

УДК 520.84:523.45-87+523.44

НОВЫЕ СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ 40 АСТЕРОИДОВ: СРАВНЕНИЕ С ПРЕДШЕСТВУЮЩИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ*

© 2016 г. В. В. Бусарев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Москва, Россия
e-mail: busarev@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 22.04.2014 г. После исправления 28.05.15 г.

В статье представлены и обсуждаются избранные спектры отражения 40 астероидов Главного пояса, полученные автором в Крымской лаборатории ГАИШ МГУ в 2003–2009 гг. Целью работы является поиск новых спектральных особенностей астероидов, характеризующих состав их вещества. При сравнении полученных результатов с более ранними данными сделан вывод о значительных неоднородностях в распределении химико-минералогического состава поверхностного вещества у ряда малых планет (10 Гигии, 13 Эгерии, 14 Ирены, 21 Лютетии, 45 Евгении, 51 Немаузы, 55 Пандоры, 64 Ангелины, 69 Гесперии, 80 Сафо, 83 Беатрисы, 92 Ундины, 129 Антигоны, 135 Герты и 785 Зветаны), проявляющихся при разных фазах вращения. На абсолютном большинстве рассматриваемых астероидов высокотемпературных типов обнаружены спектральные признаки наличия нетипичного гидратированного и/или углисто-хондритового вещества (в виде примеси или отдельных образований), связанные, вероятно, с особенностями формирования этих тел и последующими динамическими и ударными процессами, приведшими, в частности, к доставке нетипичных материалов. Как показывают исследования 4 Весты с КА Dawn (NASA), на астероидах подобных типов возможно образование собственной генерации филлосиликатов при захоронении в их поверхностном веществе ледяных или гидратированных фрагментов падающих тел.

Впервые на 10 Гигии, 21 Лютетии и, возможно, 4 Весте при малых фазовых углах $\leq 4^\circ$ зарегистрирован фазо-спектральный эффект (ЭФС), выражающийся в росте спектрального коэффициента яркости в видимом диапазоне с уменьшением длины волны. Этот эффект был обнаружен в спектре отражения углистого вещества CM2 при фазовом угле 10° и отсутствовал при его больших значениях (Cloutis и др., 2011a). Форма спектров отражения Гигии при малых фазовых углах, по-видимому, полностью контролируется ЭФС на большей части ее периода вращения, что может указывать на углисто-хондритовый состав, преобладающий на поверхности астероида. Проявлением ЭФС в спектрах отражения 4 Весты может быть их плоская или слегка вогнутая форма при некоторых фазах вращения астероида, вызываемая, вероятно, повышенным количеством пятен темного вещества в некоторых частях его поверхности.

Ключевые слова: спектрофотометрия астероидов, минералогия, неоднородности поверхностного вещества, фазо-спектральный эффект.

DOI: 10.7868/S0320930X16010011

ВВЕДЕНИЕ

Измерения спектров диффузного отражения порошков кристаллических природных материалов или спектров пропускания их тонких пластинок с толщиной от десятков микрон до $\sim 1\text{--}2$ мм (в зависимости от прозрачности образца) позволяют установить элементный, а в некоторых случаях и минеральный состав. Он определяется по характерным полосам поглощения входящих в вещество переходных металлов. Такие металлы (Fe, Cr, Ti и др.) имеют специфические полосы поглощения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах

благодаря наличию частично заполненной внешней электронной $3d^N$ -оболочки (см., например, Adams, 1975; Платонов, 1976; Burns, 1993). Общая форма спектра отражения всех силикатных соединений в видимом диапазоне определяется двумя наиболее сильными полосами поглощения ионов железа. Первая из них (с центром у 200 нм) вызывается переносом заряда “лиганд-металл” (лиганды — это нейтральные молекулы, ионы или радикалы, связанные с центральным атомом комплексного соединения) (см., например, Loeffler и др., 1974). Вторая (вблизи 1000 нм) порождается разрешенными по спину электронными переходами в Fe^{2+} в кристаллическом поле таких основных породообразующих минералов, как оливин (у 1010 нм), ортопирок-

* Полная версия статьи опубликована на сайте ГАИШ МГУ: http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf.

сен (у 900 нм) и клинопироксен (у 1000 нм) (Платонов, 1976; Burns, 1993). Дополнительными индикаторами этих минералов в твердых телах могут быть более слабые полосы поглощения с центрами у 506 нм (пироксен) и у 500 нм (оливин), возникающие при запрещенных по спине электронных переходах в Fe^{2+} в кристаллическом поле (Платонов, 1976; Хоменко, Платонов, 1987). Как показали теоретические и экспериментальные исследования, более интенсивная ультрафиолетовая полоса зависит от степени окисления силикатного вещества, а ее длинноволновое крыло определяет наклон и форму спектра отражения твердого тела во всем видимом диапазоне (см., например, Loeffler и др., 1974; Burns, 1993). Нами было показано, что индикатором Fe^{3+} в низкожелезистых серпентинах является полоса поглощения у 0,44 мкм, относительная интенсивность которой может достигать 25% (Busarev и др., 2004; 2008). Достаточно сильными могут быть и полосы поглощения переноса заряда между соседними катионами переходных металлов. Например, в Fe-содержащих серпентинах это полосы $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ у 500–700 нм и 700–900 нм или во всем диапазоне 500–1000 нм (Calvin, King, 1997). Их параметры зависят от взаимного расположения катионов в кристаллической структуре минералов, но общей отличительной особенностью является значительная ширина, составляющая десятки нанометров и более (см., например, Платонов, 1976; Бахтин, 1985). Сравнительно недавно были обнаружены и частично изучены весьма интенсивные полосы поглощения магнитно взаимодействующих обменно-связанных пар катионов одного и того же металла с одинаковой или разной валентностью, находящихся в соседних кристаллографических позициях. На примере Fe^{3+} -содержащих сапфиров, гидратированных сульфатов и турмалинов (Ferguson, Fielding, 1971; Rossman, 1975; Mattson, Rossman, 1984; Taran, Rossman, 2002) было показано, что положение таких полос (у 440, 490, 800–900 и 1100 нм) совпадает с запрещенными по спине слабыми полосами Fe^{3+} кристаллического поля, а их интенсивность может превосходить последние по интенсивности на 2 порядка.

