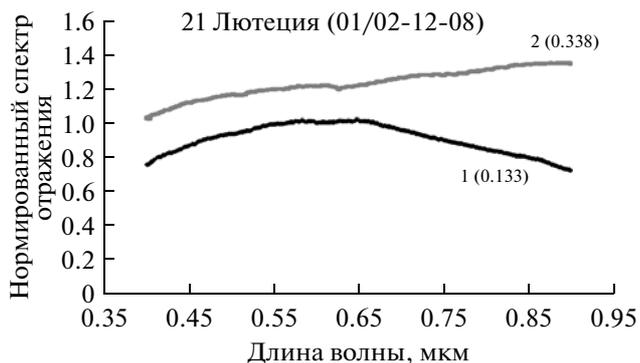


Рис. 4. Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 21 Лютеции, полученные 1–2 декабря 2008 г. Спектры 1 и 2 приведены в хронологическом порядке и смещены друг относительно друга для удобства восприятия.

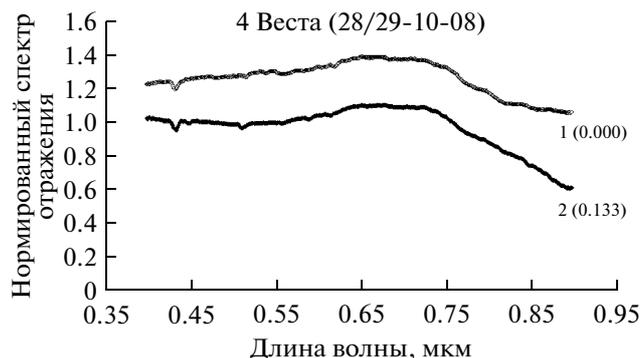


Рис. 5. Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 4 Весты, полученные 28–29 октября 2008 г. Спектры 1 и 2 приведены в хронологическом порядке и смещены друг относительно друга для удобства восприятия. Значение относительной фазы вращения астероида указано в скобках после номера спектра. Фаза вращения самого первого спектра условно принята за нулевую.

роны, подтверждают такие различия. Другой вариант интерпретации наблюдаемых неоднородных свойств Лютеции связан с возможностью “доставки” на нее нетипичных (если согласиться с ее классификацией как астероида М-типа) гидратированных и/или высокоокисленных соединений при падениях примитивных тел углисто-хондритового состава с высоким содержанием гидросиликатов, как было предложено при интерпретации аналогичных спектральных особенностей у других астероидов магматических типов (Busarev, 1998; 2000; Бусарев, 2002). Но ради точности здесь следует упомянуть еще один экспериментальный результат, полученный при моделировании плавления и испарения силикатного вещества в метеоритном ударе с помощью импульсного лазера. Идея такого моделирования с целью изучения преобразования физико-химического состава вещества в метеоритном ударе (при типичных скоростях соударений тел от единиц до десятков км/с) была впервые предложена и реализована отечественными специалистами (Gerasimov и др., 1999; Манагадзе, 2009). Изучение состава последовательных слоев ударного конденсата, образовавшегося при испарении с помощью импульсного лазера железосодержащих силикатов в гелиевой атмосфере, показало: наряду с уменьшением концентрации Fe^{2+} растет содержание не только Fe^0 , но и Fe^{3+} (Яковлев и др., 2009). Авторы указанной публикации пришли к выводу (полученный ими экспериментальный результат был подтвержден при изучении ударного конденсата в доставленных КА Луна-16 образцах лунного реголита), что в естественных ударных процессах на небесных безатмосферных телах происходит химическое диспропорционирование двухвалентного железа, при котором Fe^{2+} преобразуется в

форму Fe^0 и Fe^{3+} при средних соотношениях $\text{Fe}^0 : \text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+} = 1.2 : 1.9 : 0.7$. Но из этих пропорций видно, что ударный процесс все же имеет преимущественно восстановительный характер и что длительная ударная переработка вещества не может привести к преобладанию трехвалентной формы железа над другими. Поэтому, если в спектре отражения астероида имеются признаки наличия какой-либо одной валентной формы железа, то, вероятно, можно утверждать, что они характеризуют исходный состав вещества астероида и не являются последствием ударных процессов.

