

УДК 523+520.84:520.849+52-123

## О НЕОДНОРОДНОСТИ ВЕЩЕСТВА АСТЕРОИДОВ 10 ГИГИИ, 135 ГЕРТЫ И 196 ФИЛОМЕЛЫ ПО СПЕКТРАМ ОТРАЖЕНИЯ

© 2011 г. В. В. Бусарев

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

Поступила в редакцию 21.12.2009 г.

Получены спектры отражения 10 Гигии (С-тип), 135 Герты (М-тип) и 196 Филомелы (S-тип) в диапазоне 0.40–0.91 мкм с разными интервалами времени. В статье анализируется методика измерений спектров астероидов и дается интерпретация спектров отражения Гигии, Герты и Филомелы. Рассматриваются основные физико-химические факторы и процессы, влияющие на спектральные характеристики астероидов. Установлено, что при разных значениях относительной фазы вращения в спектрах отражения Герты и Гигии имеются изменения, превышающие ошибки измерений в несколько раз, а спектральные вариации Филомелы при вращении практически не превосходят пределов ошибок. Весьма вероятно, что эти изменения связаны с локальными последствиями ударного метаморфизма вещества астероидов при крупных ударных событиях. Представленные результаты показывают, что определение преобладающего спектрального типа и соответствующей минералогии каждого астероида должно сопровождаться оценкой и учетом изменений его спектральных характеристик на интервале времени, соизмеримом с периодом вращения.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно из многочисленных лабораторных оптических исследований твердого вещества, альbedo или отражательная способность твердого тела в видимом диапазоне — это усредненная характеристика его физико-химических свойств. Альбедные вариации астероидов могут быть вызваны рядом причин, главными из которых являются изменения элементного состава вещества и/или степени его окисления, а также физического состояния или структуры вещества (средней плотности, пористости или гранулометрического состава). В конце 1970-х годов результаты примерно двадцатилетних исследований астероидов с помощью наземных оптических телескопов, оборудованных достаточно точной электронной регистрирующей аппаратурой, показали, что поляриметрические и колориметрические параметры этих тел находятся в пределах ошибок измерений независимо от наблюдаемой стороны. На этом основании тогда был сделан вывод о фотометрической однородности поверхностей астероидов и, в частности, высказано предположение об отсутствии на них заметных альбедных вариаций (Degewij и др., 1979; Burns, Tedesco, 1979). Даже появилась гипотеза, объясняющая однородность верхнего слоя раздробленного вещества (реголита) астероидов действием ударных процессов, которые должны перемешивать и равномерно распределять поверхностное вещество (Housen и др., 1979). Однако в работе Акимова и др. (1983) было впервые показано, что колебания отражательной способности астероидов при вращении заметно превышают ошибки измерений. Сравнение измеренных кривых блеска ряда наиболее изученных

астероидов с их модельными кривыми, рассчитанными при разных параметрах формы этих тел, позволило прийти к выводу, что их фотометрические неоднородности могут достигать  $0^m,17$  и являются, в основном, следствием альбедных неоднородностей (Акимов и др., 1983). Те же авторы отмечают, что здесь нет противоречия с ранее полученными поляриметрическими и колориметрическими характеристиками астероидов. Согласно работам известных специалистов (Bowell и др., 1979; Morrison, Zellner, 1979), если принять диапазон изменения альbedo за 100%, диапазоны изменения этих характеристик астероидов относительно малы: поляриметрических — не более 1.5%, а колориметрических — менее 30%.

Спектральная зависимость альbedo — это спектр отражения твердого тела при нулевом фазовом угле в абсолютных единицах. Однако такую зависимость легко измерить только в лабораторных условиях. Основной же объем наблюдательных данных о твердых небесных телах удается получить при отличных от нуля (а иногда изменяющихся или разных) фазовых углах. В этом случае для описания спектральных свойств твердого небесного тела пользуются его нормированным спектром отражения или спектром коэффициента (фактора) яркости, т.е. упрощенной относительной характеристикой, которую можно выразить следующей формулой:

$$\rho(\alpha, \lambda) = k(p_\lambda F(\alpha, \lambda))/(p_{\lambda_0} F(\alpha, \lambda_0)), \quad (1)$$

где  $p_\lambda$  — монохроматическое геометрическое альbedo, учитывающее интегральные физико-химические свойства наблюдаемой полусферы небесного тела, точнее (по определению) — ее проекции на картинную плоскость наблюдателя,  $F(\alpha, \lambda)$  — фазо-