Аналогичная методика используется в дистанционных исследованиях астероидов и других твердых безатмосферных небесных тел на основе получения их спектров диффузного отражения. Она подробно изложена в ряде предшествующих публикаций (см., например, Бусарев, 1999). Ниже представлены избранные спектры отражения 40 астероидов Главного пояса, их краткое обсуждение и сравнение с результатами других авторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АСТЕРОИДОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемые спектры получены в разное время в 2003–2009 гг. на 1.25-м телескопе Крымской обсерватории со спектрографом и ПЗС-камерой (SBIG ST-6) в диапазоне 0.40–0.92 мкм с разрешением $\sim 8 \text{ \AA}$. Эфемериды астероидов и другие их параметры на моменты наблюдений, а также погрешности измерений перечислены в табл. 1 полной версии статьи, представленной на сайте ГАИШ МГУ (http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

Регистрация каждого спектра объекта в рабочем диапазоне проводилась последовательно в двух интервалах длин волн (0.40–0.67 и 0.65–0.92 мкм, или наоборот) и занимала от 10–15 минут до полутора часов в зависимости от яркости объекта. Первоначальная обработка наблюдательных данных выполнялась с использованием стандартного пакета программ для ПЗС-камеры SBIG ST-6. Привязка и расчет шкалы длин волн осуществлялись по барьеровским линиям водорода в спектрах первичного стандарта α Луг. Последующие операции, связанные с расчетом спектров отражения астероидов, их сглаживанием и другими преобразованиями, проводились с помощью стандартных программ “Excel” и “Origin”. Вместе с астероидами наблюдались стандартные звезды, являющиеся одновременно и аналогами Солнца по спектрофотометрическим параметрам (16 Cyg B, HD 117176 и HD10307) (Hardorp, 1980; Cayrel de Strobel, 1996). Эти звезды использовались также и для определения функции спектральной прозрачности земной атмосферы на каждую наблюдательную ночь. Расчет спектров отражения астероидов выполнялся по стандартной формуле (Бусарев, 1999). Полученные спектры отражения сглаживались методом “бегущего среднего” по 5 точкам во всем диапазоне для устранения высокочастотной шумовой компоненты. Вблизи границ спектрального диапазона (в пределах примерно 500 \AA), а также в области остаточных теллурических полос выполнялась полиномиальная экстраполяция или аппроксимация спектрального континуума. После этого спектр отражения каждого астероида был нормирован на значение отражательной способности на длине волны 0.55 мкм. В среднем относительные среднеквадратические ошибки спектров отражения в центральной части видимого диапазона составляют 1–2% и возрастают до 5–7% вблизи границ используемого спектрального диапазона. При обсуждении каждого астероида после его названия в скобках приведены следующие основные параметры: период вращения (Батраков и др., 2009), средние значения геометрического альбеда (p_v) и диаметра (D), вычисленные по “стандартной” тепловой модели (Lebofsky и др., 1986) по данным

ИСЗ IRAS (Tedesco и др., 2004), а также установленные спектральные типы астероидов (Sp) согласно таксономическим классификациям Толена (Tholen, 1989), Бас (Bus, Binzel, 2002a; 2002b) и/или Бас-ДеМео (DeMeo и др., 2009), соответственно. Параметры Метиды и Ангелины были измерены только в 1996 г., в эксперименте MSX (Tedesco и др., 2002). При рассмотрении спектров отражения астероидов проводится их сравнение с имеющимися в литературе результатами других авторов (Chapman и др., 1973; Bus, Binzel, 2002a; Lazzaro и др., 2004; Fornasier и др., 2008; 2010; 2011; 2014). Но данные Bus и Binzel (2002a), Lazzaro и др. (2004) и Fornasier и др. (2014) имеют ограничения в области 0.40–0.50 мкм. Кроме того, в упомянутых работах используются разные способы усреднения полученных спектров отражения астероидов.

1 Церера. Это крупнейший астероид ($T_{\text{вр}} = 9.1074$; $p_v = 0.113$; $D = 848.4$ км; Sp = G, C, C) и одна из карликовых планет (с 2006 г.) согласно классификации МАС. При наблюдениях Цереры с телескопом ИСЗ Hubble Space Telescope (HST) были уточнены значения среднего геометрического альбеда (0.090 согласно Li и др., 2006) и диаметра (974.6×909.4 км согласно Thomas и др., 2005). Полученные нами спектры отражения Цереры в целом соответствуют ее углисто-хондритовому составу (рис. 1) и согласуются со спектрами, полученными другими авторами (рис. 1, вставки “А”, “В” и “С” согласно Bus, Binzel (2002a), Lazzaro и др. (2004) и Chapman и др. (1973), соответственно). Но мы впервые отмечаем, что в видимом диапазоне для некоторых частей поверхности Цереры характерна слегка выпуклая форма спектра отражения (рис. 1, спектры 1 и 2), а для некоторых – вогнутая форма (рис. 1, спектры 3 и 4). Последнее подтверждается спектром Chapman и др. (1973) (вставка “С”). Пары спектров 1–2 и 3–4 (рис. 1) получены при относительных фазах вращения (ФВ), соответствующих диаметрально противоположным сторонам астероида. За нулевую условно принята ФВ первого по времени спектра. Изменение формы спектра отражения Цереры с вращением, вероятно, указывает на разную степень гидратации (или окисления) поверхностного вещества, влияющую на интенсивность наиболее широких интервалентных полос поглощения $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ в видимом диапазоне. В недавней работе (Perna и др., 2015) сообщается о наличии у Цереры слабой полосы поглощения с центром у 0.67 мкм, отчетливо видной на полученном нами спектре 3 (рис. 1). В настоящее время осуществляется изучение Цереры с помощью КА Dawn (NASA). Одним из его первых результатов стало обнаружение заметных цветовых различий на всей поверхности астероида, указывающих на неоднородный состав вещества (<http://www.nasa.gov/jpl/pia19063/dawns-first-color-map-of-ceres/>).

2 Паллада (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

4 Веста. Астероид Веста ($T_{\text{вр}} = 5.1342$; $p_v = 0.423$; $D = 468.3$ км; Sp = V, V, V) является третьим по величине и самым ярким астероидом, так как его геометрическое альbedo в 3–4 раза больше, чем у превышающих его по размеру Цереры и Паллады. С помощью ИСЗ HST было уточнено среднее значение диаметра Весты – 530 км (Thomas и др., 1997). Полученные спектры отражения Весты представлены на рис. 2. Самой заметной спектральной деталью на спектрах является коротковолновое крыло полосы поглощения ортопироксенов у 0.90 мкм, вызываемой разрешенными по спину электронными переходами в ионах Fe^{2+} в позиции M2 (см., например, Платонов, 1976). Такая интерпретация согласуется с наличием слабой пироксеновой полосы поглощения у 0.51 мкм, вызываемой запрещенными по спину электронными переходами в ионах Fe^{2+} (см., например, Платонов, 1976). Высокая интенсивность полосы поглощения у 0.90 мкм на спектрах отражения Весты показывает, что преобладающий минеральный состав ее поверхности высокотемпературный (базальтовый), в котором преобладает ортопироксен. В то же время, на спектрах имеется слабая полоса поглощения Fe^{3+} у 0.43–0.45 мкм (~5–7%), которую можно связать с наличием в поверхностном веществе примеси гидросиликатов типа серпентина. В интервале 0.40–0.65 мкм есть также различия в форме континуума (рис. 2), меняющейся от наклонной (кривая 1) до слегка вогнутой (кривые 2 и 3). Спектры отражения 1–2 и 3–4 получены при диаметрально противоположных ориентациях астероида. На последних заметны более резкий максимум у 0.73 мкм, смещенная к 0.44–0.45 мкм и слабая (~3–4%) полоса поглощения Fe^{3+} , а также слабая полоса пироксенов (Fe^{2+}) у 0.51 мкм. Общей особенностью спектров отражения 2 (ФВ = 0.133) и 4 (ФВ = 0.694) является их слегка вогнутая форма у 0.45–0.65 мкм, характерная для гидросиликатов и углистых хондритов CI-CM (см., например, Busarev, Taran, 2002; Cloutis и др., 2011a; 2011b). На рис. 2 на вставке “А” приведен спектр отражения Весты из обзора SMASS II (Bus, Binzel, 2002a), а на вставке “В” – спектр отражения астероида из более ранней работы (Chapman и др., 1973) (с плоской формой континуума у 0.55–0.70 мкм), которые согласуются с нашими спектрами.