Веста

Спектры отражения Весты, представленные на рис. 5–7, также были получены при разных величинах ее относительной ФВ (за нулевую условно принята ФВ самого первого спектра) и, соответственно, при разной долготе субтерральной точки. Значения долготы Весты на средние моменты времени регистрации ее спектров были рассчитаны по формуле, взятой из работы (Cochran, Vilas, 1998), и приведены в табл. Изображенные на рис. 5 спектры отражения 1 и 2 были получены 28–29 октября 2008 г. (ФВ 0.000 и 0.133). Наиболее заметной спектральной деталью на них является коротковолновое крыло полосы поглощения ортопироксенов у 0.90 мкм, вызываемой разрешенными по спине электронными переходами в ионах Fe^{2+} , находящихся в позициях М2 (Платонов, 1976). Такую интерпретацию полосы поглощения у 0.90 мкм подтверждает наличие более слабых пироксеновых полос поглощения у 0.51 мкм, вызываемых запрещенными по спине электронными переходами в ионах Fe^{2+} (Платонов, 1976). Значительная интенсивность

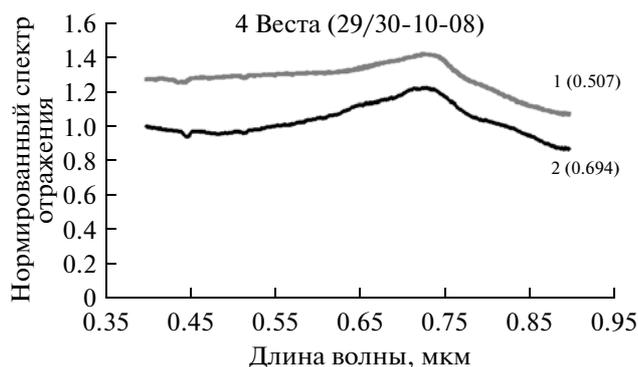


Рис. 6. Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 4 Весты, полученные 29–30 октября 2008 г. Спектры 1 и 2 приведены в хронологическом порядке и смещены друг относительно друга для удобства восприятия.

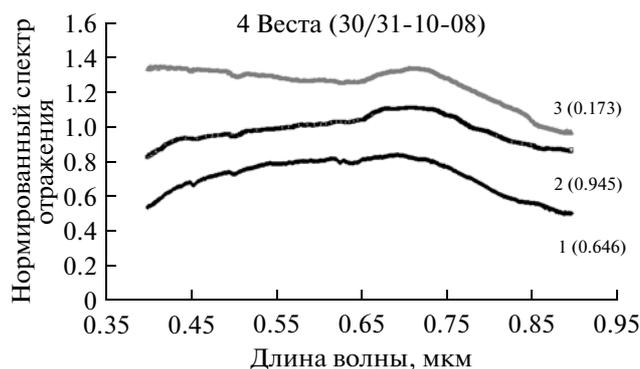


Рис. 7. Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 4 Весты, полученные 30–31 октября 2008 г. Спектры 1–3 приведены в хронологическом порядке и смещены друг относительно друга для удобства восприятия.

полосы поглощения пироксенов у 0.90 мкм, (особенно на спектре 2) показывает, что минералогический состав поверхности Весты является преимущественно высокотемпературным. В то же время на спектрах имеются слабые полосы поглощения Fe^{3+} у 0.43 мкм (Busarev и др., 2008) с относительной интенсивностью 5%–7%. В диапазоне 0.40–0.65 мкм есть также различия в континууме спектра, форма которого меняется от ровной (кривая 1) до слегка изогнутой (кривая 2). Интерпретацию последней детали отложим до конца текущего раздела, поскольку она присутствует на нескольких спектрах отражения Весты. Еще два спектра отражения были получены 29–30 октября 2008 г. при ФВ астероида 0.507 и 0.694 (рис. 6). Их форма подобна форме предыдущих спектров. Некоторыми особенностями являются более резкий максимум у 0.73 мкм, несколько смещенные к 0.44 мкм и более слабые (~3%–4%) полосы поглощения Fe^{3+} и слабая полоса пироксенов у 0.51 мкм. И, наконец, последние три спектра отражения Весты были получены 30–31 октября 2008 г. (ФВ 0.646, 0.945, и 0.173) (рис. 7). На них привлекает внимание достаточно резкое изменение формы континуума при переходе от спектра 2 к спектру 3, хотя значения ФВ астероида и форма этих спектров близки к соответствующим параметрам спектров 1 и 2 на рис. 5. Возможно, что спектры 2 и 3 на рис. 7 более точно характеризуют границу перехода между различными образованиями на поверхности Весты, чем спектры 1 и 2 на рис. 5. Кстати, именно вблизи долгот Весты (155°–195°), которым соответствуют спектры 1 (рис. 5) и 2 (рис. 7) (см. табл.), японские специалисты обнаружили гидросиликаты по ИК-данным вблизи 3.0 мкм (Hasegawa и др., 2003). Спектры отражения на рис. 7 имеют те же основные свойства, что и предшествующие спектры астероида. Некоторыми дополнительными особенно-

стями на них являются слабые полосы поглощения пироксенов у 0.51 мкм (Платонов, 1976) и, возможно, окисленных металлических соединений у 0.64 мкм (Nigoi и др., 1996).

Как отмечалось, некоторой общей особенностью спектров 2 (ФВ 0.133, рис. 5), 2 (ФВ 0.694, рис. 6) и 3 (ФВ 0.173, рис. 7) является их вогнутая форма в диапазоне 0.40–0.70 мкм. Если первый и последний из них были получены при близких ФВ, то второй соответствует противоположной стороне астероида. Это может означать, что, во-первых, на видимой стороне Весты находилась одна и та же крупная деталь поверхности – сначала слева, а затем справа, и, во-вторых, вещество рассматриваемой детали включало гидросиликаты, что, вероятно, подтверждается вогнутой формой перечисленных спектров отражения.

После краткого описания представленных спектров отражения Весты дадим их общую интерпретацию. Полученные нами спектральные характеристики этого астероида в основном хорошо согласуются с аналогичными данными других авторов (например, McCord и др., 1970; McFadden и др., 1977; Gaffey, 1997; Golubeva, Shestopalov, 1997). Оказалось, что средний спектр отражения Весты в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне идентичен спектру кальциевого пироксена с составом $\text{Fs}_{46}\text{Wo}_8$ (что означает 46 мол. % Fe и 8 мол. % Ca) (Gaffey, 1997). Указанный состав был установлен по эмпирической зависимости отношения интенсивностей и положения пироксеновых полос поглощения у 0.90 и 2.00 мкм (Adams, 1974; Gaffey, 1984). Такой состав пироксена характерен также и для метеоритного семейства эвкритов, говардитов и диогенитов (HED), принадлежащего к базальтовым ахондритам (см., например, Duke, Silver, 1967; Drake, 1979). Родительскими телами этих магматических метеоритов могут быть Веста и/или астероиды-“вестоиды” километровой

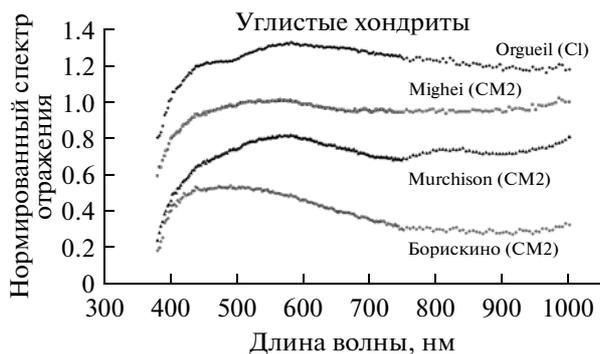


Рис. 8. Лабораторные нормированные (на 550 нм) и смещенные по оси ординат на равные расстояния спектры диффузного отражения четырех раздробленных (размер частиц <math><0.25\text{ мкм}</math>) образцов углистых хондритов (Busarev, Taran, 2002). Группы углистых хондритов указаны в скобках после названий образцов.

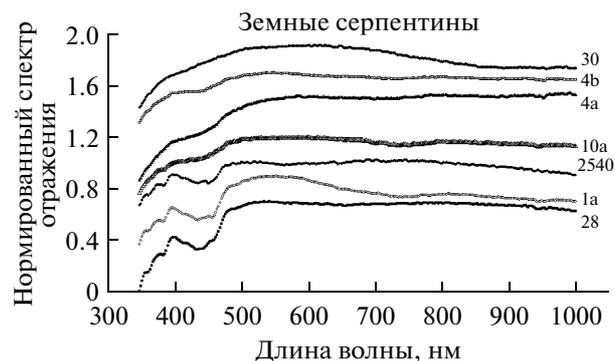


Рис. 9. Лабораторные нормированные (на 550 нм) и смещенные по оси ординат на равные расстояния спектры диффузного отражения семи раздробленных (размер частиц <math><0.25\text{ мкм}</math>) образцов земных серпентинитов (Busarev и др., 2004а) с нарастающим (на рисунке сверху вниз) содержанием Fe^{3+} по мёссбауэровским данным (Busarev и др., 2008), которое коррелирует с интенсивностью полосы поглощения с центром у 440–460 нм. Рядом со спектрами указаны номера образцов.

размера, найденные между орбитой Весты и резонансной орбитой 3 : 1 с Юпитером (Binzel, Xu, 1993). Кроме того, несколько астероидов-“вестоидов” были идентифицированы среди астероидов, сближающихся с Землей (Cruikshank и др., 1991). Это означает, что они могут выбрасываться из Главного пояса астероидов при попадании на указанную резонансную орбиту. А моделирование происхождения огромного ударного кратера, найденного с ИСЗ HST (Thomas и др., 1997) вблизи южного полюса Весты, показало, что при этом ударном событии могли возникнуть как астероиды-“вестоиды”, так и сами попавшие на Землю метеориты-ахондриты (Asphaug, 1997). Таким образом, перечисленные наблюдательные факты и результаты моделирования тепловой эволюции Весты (см., например, Kevin, Drake, 1997) подтверждают образование на ней в прошлом высокотемпературного магматического океана и формирование из него базальтовой коры, фрагментами которой являются НЕД-метеориты. В таком случае представляется странным наличие на поверхности Весты низкотемпературных гидросиликатов, которые (если считать первичный состав астероида углисто-хондритовым) должны были дегидратировать при высоких температурах магмы (~1000°С и выше).