Необходимо отметить, что Веста наблюдалась нами при малых световых фазовых углах (~4°). Поэтому вероятно, что в диапазоне 0.40–0.65 мкм на форму спектров отражения 2–4 (рис. 2) влияет эффект, который можно назвать фазо-спектральным (ЭФС), вызываемый наличием на поверхности астероида множества пятен темного вещества, обнаруженных с КА Dawn (см., например, McCord и др., 2012). ЭФС был обнаружен в ходе ла-

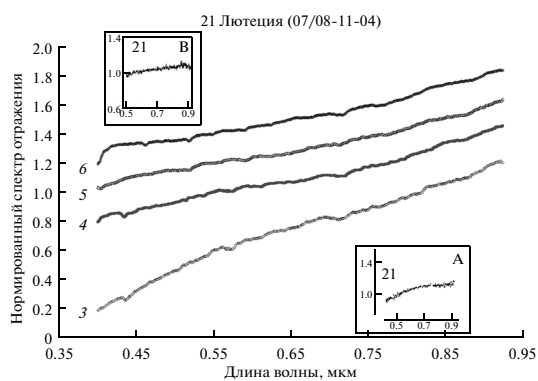
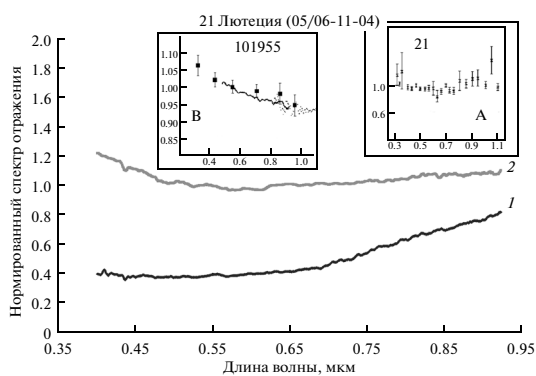
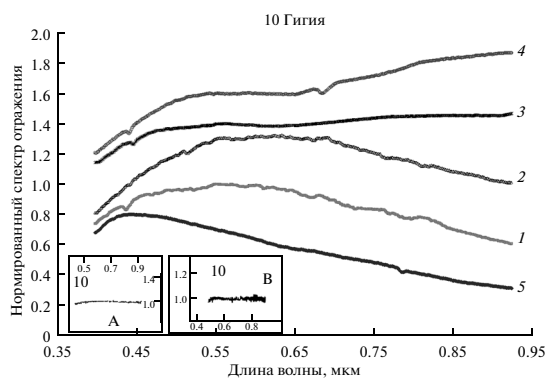
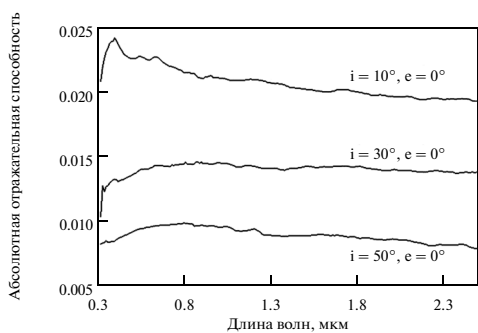
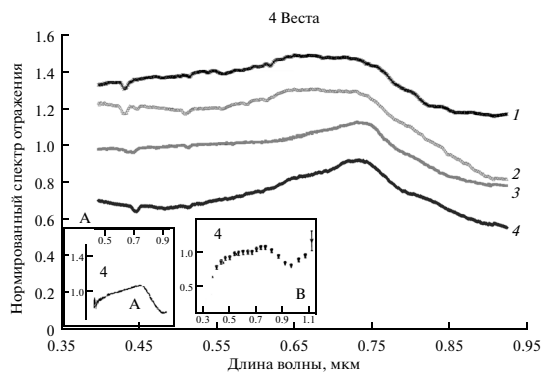
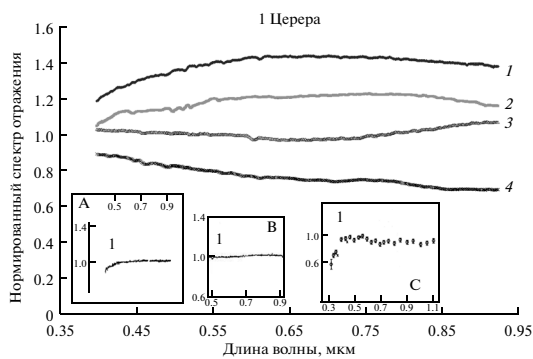


Рис. 1–8. Избранные спектры отражения наблюдавшихся нами астероидов, нормированные (на $\lambda = 0.5503$ мкм) и произвольно смещенные вдоль вертикальной оси для удобства сравнения, а также аналогичные данные других авторов (все спектры отражения и соответствующие наблюдательные параметры рассматриваемых астероидов приведены в полной версии статьи на сайте ГАИШ МГУ http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf):

- (1) Спектры отражения 1 Цереры (пары спектров 1–2 и 3–4 соответствуют диаметрально противоположным сторонам астероида); на вставках приведены спектры отражения Цереры, полученные в обзоре SMASS II (Bus, Binzel, 2002a) (“А”), в обзоре S³OS² (Lazzaro и др., 2004) (“В”) и Charman и др. (1973) (“С”);
- (2) спектры отражения 4 Весты, полученные при фазовом угле $\sim 4^\circ$ (пары спектров 1–2 и 3–4 соответствуют диаметрально противоположным сторонам астероида); на вставке “А” приведен спектр отражения Весты из обзора SMASS II (Bus, Binzel, 2002a), а на вставке “В” – спектр отражения астероида, полученный в работе Charman и др. (1973);
- (3) лабораторные спектры отражения кислотно-нерастворимых составляющих метеорита Murchison (CM2) при разных фазовых углах (i – угол падения света по отношению к нормали к плоскости образца, e – угол направления регистрации отраженного света, размер частиц – 55–63 мкм) (Cloutis и др., 2011a);
- (4) спектры отражения 10 Гигии, полученные при малых фазовых углах (0.9° – 2.6°) (спектры 1–2 и 5 зарегистрированы при диаметрально противоположных ориентациях астероида); на вставках “А” и “В” приведены спектры отражения Гигии из работ Bus, Binzel (2002a) и Fornasier и др. (2014), соответственно;
- (5а и 5б) спектры отражения 21 Лютееции, полученные при малых фазовых углах (2.5° – 3.3°); на рис. 5а на вставке “А” представлен спектр отражения Лютееции из работы Charman и др. (1973), а на вставке “В” – спектры отражения астероида В-типа 101955 Бенну (Hergenrother и др., 2013) по данным спектрометрии (Clark и др., 2011) (маленькие точки, которые на длинах волн короче 0.9 мкм сливаются в сплошную линию) и ECAS-фотометрии (Hergenrother и др., 2013) (квадраты); на рис. 5б на вставках “А” и “В” приведены спектры отражения Лютееции из обзоров SMASS II (Bus, Binzel, 2002a) и S³OS² (Lazzaro и др., 2004), соответственно;
- (6) спектры отражения 64 Ангелины; для сравнения на вставке “А” приведен спектр отражения Ангелины, полученный в обзоре SMASS II (Bus, Binzel, 2002a), а на вставке “В” – ее спектр отражения из работы Fornasier и др. (2008);
- (7) спектры отражения 129 Антигоны; на вставке “А” – спектр отражения Антигоны из работы Fornasier и др. (2010); спектр отражения Антигоны из обзора SMASS II (Bus, Binzel, 2002a) приведен на вставке “В”;
- (8) спектры отражения 785 Зветаны; на вставках изображены спектры отражения Зветаны из работ Bus, Binzel (2002a) (вставка “А”) и Fornasier и др. (2010) (вставка “В”).

бораторных измерений спектров отражения кислотно-нерастворимых составляющих матрицы метеорита углисто-хондритового состава Murchison (CM2) при малых фазовых углах ($\leq 10^\circ$) и выражается в необычной форме спектра отражения с отрицательным градиентом во всем видимом диапазоне (рис. 3) (Cloutis и др., 2011a). Механизм возникновения ЭФС пока не изучен теоретически (см., например, Петрова, Тишковец, 2011), но можно предполагать, что он связан с особенностями опозиционного эффекта в темноцветных материалах.

Полученные нами спектральные характеристики Весты полностью подтвердились при ее детальных космических исследованиях с КА Dawn (NASA) в 2011 г. и могут быть интерпретированы следующим образом. Несмотря на высокотемпературную магматическую природу Весты, на ее поверхности преимущественно базальтового состава имеется множество темных пятен и гидратированных образований (McCord и др., 2012; De Sanctis и др., 2012), возникших, вероятно, при падениях примитивных (углисто-хондритовых и ледяных) тел. Оказалось, что темное вещество на Весте по спектральным характеристикам в среднем соответствует минеральной смеси 80 вес. % пироксена (эвкрита) и 20 вес. % углистого хондрита группы CM2 (Reddy и др., 2012). Более ранним указанием на присутствие углисто-хондритового вещества на Весте стало обнаружение включений такого материала в HED-метеоритах –

вероятных фрагментах Весты (Duke, Silver, 1967; Drake, 1979; Zolensky и др., 1996).

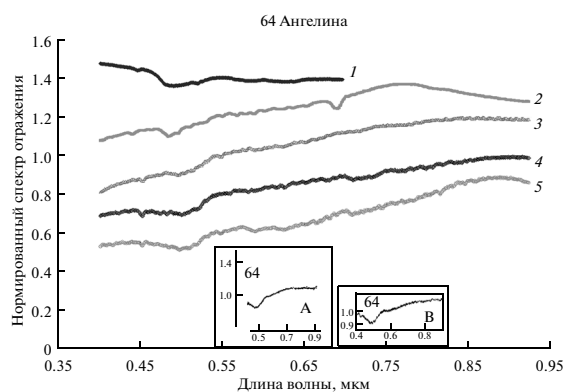
6 Геба (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

7 Ирида (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

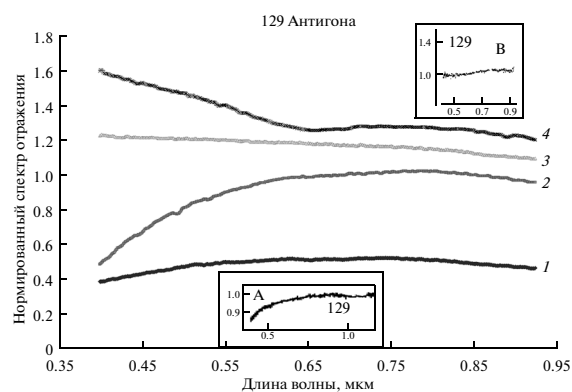
8 Флора (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

9 Метид (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

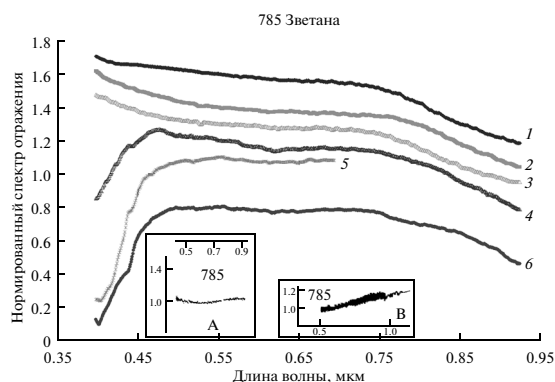
10 Гигия. Как известно, 10 Гигия ($T_{\text{вр}} = 27.623$; $p_v = 0.072$; $D = 407.1$ км; Sp = C, C, C) – это крупнейший астероид С-типа. Два его спектра отражения (рис. 4, кривые 1 и 2, $\Phi В = 0.00$ – 0.21) были получены нами с малой разницей времени (около полутора часов), поэтому обнаруженные на них различия находятся в пределах ошибок. Но форма этих спектров отражения не согласуется с таксономическим (спектральным) типом Гигии, которому соответствует низкотемпературная минералогия (см., например, Gaffey и др., 1989). По этим данным мы ранее предполагали, что возможным объяснением изменений формы спектра отражения Гигии с вращением является локальная дегидратация ее поверхностного вещества вследствие крупных ударных событий (Бусарев, 2011). Спектры 3 и 4 (рис. 4) были зарегистрированы также с небольшой разницей времени (около часа) при $\Phi В = 0.34$ – 0.38 . Они согласуются с установленным спектральным типом и подтверждаются спектрами, полученными другими авторами,



(6)



(7)



(8)

Рис. 1–8. Окончание.

приведенных на вставках “А” (Bus, Binzel, 2002a) и “В” (Fornasier и др., 2014) на рис. 4. На спектрах 3 и 4 слабая полоса поглощения у 0.44–0.45 мкм (Fe^{3+}) (Busarev и др., 2008) подтверждает низкотемпературную минералогию вещества астероида. На спектре 4 (рис. 4) у 0.68 мкм можно видеть остаточную теллурическую полосу “В” O_2 (Kucisz, 2005). Последний спектр отражения Гигии (рис. 4, кривая 5), относится к противоположной стороне астероида ($\Phi\text{В} = 0.56$). Он имеет отрицательный градиент во всем видимом диапазоне (как у астероидов В-типа) и резко отличается от спектров Гигии, зарегистрированных при других $\Phi\text{В}$. Но он получен при предельно малом фазовом угле астероида – всего 0.9° . Следует отметить, что все представленные на рис. 4 спектры отражения Гигии соответствующую ее малым фазовым углам: 3 и 4 – $\phi = 2.6^\circ$, 1 и 2 – $\phi = 1.7^\circ$, 5 – $\phi = 0.9^\circ$. Они пронумерованы в хронологическом порядке, а расположены на рис. 4 (снизу вверх) в порядке возрастания фазового угла. Видно, что в такой же

последовательности происходит постепенное изменение формы спектра отражения астероида. Различие в величине градиента лабораторного спектра отражения углистого хондрита CI $\sim 12\%$ (рис. 3, верхняя кривая, $\phi = 10^\circ$) (согласно Cloutis и др., 2011a) и спектра отражения Гигии $\sim 50\%$ (рис. 4, кривая 5, $\phi = 0.9^\circ$) в диапазоне 0.45–0.80 мкм, вероятно, объясняется значительной разницей в фазовых углах. Таким образом, мы получили наблюдательные подтверждения того, что форма спектров отражения Гигии при малых фазовых углах определяется действием ЭФС. Кроме того, поскольку все спектры отражения Гигии получены при малых фазовых углах и разных фазах вращения, можно предполагать, что большая часть ее поверхности имеет углисто-хондритовый состав. Это означает, что ЭФС может быть использован как новый индикатор подобного вещества на твердых небесных телах.