О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ПОЯВЛЕНИЯ ГИДРОСИЛИКАТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛЮТЕЦИИ, ВЕСТЫ И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ МАГМАТИЧЕСКИХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

В постмагматический период ОН-содержащие соединения могли появиться на поверхности Лютеции и Весты либо под влиянием космогенных факторов (в частности, при химическом взаимодействии протонов солнечного ветра с кислородом, входящим в силикатные породы) (Starukhina, 2001), либо были доставлены при ударных со-

бытиях. Мы предпочитаем второй вариант интерпретации спектральных признаков наличия гидросиликатов на поверхности Лютеции, Весты и других магматических тел по следующим причинам.

По результатам спектральных исследований известных М-астероидов в области 3.0 мкм у диагностической полосы поглощения $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$ было установлено, что только около 35% таких тел гидратировано (Rivkin и др., 2000). Очевидно, что в случае возникновения ОН-соединений на поверхности М-астероидов под влиянием такого общего фактора, как солнечный ветер, доля гидратированных тел была бы близка к 100%.

Для поиска и обнаружения спектральных (в том числе альбедных) неоднородностей на поверхности астероидов и других безатмосферных тел Солнечной системы нами был разработан специальный спектрально-частотный метод (Бусарев и др., 2007). Он является комбинацией уже известных в астрофизике спектрального и частотного методов исследований небесных тел. Применение этого метода позволяет, во-первых, обнаружить на поверхности вращающегося небесного тела образования с размером меньше его диаметра по кратковременным вариациям его интегральных спектральных характеристик и, во-вторых, установить физико-химические особенности этих образований. Рассматриваемый метод основывается на регистрации достаточно большого ряда спектров избранного небесного тела на интервале времени, соответствующем, как минимум, нескольким периодам его вращения. После получения таких данных проводится их изучение с целью идентификации какой-либо часто встре-

чающейся спектральной детали, а затем — расчет и частотный анализ рядов значений избранного спектрального параметра, расположенных в порядке изменения фазы вращения тела. Например, параметром, характеризующим минералогическую полосу поглощения в спектре отражения твердого небесного тела, является величина ее эквивалентной ширины (W). Для получения информации о распределении гидратированных и/или высокоокисленных силикатов на Лютетии и Весте мы избрали обнаруженную в их спектрах отражения полосу поглощения Fe^{3+} у 0.44 мкм (Busarev и др., 2008). По результатам частотного анализа величин W этой полосы поглощения в 40 спектрах отражения Лютетии было установлено, что на поверхности астероида имеются пятна гидратированных и/или высокоокисленных соединений с размерами в интервале 3–70 км (Прокофьева и др., 2005). Применение этого метода анализа вариаций величин W той же полосы поглощения в 91 спектре отражения Весты дало похожий результат и показало, что более 50% соответствующих образований на поверхности астероида имеет размеры 13–50 км (Прокофьева-Михайловская и др., 2008). Интересно отметить, что найденный максимум в распределении размеров гидратированных и/или высокоокисленных образований на поверхности Лютетии и Весты соответствует максимуму распределения ударных кратеров на поверхности Луны, астероидов и других безатмосферных небесных тел (Ivanov и др., 1999; Schmedemann и др., 2009).

Проблема с интерпретацией спектральных признаков гидросиликатов, аналогичная рассматриваемой нами, недавно возникла при исследованиях Луны. Съемка поверхности Луны в диапазоне 2.8–3.0 мкм с индийского КА Chandrayaan-1 позволила обнаружить наличие гидросиликатов (по их полосе поглощения в спектре отражения лунной поверхности) в полярных районах и вблизи некоторых относительно молодых ударных кратеров (Pieters и др., 2009). Основываясь на отсутствии корреляции полосы поглощения гидросиликатов с содержанием водорода в освещенных Солнцем областях, определенным по нейтронным данным, авторы этой публикации сделали вывод об образовании и накоплении этих соединений в результате других поверхностных процессов.

Одни из таких наиболее интенсивных поверхностных процессов на безатмосферных небесных телах, как уже отмечалось, — это процессы ударной переработки (дробления, плавления, испарения, конденсации и т. д.) их вещества, а также доставки при падениях тел нового вещества, в том числе гидратированного. Здесь следует упомянуть экспериментальный результат, который важен для интерпретации последствий значительных метеоритных ударов. В этих экспериментах