11 Партенопа (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

12 Виктория (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

13 Эгерия (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

14 Ирена (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

16 Психея (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

18 Мельпомена (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

21 Лютеция. Спектры отражения Лютеции ($T_{\text{вр}} = 8.166$; $p_v = 0.221$; $D = 95.8$ км; Sp = M, Xk, Xc) 1–6 (рис. 5а, 5б), представлены в хронологической последовательности и охватывают весь период ее вращения. Они свидетельствуют о значительной переменности спектральных характеристик этого астероида (от M–S до F–V-типов) и, вероятно, состава его вещества от высокотемпературного (оливин-пироксенового) и/или включающего металлическое железо до углисто-хондритового. По данным некоторых авторов (Oskert–Bell и др., 2010), в усредненном на периоде вращения спектре отражения Лютеции в диапазоне 0.40–2.4 мкм, отсутствуют полосы поглощения высокотемпературных минералов у 0.9 и 1.9 мкм и он имеет выпуклую форму. Но с этим не согласуются спектры отражения 1 и 2 (рис. 5а), полученные нами при близких значениях ФВ (0.000–0.025) Лютеции. Они имеют форму от плоской до вогнутой с отрицательным градиентом в синей части, характерную для примитивных F–V-астероидов. Как уже отмечалось (Бусарев, 2010), такая форма спектров отражения свойственна обогащенным гидросиликатами углистым хондритам по причине поглощения света при переносе заряда $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ в кристаллической структуре. Еще одним индикатором присутствия Fe^{3+} является слабая полоса поглощения у 0.43–0.45 мкм (рис. 5а) (Busarev и др., 2008). Достоверность таких спектральных особенностей Лютеции подтверждается предшествующими данными (Charman и др., 1973) (рис. 5а, вставка “А”). На том же рисунке на вставке “В” для сравнения помещен спектр отражения астероида V-типа 101955 Бенну (Hergenther и др., 2013), который доказывает реальность существования подобных спектральных характеристик у астероидов. Экспериментальное моделирование показало, что такие свойства имеет раздробленное вещество (с размером частиц <125 мкм) метеорита Ивуна (Ivuna) (C1), нагретое до 700°C (Clark и др., 2011; Cloutis и др., 2011а). Возможно, что форма спектров отражения Лютеции 1 и 2 (рис. 5а) подвержена влиянию ЭФС, поскольку они были получены при фазовом угле 2.5°. Кроме того, спектры 1 и 2, вероятно, соответствуют части астероида, покрытой углисто-хондритовым и/или гидратированным веществом, что подтверждается обнаруженными спектральными дета-

лями. Хотя все спектры отражения Лютеции (1–6) получены нами при малых фазовых углах (2.5°–3.3°), но признаки ЭФС имеются только на спектрах 1 и 2 (рис. 5а). Существенно другая форма (со значительным положительным градиентом) у спектров отражения Лютеции 3–6 (рис. 5б), соответствующих ее диаметрально противоположной стороне (ФВ = 0.545–0.585). Эти спектры по форме близки спектрам отражения астероидов S-типа, хотя в них отсутствуют признаки пироксен-оливиновой полосы поглощения у 0.9 мкм. Учитывая достаточно высокое значение геометрического альbedo Лютеции (0.22), можно предполагать, что преобладающий состав ее вещества высокотемпературный. Но общими деталями на этих спектрах являются слабые полосы поглощения у 0.43–0.45 мкм (Fe^{3+}) и 0.52 (Fe^{2+}) мкм, а также полоса поглощения у 0.71–0.72 мкм ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$?), которые могут быть признаками примеси в поверхностном веществе гидратированных или окисленных соединений. Спектры отражения 3–6 согласуются со спектрами Лютеции из других работ, приведенных на вставках “А” (Bus, Binzel, 2002а) и “В” (Lazzaro и др., 2004) (рис. 5б). Значительные вариации формы и наклона спектра отражения Лютеции с вращением в диапазоне 0.53–0.80 мкм, соответствующие C–X-типам, были установлены также итальянскими и французскими специалистами (Lazzarin и др., 2010). Кроме того, наличие воды в связанном состоянии на поверхности Лютеции было установлено по полосе поглощения у 3 мкм в ее спектре отражения (Rivkin и др., 2000).

23 Талия (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

29 Амфитрита (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

43 Ариадна (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

45 Евгения (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

51 Немауза (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

55 Пандора (описание см. в http://selena.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

64 Ангелина. Полученные в течение двух ночей спектры отражения Ангелины ($T_{\text{вр}} = 8.1752$; $p_v = 0.405$; $D = 61.4$ км; Sp = E, Xe, Xe) (рис. 6) охватывают примерно четверть периода ее вращения и соответствуют ее классификации. На них имеются слабые полосы поглощения в коротковолновой области и более интенсивная у 0.49 мкм, а также эпизодические полосы у 0.60 мкм и вблизи 0.75 мкм (рис. 6). Для астероидов указанных типов свойственно преобладание в веществе высокотемпературного минерала энстатита (безжелезистого магнезиального пироксена) (см., например, Gaffey и др., 1989). Изучение минеральных аналогов позволило более точно классифициро-

вать Ангелину как астероид E(II)-подтипа, особенностью которого является наличие в спектре отражения заметной полосы поглощения у 0.49 мкм (благодаря небольшому количеству Fe^{2+}), типичной для минерала ольдгамита или сульфида кальция (CaS) (Gaffey, Kelley, 2004). Эта полоса присутствует на всех полученных нами спектрах отражения Ангелины, а также на ее спектрах других авторов, приведенных на вставках “А” (Bus, Binzel, 2002a) и “В” (Fornasier и др., 2008) (рис. 6). Следует отметить и наличие на наших спектрах Ангелины слабых полос поглощения у 0.43–0.45 мкм (рис. 6). Авторы упомянутой публикации (Fornasier и др., 2008) говорят о высокой неоднородности вещества Ангелины, но ничем это не аргументируют. Переменность спектральных и, соответственно, минералогических свойств поверхности Ангелины иллюстрируется нашими спектрами 1 и 2 с противоположными по знаку градиентами на длинах волн короче 0.75 мкм. Более того, по данным в области 3 мкм на Ангелине обнаружены гидросиликаты (Rivkin и др., 1995). Это подтверждается типичной для гидросиликатов слегка вогнутой формой спектров в интервале 0.55–0.75 мкм ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+?}$) (кривые 1 и 5), а также слабыми полосами у 0.43–0.45 мкм (Fe^{3+}) на всех спектрах (рис. 6). Интересно также то что, хотя Ангелина считается астероидом высокотемпературного типа (см., например, Gaffey, Kelley, 2004), ее радарное альbedo в 2.5 раза ниже, чем у 69 Гесперия — астероида с преобладающим металлическим составом вещества (Shepard и др., 2010; 2011).

67 Азия (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

69 Гесперия (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

80 Сафо (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

83 Беатриса (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

92 Ундина (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

115 Фира (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

129 Антигона. Такое же, как у Фиры, высокое значение геометрического альbedo и еще более короткий период вращения согласуются с установленными спектральными классами Антигоны ($T_{вр} = 4.19572$; $p_v = 0.275$; $D = 79.8$ км; $Sp = M, X$), как тела с преимущественно высокотемпературным составом вещества. Но полученные нами в широком диапазоне ФВ спектры отражения Антигоны (рис. 7) демонстрируют большое разнообразие форм — от выпуклых, как у Fornasier и др. (2010) (вставка “А”, рис. 11), до слегка вогнутых, как в обзоре SMASS II (Bus, Binzel, 2002a) (вставка “А”, рис. 7). Признаками оливина могут быть слабая полоса поглощения у 0.50 мкм (Fe^{2+} или

$Fe^{3+?}$) на спектре 2 (рис. 7) и коротковолновое крыло полосы поглощения у 1.0 мкм (рис. 7). А на примесь гидратированного в веществе указывают слабые детали у 0.43–0.45 мкм (Fe^{3+}) (спектры 2 и 4) и более сильная полоса поглощения у 0.65 мкм ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+?}$) (спектр 4) при общем отрицательном градиенте. Гидросиликаты на Антигоне были найдены и при ее ИК-наблюдениях у 3 мкм (Rivkin и др., 2000).

135 Герта (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

141 Лумен (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

196 Филомела (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

198 Амелла (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

230 Атамантис (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

250 Беттина (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

264 Либусса (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

349 Дембовска (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

532 Геркулина (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

584 Семирамида (описание см. в http://sele-na.sai.msu.ru/Bus/Publications/AB-15-1_Bus.pdf).

785 Зветана. Полученные спектры отражения Зветаны ($T_{вр} = 8.18882$; $p_v = 0.125$; $D = 48.5$ км; $Sp = M, Cb, Cb$) (рис. 8) не соответствуют ее установленному спектральному типу “М”, если исходить из его формы, определенной в классификации Толена (Tholen, Varucci, 1989). В последних классификациях (Bus, Binzel, 2002b; DeMeo и др., 2009) Зветана отнесена к примитивному Cb-классу. Спектры отражения Зветаны 1–3 (рис. 8) имеют отрицательный градиент во всем видимом и ближнем ИК-диапазонах. А спектры 4 и 6 (рис. 8), полученные почти при ее диаметрально противоположной ориентации, имеют отрицательный градиент на длинах волн короче 0.75 мкм. Присутствие окисленных и/или гидратированных соединений подтверждается наличием на спектрах 4–6 более слабой, но широкой, полосы поглощения с центром у 0.62 мкм и слабой полосы поглощения у 0.44 мкм (Fe^{3+}). Переменность состава вещества Зветаны подтверждается различиями ее спектров отражения по другим данным, которые представлены на вставках “А” (Bus, Binzel, 2002a) и “В” (Fornasier и др., 2010) (рис. 8).

ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

Сравнение полученных нами спектральных характеристик астероидов с результатами других авторов показывает, что основной причиной обнаруженных различий могут быть неоднородности химико-минерального состава поверхностного вещества этих тел. Эти различия проявляют себя, как правило, при несовпадении фаз вращения и аспектных углов одних и тех же объектов, наблюдаемых в разное время. Кроме того, необходимо учитывать общую специфику наземных наблюдательных данных астероидов. При наземных наблюдениях все астероиды выглядят как точечные объекты, а их измеряемые параметры усредняются по всей видимой части поверхности. В частности, какие-либо отклонения в составе вещества астероида могут быть обнаружены при его вращении по изменениям нормированного спектра отражения. Но, как известно по переменности блеска астероидов и по их космическим снимкам, абсолютное большинство этих тел имеет неправильную форму, которую можно аппроксимировать сложным многогранником. Это означает, что у астероида с неоднородным составом поверхности и достаточно быстрым вращением вероятны значительные вариации в спектрах отражения даже при небольшой разнице ФВ. Такие изменения могут вызываться как бы “перескоком” луча зрения с одной “границы” астероида на другую, отличающуюся по составу вещества. Кроме того, как следует из опыта, спектральные флуктуации иногда возникают в земной атмосфере даже при ясном небе, особенно при больших воздушных массах наблюдаемого объекта. Подобные вызывающие подозрения данные нами были исключены.

Таким образом, на основании критического рассмотрения представленных наблюдательных данных, полученных при разных фазах вращения астероидов, мы можем утверждать, что признаки значительной спектральной и, вероятно, химико-минералогической неоднородности поверхностного вещества зарегистрированы у 10 Гигии, 13 Эгерии, 14 Ирены, 21 Лютетии, 45 Евгении, 51 Немаузы, 55 Пандоры, 64 Ангелины, 69 Гесперии, 80 Сафо, 83 Беатрисы, 92 Ундины, 129 Антигоны, 135 Герты и 785 Зветаны.

Еще одним важным результатом является обнаружение спектральных признаков гидратированных силикатов и/или Fe^{3+} -содержащих окислов (гидроокислов) железа на абсолютном большинстве изученных нами астероидов высокотемпературных типов. Более ранние спектрофотометрические измерения показали, что поверхностное вещество многих астероидов высокотемпературных (S, M, E, V) типов включает Fe^{3+} -содержащие окисленные соединения и/или гидросиликаты (Rivkin и др., 1995; 2000; Бусарев, 2002). Если исходить из общепринятых представлений об асте-

роидах высокотемпературных (M, S, V, E, A, R) типов как о телах с преобладающей высокотемпературной минералогией (см., например, Bell и др., 1989; Gaffey и др., 1989), испытавших нагревание до температур $\sim 1000\text{--}1500^\circ\text{C}$ при формировании, то это представляется странным. Как известно из земной минералогии, большинство гидратированных силикатов, Fe^{3+} -содержащих окислов и гидроокислов полностью разрушаются при температурах $\sim 400\text{--}500^\circ\text{C}$ (см., например, Бетехтин, 1951; Коржинский, 1957). Какое-то количество Fe^{3+} могло остаться в веществе астероида в случае его недостаточно сильного или неравномерного нагревания в период первичной тепловой эволюции, энергетическим источником которой был распад короткоживущих изотопов (в основном ^{26}Al). Как показало моделирование (Grimm, McSween, 1993; McSween и др., 2002), вещество части родительских тел астероидов, особенно на периферии Главного пояса, могло включать водяной лед. Но в жестких космических условиях такие соединения не могут существовать на поверхности астероидов продолжительное время. При длительном и постоянном воздействии коротковолнового излучения и интенсивных корпускулярных и микрометеоритных потоков эти соединения должны переходить в более восстановленные формы. Кроме того, космическое созревание твердого вещества, вызванное теми же факторами, приводит к деградации кристаллической структуры и ее переходу в аморфную, не имеющую четких спектральных признаков. Неоднородность вещества астероидов может возникать, прежде всего, при ударных процессах вследствие только частичной его переработки при ударных событиях и переноса (Бусарев, 2002; 2011). При захоронении фрагментов падающих ледяных тел в поверхностном веществе астероидов высокотемпературных типов на них возможно образование собственной генерации гидросиликатов. Такое предположение подтверждается результатами детальных космических исследований 4 Весты с помощью КА Dawn (NASA). На ее поверхности с преобладающим базальтовым составом найдены многочисленные пятна гидросиликатов и более темные пятна углисто-хондритового состава (Reddy и др., 2012; De Sanctis и др., 2012), распределения которых совпадают только частично.