образцы серпентина (с содержанием 12.5% связанной воды), запечатанные в металлическую оболочку, были подвергнуты ударам металлических пластин, ускоренных с помощью взрыва до высоких скоростей (порядка нескольких км/с) (Rivkin и др., 2003). Последующие измерения теми же авторами спектров отражения раздробленных образцов (с размером частиц <125 мкм) исходного и подвергнутого ударным нагрузкам (20–40 ГПа) материала показало, что после воздействия указанных давлений серпентин почти полностью сохранил свои спектральные свойства (положение и интенсивность полос поглощения OH и H₂O у 3.0 мкм). Таким образом, если при ударных событиях серпентин не подвергается воздействию высоких температур (при некотором удалении от эпицентра удара), то можно утверждать об их “выживании”. Кстати, нужно подчеркнуть, что подобные условия характерны для преобладающей части вещества сталкивающихся тел. В эпицентре ударов метеоритов и микрометеоритов с космическими скоростями вещество подвергается комплексному воздействию высоких давлений и температур (до нескольких тысяч градусов), что приводит к его плавлению, испарению и конденсации. Но, как показывает экспериментальное моделирование, даже после прохождения вещества через такие экстремальные условия в ударном конденсате могут сохраниться не только окислы и гидроокислы металлов, но и летучие соединения, включающие водород, углерод, серу, фосфор и хлор, которые имелись в исходном образце (Gerasimov и др., 2002; Яковлев и др., 2009).

Как следует из аналитических и численных расчетов, динамическая хаотизация ГПА произошла на протопланетном этапе эволюции Солнечной системы в результате резонансно-гравитационных и гравитационных возмущений со стороны растущего Юпитера и проникающих в ГПА крупных допланетных тел из зоны Юпитера или планет земной группы (Сафронов, 1969; Davis и др., 1979; 1985; Сафронов, Зиглина, 1991; Petit и др., 2001; Magni, Coradini, 2004; Bottke и др., 2005; O'Brien и др., 2007). Эти тела, двигаясь по орбитам с большими эксцентриситетами, могли многократно пронизывать ГПА, сталкиваясь с родительскими телами астероидов. В результате таких интенсивных гравитационных и ударных взаимодействий тел во всем ГПА не только значительно возросла относительная скорость астероидов (от сотен м/с до ее современного значения ~5 км/с), но и произошло дробление, перемешивание и распыление вещества сталкивающихся тел, имеющих на протопланетном этапе эволюции преимущественно силикатно-ледяной или углисто-хондритовый состав (по крайней мере, — их внешних оболочек). Вероятно, что пылевая компонента такого раздробленного вещества могла

быть достаточно быстро удалена из ГПА под влиянием ряда физических факторов (см., например, Busarev, 2004). Однако более крупные фрагменты с типично метеороидно-астероидными размерами (примерно от десятков метров до километра) по причине значительно большей инерции могли остаться в виде реликтов на тех гелиоцентрических расстояниях, где образовались, если не попали на резонансные с Юпитером орбиты и не были удалены из ГПА. Возможно, что популяция таких небольших примитивных тел, являющихся фрагментами родительских тел астероидов и сталкивавшихся с ними допланетных тел, по-прежнему заполняет ГПА на всех гелиоцентрических расстояниях. Поэтому падения относительно небольших тел с примитивным составом на астероиды любого состава могли происходить на протяжении всей истории ГПА. Такая гипотеза, фактически, была выдвинута в наших предшествующих работах (Busarev, 1998; 2000; Бусарев, 2002) при интерпретации спектральных признаков наличия гидросиликатов на некоторых астероидах магматических типов. Независимым подтверждением этой гипотезы может быть обнаружение в ГПА нескольких небольших тел с признаками кометной активности, которые “проявили” свой внутренний ледяной состав, вероятно, в результате недавних столкновений (Hsieh, Jewitt, 2006). Еще одним ее подтверждением, как уже отмечалось, может быть “всеохватывающий” характер пространственного распределения известных астероидов С-типа (с предполагаемой углисто-хондритовой минералогией), в отличие от распределений астероидов других типов, имеющих более четкую локализацию в ГПА по гелиоцентрическим расстояниям (Gradie, Tedesco, 1982).

Исходя из приведенных результатов и представлений, обнаружение гидросиликатов на Лютеции, Весте и многих других телах магматического происхождения является, вероятно, не случайным, а закономерным, поскольку согласуется с эволюцией этих тел и историей Солнечной системы.