Как показали лабораторные измерения спектров отражения углисто-хондритового вещества группы CM2 (Cloutis и др., 2011a) при разных фазовых углах, форма спектра отражения таких материалов определяется не только составом вещества, гранулометрией, структурой и упаковкой частиц, но и эффектом, подобным оппозиционному, возникающим при фазовых углах $\leq 10^\circ$. Мы его назвали “эффект фазо-спектральный” (ЭФС). По-видимому, нам удалось зарегистрировать этот эффект на 10 Гигии, 21 Лютетии и, возможно, на 4 Весте.

Как было показано при обсуждении результатов, он выражается в резком изменении знака (с положительного на отрицательный) градиента континуума спектра отражения астероида в коротковолновой части спектра или во всем видимом диапазоне при малых фазовых углах. На Гигии (рис. 4) и Лютеции (рис. 5а) ЭФС обнаружен в достаточно отчетливой форме и, по-видимому, возникает при регистрации спектра отражения той части астероида, которая покрыта преимущественно углисто-хондритовым веществом. Тогда как в случае Весты признаком ЭФС может быть плоская или несколько вогнутая форма ее спектров отражения при некоторых ФВ (рис. 2), вызываемая, вероятно, повышенным количеством пятен темного материала на соответствующих частях поверхности. Очевидно, необходимы новые, более тщательные исследования ЭФС в лабораторных условиях. Если универсальность ЭФС будет доказана для всех или нескольких групп углистых хондритов, то он может быть использован как новый индикатор этого вещества на твердых небесных телах.

Автор выражает благодарность анонимным рецензентам за критическое рассмотрение и обсуждение представленных результатов, что способствовало значительному улучшению содержания статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батраков Ю.В. и др.* (ред.) Эфемериды малых планет на 2010 год. С.-Петербург: Наука, 2009. С. 246–250.
- Бахтин А.И.* Пороодообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Изд. Казанского ун-та, 1985, 192 с.
- Бетехтин А.Г.* Курс минералогии. М.: Гос. изд-во геолог. лит., 1951. 543 с.
- Бусарев В.В.* Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. С. 140–150. (*Busarev V.V.* Spectrophotometry of atmosphereless celestial bodies of the Solar System // *Sol. Sys. Res.* 1999. V. 33. P. 120–129.)
- 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. (*Busarev V.V.* Hydrated silicates on asteroids of M-, S-, and E-types as possible traces of collisions with bodies of the Jupiter growth zone // *Sol. Sys. Res.* 2002. V. 36. № 1. P. 39–47.)
- Бусарев В.В.* Спектральные исследования астероидов 21 Лютеция и 4 Веста как объектов космических миссий // *Астрон. вестн.* 2010. Т. 44. № 6. С. 539–551. (*Busarev V.V.* Spectral investigations of asteroids 21 Lutetia and 4 Vesta as objects of space missions // *Sol. Sys. Res.* 2010. V. 44. № 6. P. 507–519.)
- Бусарев В.В.* О неоднородности вещества астероидов 10 Гигии, 135 Герты и 196 Филомелы по спектрам отражения // *Астрон. вестн.* 2011. Т. 45. № 1. С. 45–54. (*Busarev V.V.* Asteroids 10 Hygiea, 135 Hertha, and 196 Philomela: Heterogeneity of the material from the reflectance spectra // *Sol. Sys. Res.* 2011. V. 45. № 1. P. 43–52.)
- Коржинский Д.С.* Физико-химические основы парагенезисов минералов. М.: Изд. АН СССР, 1957. 184 с.
- Платонов А.Н.* Природа окраски минералов. Киев: Наукова думка, 1976. 264 с.
- Петрова Е.В., Тишковец В.П.* Рассеяние света морфологически сложными объектами и оппозиционные эффекты (обзор) // *Астрон. вестн.* 2011. Т. 45. № 4. С. 315–333. (*Petrova E.V., Tishkovets V.P.* Light scattering by morphologically complex objects and opposition effects (a Review) // *Sol. Sys. Res.* 2011. V. 45. № 4. P. 304–322.)
- Хоменко В.М., Платонов А.Н.* Пороодообразующие пироксены: оптические спектры, окраска и плеохроизм. Киев: Наукова думка, 1987. 216 с.
- 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. New York: Acad. Press, 1975. P. 91–116.
- 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.
- Burns R.G.* Mineralogical applications of crystal field theory. New York: 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 feature-based taxonomy // *Icarus.* 2002b. V. 158. P. 146–177.
- Busarev V.V., Taran M.N.* On the spectral similarity of carbonaceous chondrites and some hydrated and oxidized asteroids // *Proc. "Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002)", Technical Univ. of Berlin (ESA-SP-500), Berlin, 2002.* P. 933–936.
- 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. 2004. P. 79–83.
- Busarev V.V., Volovetskij M.V., Taran M.N., Fel'dman V.I., Hiroi T., Krivokoneva G.K.* Results of reflectance spectral, Mössbauer, X-ray and electron microprobe investigations of terrestrial serpentine samples // *48th Vernadsky-Brown Microsymposium on Comparative Planetology, Moscow, 2008.* Abstract No. 6.
- Calvin W.M., King T.V.V.* Spectral characteristics of iron-bearing phyllosilicates: Comparison to Orgueil (C11), Murchison and Murray (CM2) // *Met. Planet. Sci.* 1997. V. 32. P. 693–701.
- Cayrel de Strobel G.* Stars resembling the Sun // *Astron. and Astrophys. Rev.* 1996. V. 7. P. 243–288.
- Chapman C.R., McCord T.B., Johnson T.V.* Asteroid spectral reflectivities // *Astron. J.* 1973. V. 78. P. 126–140.
- Clark B.E., Binzel R.P., Howell E.S., Cloutis E.A., Ockert-Bell M., Christensen P., Barucci M.A., DeMeo F., Lauretta D.S., Connolly H., Soderberg A., Hergenrother C., Lim L., Emery J., Mueller M.* Asteroid (101955) 1999 RQ36: Spectroscopy from 0.4 to 2.4 μm and meteorite analogs // *Icarus.* 2011. V. 216. P. 462–475.