Автор благодарит РФФИ (грант 08-02-00931) за финансовую поддержку спектральных наблюдений астероидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батраков Ю.В., Кочетова О.М., Скрипниченко В.И. и др. Эфемериды малых планет на 2001 год. С.-Петербург: Изд-во ИПА РАН, 2000. С. 244–245.
- Бахтин А.И. Породообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1985, 192 с.
- Бусарев В.В. Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 1999. Т. 33. № 2. С. 140–150.
- Бусарев В.В. Гидратированные силикаты на астероидах М-, S- и E-типов как возможные следы столкновений с телами из зоны роста Юпитера // Астрон. вестн. 2002. Т. 36. № 1. С. 39–47.
- Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Бочков В.В. Спектральный и спектрально-частотный методы исследования безатмосферных тел Солнечной системы // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. № 6. С. 663–675.
- Глушнев И.Н., Шенаврн В.И., Рощина И.А. Звезды – аналоги Солнца: распределение энергии в спектрах и физические параметры атмосфер // Астрон. журн. 2000. Т. 77. № 4. С. 285–294.
- Иванов А.В., Курат Г., Мигдисова Л.Ф. и др. Метеорит Кайдун: до- и постаккреционное водное изменение металла фрагмента энстатитового хондрита // Геохимия. 1998. № 2. С. 131–136.
- Коржинский Д.С. Физико-химические основы парагенезисов минералов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 184 с.
- Маккорд Т.Б., Адамс Дж.Б. Использование наземных телескопов для определения состава поверхности тел Солнечной системы // Космохимия Луны и планет. Труды Сов.-Амер. конф. по космохимии Луны и планет / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1975. С. 547–573.
- Манагадзе Г.Г. Плазма метеоритного удара и добиологическая эволюция. М.: Физматлит, 2009. 352 с.
- Платонов А.Н. Природа окраски минералов. Киев: Наукова думка, 1976. 264 с.
- Прокофьева В.В., Бочков В.В., Бусарев В.В. Исследование структуры поверхности М-астероида 21 Лютеция спектральным и частотным методами // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. № 5. С. 457–468.
- Прокофьева В.В., Бочков В.В., Бусарев В.В. О возможной двойственности астероида 21 Лютеция по анализу одновременных наблюдений в полосах BVR // Астрон. вестн. 2006. Т. 40. № 6. С. 512–521.
- Прокофьева-Михайловская В.В., Батраков Ю.В., Бочков В.В. и др. Свидетельства сложной структуры астероида 21 Лютеция // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 4. С. 337–344.
- Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н., Бочков В.В. Водные соединения на поверхности астероида 4 Веста // Изв. КрАО. 2008. Т. 104. № 1. С. 218–228.
- Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. С. 179–189.
- Сафронов В.С., Зиглина И.Н. Происхождение пояса астероидов // Астрон. вестн. 1991. Т. 25. № 2. С. 190–199.
- Уокер Г. Астрономические наблюдения / Ред. Щеглов П.В. М.: Мир, 1990. 351 с.
- Харитонов А.В., Терещенко В.М., Князева Л.Н. Спектрофотометрический каталог звезд. Алма-Ата: Наука, 1988. 478 с.

- Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В. Эффект реакции диспропорционирования двухвалентного железа при ударно-испарительных процессах // Геохимия. 2009. № 2. С. 141–149.
- Adams J.B., McCord T.B. Remote sensing of lunar surface mineralogy: Implications from visible and near-infrared reflectivity of Apollo 11 samples // Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf. 1970. V. 3. P. 1937–1945.
- Adams J.B. Visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes as applied to remote sensing of solid objects in the Solar System // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 4829–4836.
- Adams J.B. Interpretation of visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes and other rock-forming minerals // Infrared and Raman spectroscopy of lunar and terrestrial minerals / Ed. Karr C. N.-Y.: Acad. Press, 1975. P. 91–116.
- Asphaug E. Impact origin of the Vesta family // Meteorit. and Planet. Sci. 1997. V. 32. P. 965–980.
- Barucci M.A., Fornasier S., Dotto E., et al. Asteroids 2867 Steins and 21 Lutetia: Surface composition from far infrared observations with the Spitzer space telescope // Astron. and Astrophys. 2008. V. 477. P. 665–670.
- Bell J.F., Davis D.R., Hartmann W.K., Gaffey M.J. Asteroids: The big picture // Asteroids II / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 921–945.
- Binzel R.P., Xu S. Chips off of asteroid 4 Vesta — Evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites // Science. 1993. V. 260. P. 186–191.
- Bischoff A., Scott E.R.D., Metzler K., Goodrich C.A. Nature and origins of meteoritic breccias // Meteorites and the Early Solar System II / Eds Lauretta D.S., McSween H.Y., Jr., Tucson: Univ. Arizona Press, 2006. P. 679–712.
- Bottke W.F., Durda D.D., Nesvorný D., et al. Linking the collisional history of the main asteroid belt to its dynamical excitation and depletion // Icarus. 2005. V. 179. P. 63–94.
- Burns R.G. Mineralogical applications of crystal field theory. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 1993. 224 p.
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey. The observations // Icarus. 2002a. V. 158. P. 106–145.
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey. A future-based taxonomy // Icarus. 2002b. V. 158. P. 146–177.
- Busarev V.V. Spectral features of M-asteroids: 75 Eurydike and 201 Penelope // Icarus. 1998. V. 131. P. 32–40.
- Busarev V.V. On a possible way of hydrating some M-, E-, and S-class asteroids // Lunar and Planet. Sci. Conf. 2000. XXXI. Houston. Abstract #1428.
- Busarev V.V., Taran M.N. On the spectral similarity of carbonaceous chondrites and some hydrated and oxidized asteroids // Proc. of Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002), Berlin: Techn. Univ., ESA-SP-500, 2002. P. 933–936.
- Busarev V.V. Where some asteroid parent bodies? // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXV. 2004. Houston. Abstract #1026.
- Busarev V.V., Taran M.N., Fel'dman V.I., Rusakov V.S. Possible spectral signs of serpentines and chlorites in reflectance spectra of celestial solid bodies // 40th Vernadsky Inst. — Brown Univ. Microsimp. on Comparative Planetology, 2004a, Moscow. Abstract # 15.
- Busarev V.V., Bochkov V.V., Prokofeva V.V., Taran M.N. Characterizing 21 Lutetia with its reflectance spectra // The new ROSETTA targets / Eds Colangeli L. et al., Kluwer Acad. Publ. 2004b. P. 79–83.
- Busarev V.V. Spectral signs of carbonaceous chondritic material on (21) Lutetia // Asteroids, Comets, Meteors 2008, Baltimore (USA). July 13–18, 2008. Abstract # 8010.
- Busarev V.V., Volovetskij M.V., Taran M.N., et al. Results of reflectance spectral, Mössbauer, X-ray and electron microprobe investigations of terrestrial serpentine samples // 48th Vernadsky Inst.—Brown Univ. Microsymp. on Comparative Planetology, 2008, Moscow. Abstract № 6.
- Cayrel de Strobel G. Stars resembling the Sun // Astron. and Astrophys. Rev. 1996. V. 7. P. 243–288.
- Cochran A.L., Vilas F. The changing spectrum of Vesta: Rotationally resolved spectroscopy of pyroxene on the surface // Icarus. 1998. V. 134. P. 207–212.
- Cruikshank D.P., Tholen D.J., Hartmann W.K., et al. Three basaltic Earth-approaching asteroids and the source of the basaltic meteorites // Icarus. 1991. V. 89. P. 1–13.
- Davis D.R., Chapman C.R., Greenberg R., et al. Collisional evolution of asteroids: Populations, rotations and velocities // Asteroids / Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press, 1979. P. 528–557.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. Rock-Forming Minerals. V. 3. Sheet silicates. N.-Y.: John Wiley, 1963. P. 170–190.
- Dodd R.T. Meteorites — A petrologic-chemical synthesis. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981. 368 p.
- Dotto E., Barucci M.A., Fulchignoni M., et al. M-type asteroids: Rotational properties of 16 objects // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1992. V. 95. P. 195–211.
- Drake M.J. Geochemical evolution of the eucrite parent body: Possible nature and evolution of asteroid 4 Vesta? // Asteroids / Eds Gehrels T., Matthews M.S., Tucson: Univ. Arizona Press, 1979. P. 765–782.
- Duke M.B., Silver L.T. Petrology of eucrites, howardites and mesosiderites // Geochim. et Cosmochim. Acta 1967. V. 31. P. 1637–1665.
- Gaffey M.J. Rotational spectral variations of asteroid (8) Flora: Implications for the nature of the S-type asteroids and for the parent bodies of the ordinary chondrites // Icarus. 1984. V. 60. P. 83–114.
- Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P. Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // Asteroids II / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 98–127.
- Gaffey M.J. Surface lithologic heterogeneity of asteroid 4 Vesta // Icarus. 1997. V. 127. P. 130–157.
- Gaffey M.J., Cloutis E.A., Kelley M.S., Reed K.L. Mineralogy of asteroids // Asteroids III / Eds Bottke W.F., Jr., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 183–204.
- Gerashimov M.V., Ivanov B.A., Yakovlev O.I., Dikov Yu.P. Physics and chemistry of impacts // Laboratory Astrophysics and Space Research / Eds. Ehrenfreund P. et al., Kluwer Acad. Publ., 1999. V. 236. P. 279–329.