- Cloutis E.A., Hiroi T., Gaffey M.J., Alexander C.M.O.D., Mann P. Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 1. CI chondrites // *Icarus*. 2011a. V. 212. P. 180–209.
- Cloutis E.A., Hudon P., Hiroi T., Gaffey M.J., Mann P. Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 2. CM chondrites // *Icarus*. 2011b. V. 216. P. 309–346.
- De Sanctis M.C., Combe J.-Ph., Ammannito E. and 18 coauthors. Detection of widespread hydrated materials on Vesta by the VIR imaging spectrometer on board the Dawn mission // *Astrophys. J. Lett.* 2012. V. 758. L. 36 (5pp).
- 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. V. 202. P. 160–180.
- Drake M.J. Geochemical evolution of the eucrite parent body: Possible nature and evolution of Asteroid 4 Vesta? / *Asteroids* / Ed. T. Gehrels T. 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.
- Ferguson J., Fielding P.E. The origins of the colours of yellow, green and blue sapphires // *Chem. Phys. Lett.* 1971. V. 10. P. 262–265.
- Fornasier S., Migliorini A., Dotto E., Barucci M.A. Visible and near infrared spectroscopic investigation of E-type asteroids, including 2867 Steins, a target of the Rosetta mission // *Icarus*. 2008. V. 196. P. 119–134.
- Fornasier S., Clark B.E., Dotto E., Migliorini A., Ockert-Bell M., Barucci M.A. Spectroscopic survey of M-type asteroids // *Icarus*. 2010. V. 210. P. 655–673.
- Fornasier S., Clark B.E., Dotto E. Spectroscopic survey of X-type asteroids // *Icarus*. 2011. V. 214. 131–146.
- Fornasier S., Lantz C., Barucci M.A., Lazzarin M. Aqueous alteration on main belt primitive asteroids: Results from visible spectroscopy // *Icarus*. 2014. V. 233. 163–178.
- 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., Kelley S. Mineralogical variations among high albedo E-type asteroids: Implications for asteroid igneous processes // 35th Lunar and Planet. Sci. Conf., Houston, 2004. Abs. #1812.
- Grimm R.E., McSween H.Y. Jr. Heliocentric zoning of the asteroid belt by aluminum-26 heating // *Science*. 1993. V. 259. P. 653–655.
- Hardorp J. The Sun among the stars // *Astron. and Astrophys.* 1980. V. 91. P. 221–232.
- Hergenrother C.W., Nolan M.C., Binzel R.P. and 13 co-authors. Lightcurve, color and phase function photometry of the OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu // *Icarus*. 2013. V. 226. P. 663–670.
- Kurucz R.L. New atlases for solar flux, irradiance, central intensity, and limb intensity // *Mem. Soc. Astron. Italiana Suppl.* 2005. V. 8. P. 189–191.
- Lazzaro D., Angeli C.A., Carvano J.M., Mothé-Diniz T., Duffard R., Florczak M. S³OS²: The visible spectroscopic survey of 820 asteroids // *Icarus*. 2004. V. 172. P. 179–220.
- Lazzarin M., Magrin S., Marchi S., Dotto E., Perna D., Barbieri C., Barucci M.A., Fulchignoni M. Rotational variation of the spectral slope of (21) Lutetia, the second asteroid target of ESA Rosetta mission // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2010. V. 408. P. 1433–1437.
- Lebofsky L.A., Sykes M.V., Tedesco E.F., Veeder G.J., Matson D.L., Brown R.H., Gradie J.C., Feierberg M.A., Rudy R.J. A refined 'standard' thermal model for asteroids based on observations of 1 Ceres and 2 Pallas // *Icarus*. 1986. V. 68. P. 239–251.
- Li J.-Y., McFadden L.A., Parker J.Wm., Young E.F., Stern S.A., Thomas P.C., Russell C.T., Sykes M.V. Photometric analysis of 1 Ceres and surface mapping from HST observations // *Icarus*. 2006. V. 182. P. 143–160.
- Loeffler B.M., Burns R.G., Tossel J.A., Vaughan D.J., Johnson K.H. Charge transfer in lunar materials: Interpretation of ultraviolet-visible spectral properties of the Moon // *Proc. Fifth Lunar Conf. (Suppl. 5. Geochim. et Cosmochim. Acta)*. 1974. V. 3. P. 3007–3016.
- Mattson S.M., Rossman G.R. Ferric iron in tourmaline // *Phys. Chem. Minerals*. 1984. V. 11. P. 225–234.
- McCord T.B., Li J.-Y., Combe J.-P. and 26 coauthors. Dark material on Vesta from the infall of carbonaceous volatile-rich material // *Nature*. 2012. V. 491. P. 83–86.
- McSween H.Y. Jr., Ghosh A., Grimm R.E., Wilson L., Young E.D. Thermal evolution models of asteroids / *Asteroids III* / Eds Bottke W. et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 559–571.
- Ockert-Bell M.E., Clark B.E., Sheppard M.K., Isaacs R.A., Cloutis E.A., Fornasier S., Bus S.J. The composition of M-type asteroids: Synthesis of spectroscopic and radar observations // *Icarus*. 2010. V. 210. P. 674–692.
- Perna D., Kaňuchová Z., Jeva S., Fornasier S., Barucci M.A., Lantz C., Dotto E., Strazzulla G. Short-term variability over the surface of (1) Ceres: A changing amount of water ice? // *Astron. and Astrophys.* 2015. V. 575. Id. L.1. 6 p.
- Reddy V., Le Corre L., O'Brien D.P. and 22 coauthors. Delivery of dark material to Vesta via carbonaceous chondritic impacts // *Icarus*. 2012. V. 221. P. 544–559.
- Rossman G.R. Spectroscopic and magnetic studies of ferric iron hydroxy sulfates: Intensification of color in ferric iron clusters bridged by a single hydroxide ion // *Amer. Mineralogist*. 1975. V. 60. P. 698–704.
- Rivkin A.S., Howell E.S., Britt D.T., Lebofsky L.A., Nolan M.C., Branston D.D. 3- μ m spectrophotometric survey of M- and E-class asteroids // *Icarus*. 1995. V. 117. P. 90–100.
- Rivkin A.S., Howell E.S., Lebofsky L.A., Clark B.E., Britt D.T. The nature of M-class asteroids from 3- μ m observations // *Icarus*. 2000. V. 145. P. 351–368.
- Shepard M.K., Clark B.E., Ockert-Bell M. and 10 co-authors. A radar survey of M- and X-class asteroids. II. Summary and synthesis // *Icarus*. 2010. V. 208. P. 221–237.
- Shepard M.K., Harris A.W., Taylor P.A. and 7 co-authors. Radar observations of Asteroids 64 Angelina and 69 Hesperia // *Icarus*. 2011. V. 215. P. 547–551.
- Taran M.N., Rossman G.R. High-temperature, high-pressure optical spectroscopic study of ferric-iron-bearing tourmaline // *Amer. Mineralogist*. 2002. V. 87. P. 1148–1153.

- 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 taxonomic classifications // Asteroids II / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M. S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Tholen D.J., Barucci M.A.* Asteroid taxonomy // Asteroids II / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 298–315.
- Thomas P.S., Binzel R.P., Gaffey M.J., Storrs A.D., Wells E.N., Zellner B.H.* Impact excavation on asteroid 4 Vesta: Hubble Space Telescope results // Science. 1997. V. 277. P. 1492–1495.
- Thomas P.C., Parker J.Wm., McFadden L.A., Russell C.T., Stern S.A., Sykes M.V., Young E.F.* Differentiation of the asteroid Ceres as revealed by its shape // Nature. 2005. V. 437. P. 224–226.
- Zolensky M.E., Weisberg M.K., Buchanan P.C., Mittlefehldt D.W.* Mineralogy of carbonaceous chondrite clasts in HED achondrites and the Moon // Met. Planet. Sci. 1996. V. 31. P. 518–537.