- Gerasimov M.V., Dikov Yu.P., Yakovlev O.I., et al.* Simulation of a cometary impact into lunar basalts: Chemical consequences // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXIII, Houston, 2002. Abstract #1276.
- Golubeva L.F., Shestopalov D.I.* Spectrometry of 4 Vesta near 505 nm pyroxene absorption band // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXVIII, Houston, 1997. Abstract #1685.
- Gradie J.C., Tedesco E.F.* Compositional structure of the asteroid belt // Science. 1982. V. 216. P. 1405–1407.
- Hasegawa S., Murakawa K., Ishiguro M., et al.* Evidence of hydrated and/or hydroxylated minerals on the surface of asteroid 4 Vesta // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. P. 2123–2126.
- Hayes J.M.* Organic constituents of meteorites – A review // Geochim. et Cosmochim. Acta 1967. V. 31. P. 1395–1440.
- Hardorp J.* The Sun among the stars // Astron. and Astrophys. 1980. V. 91. P. 221–232.
- Hiroi T., Vilas F., Sunshine J.M.* Discovery and analysis of minor absorption bands in S-asteroid visible reflectance spectra // Icarus. 1996. V. 119. P. 202–208.
- Hsieh H.H., Jewitt D.* A population of comets in the main asteroid belt // Science. 2006. V. 312. P. 561–563.
- Ivanov B.A., Neukum G., Wagner R.* Impact craters, NEA and main belt asteroids: Size frequency distribution // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXX. 1999. Houston. Abstract # 1583.
- Jarosewich E.* Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses // Meteoritics. 1990. V. 25. P. 323–337.
- Kevin R., Drake M.* A magma ocean on Vesta: Core formation and petrogenesis of eucrites and diogenites // Meteorit. and Planet. Sci. 1997. V. 32. P. 929–944.
- Lazzarin M., Marchi S., Magrin S., Barbieri C.* Visible spectral properties of asteroid 21 Lutetia, target of Rosetta Mission // Astron. and Astrophys. 2004. V. 425. P. L25–L28.
- Loeffler B.M., Burns R.G., Tossel J.A., et al.* Charge transfer in lunar materials: Interpretation of ultraviolet-visible spectral properties of the Moon // Proc. Fifth Lunar Conf. (Suppl. 4. Geochim. et Cosmochim. Acta). 1974. V. 3. P. 3007–3016.
- Magni G., Coradini A.* Formation of Jupiter by nucleated instability // Planet. and Space Sci. 2004. V. 52. P. 343–360.
- McCord T.B., Adams J.B., Johnson T.V.* Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications // Science. 1970. V. 168. P. 1445–1447.
- McCadden L.A., McCord T.B., Pieters C.* Vesta: The first pyroxene band from new spectroscopic measurements // Icarus. 1977. V. 31. P. 439–446.
- Michalowski T.* Pole and shape determination for 12 asteroids // Icarus. 1996. V. 123. P. 456–462.
- Nedelcu D.A., Birlan M., Vernazza P., et al.* Near infra-red spectroscopy of the asteroid 21 Lutetia II. Rotationally resolved spectroscopy of the surface // Astron. and Astrophys. 2007. V. 470. P. 1157–1164.
- O'Brien D.P., Morbidelli A., Bottke W.F.* The primordial excitation and clearing of the asteroid belt – Revisited // Icarus. 2007. V. 191. P. 434–452.
- Parker J.W., Stern S.A., Thomas P.C., et al.* Analysis of the first disk-resolved images of Ceres from ultraviolet observations with the Hubble Space Telescope // Astron. J. 2002. V. 123. P. 549–557.
- Petit J.-M., Morbidelli A., Chambers J.* The primordial excitation and clearing of the asteroid belt // Icarus. 2001. V. 153. P. 338–347.
- Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N., et al.* Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M³ on Chandrayaan-1 // Science. 2009. V. 326. P. 568.
- Rivkin A.S., Howell E.S., Lebofsky L.A., et al.* The nature of M-class asteroids from 3- μ m observations // Icarus. 2000. V. 145. P. 351–368.
- Rivkin A.S., Hiroi T., Horz F., et al.* Spectroscopy of impacted serpentinite: Implications for asteroid surfaces // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXIV. 2003. Abstract # 1716.
- Rivkin A.S., McFadden L.A., Binzel R.P., Sykes M.* Rotationally-resolved spectroscopy of Vesta I: 2–4 μ m region // Icarus. 2006. V. 180. P. 464–472.
- Schmedemann N., Neukum G., Denk T., Wagner R.* Impact crater size-frequency distribution (SFD) on Saturnian satellites and comparison with other solar-system bodies // 40th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2009. Abstract # 1941.
- Starukhina L.* Water detection on atmosphereless celestial bodies: Alternative explanations of the observations // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 14701–14710.
- Tedesco E.F., Noah P.V., Noah M., Price S.D.* IRAS minor planet survey V6.0 // NASA Planetary Data System, IRAS-A-FPA-3-RDR-IMPS-V6.0. 2004.
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomy: From cluster analysis to photometry // Ph. D. Thesis. The Univ. Arizona, 1984. 150 p.
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomic classifications // Asteroids II / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Thomas P.C., Binzel R.P., Gaffey M.J., et al.* Vesta: Spin pole, size, and shape from HST images // Icarus. 1997. V. 128. P. 88–94.
- Wagner J.K., Hapke B.W., Wells E.N.* Atlas of reflectance spectra of terrestrial, lunar, and meteoritic powders and frosts from 92 to 1800 nm // Icarus. 1987. V. 69. P. 14–28.
- Zellner B., Tholen D.J., Tedesco E.F.* The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets // Icarus. 1985. V. 61. P. 355–416.
- Zolensky M., Ivanov A.* The Kaidun microbreccia meteorite: A harvest from the inner and outer asteroid belt // Chem. Erde. Geochemistry. 2003. V. 63. P. 185–246.