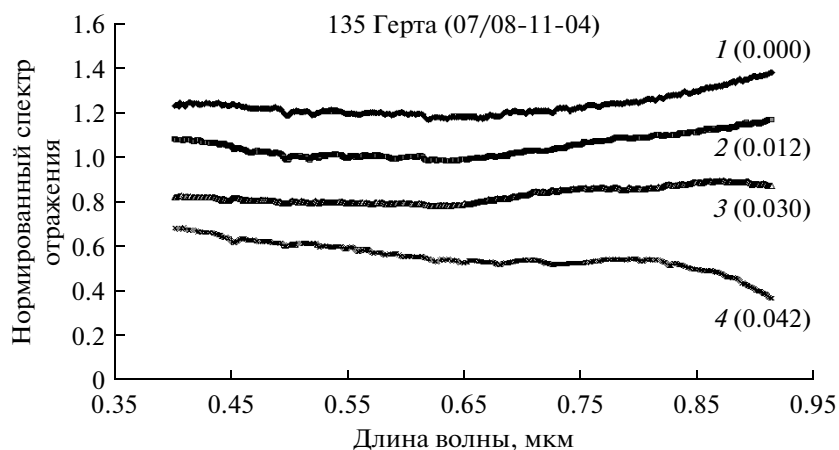
вая функция ( $F(\alpha, \lambda) = 1$ , при фазовом угле  $\alpha = 0$ ),  $\lambda$  — текущее значение длины волны,  $\lambda_0$  — фиксированная длина волны, на которой выбирается нормировочное значение коэффициента яркости  $\rho_0(\alpha, \lambda_0) = p_{\lambda_0} F(\alpha, \lambda_0)$  (обычно принимают  $\lambda_0 = 0.55$  мкм, соответствующее середине фотометрической полосы  $V$ ),  $k$  — некоторый постоянный множитель. Следует подчеркнуть, что  $\rho(\alpha, \lambda)$  представляет собой функцию геометрического альбедо и фазовой функции небесного тела на разных длинах волн и не зависит от изменений формы тела при его вращении. Кроме того, приведенное соотношение (1) справедливо, если наблюдаемый объект является точечным источником излучения, а его спектр регистрируется одновременно во всем спектральном диапазоне. Поскольку при наземных оптических исследованиях практически все астероиды являются точечными объектами (их угловые размеры не превышают нескольких десятых долей угловой секунды), то результатом измерений являются их интегральные характеристики для наблюдаемой полушеры.

Колебания среднего состава или степени окисления вещества наблюдаемой части поверхности астероидов можно обнаружить на их последовательных по времени (или фазе вращения) спектрах диффузного отражения. Подобные вариации проявляются как изменения наклона и формы континуума спектров отражения астероидов в видимом диапазоне, который характеризует интенсивность и ширину полосы поглощения кислород—металл с центром у 0.2 мкм, порождаемую электронным переносом заряда в силикатных соединениях, куда входит кислород (Loeffler и др., 1974; Платонов, 1976; Burns, 1993). Изменения в составе вещества также приводят к возникновению (или исчезновению) на последовательных спектрах отражения астероидов полос поглощения, характеризующих преобладающие минералы или их комплексы. Важно подчеркнуть, что ширина таких минералогических полос поглощения достаточно велика — от нескольких сотен до одной-двух тысяч ангстрем. Поэтому такие полосы могут быть надежно отождествлены при их достаточной относительной интенсивности (не менее 3%–5%) в спектрах отражения астероидов на фоне высокочастотной шумовой составляющей (см., например, Бусарев и др., 2007). Как известно, одной из наиболее интенсивных минералогических полос поглощения в ближнем ИК-диапазоне спектров отражения астероидов и других твердых безатмосферных небесных тел с силикатным составом является пироксен—оливиновая полоса с центром у 1 мкм (Adams, 1975), которая также существенно влияет на форму континуума их спектров отражения. Еще одна близкая к вышеупомянутой полоса поглощения наблюдается в спектрах отражения силикатного гидратированного или высокоокисленного вещества у 0.75–0.80 мкм и возникает при электронном переносе заряда

$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  (Burns и др., 1972; Платонов, 1976; Бахтин, 1985; Burns, 1993). Как показывает наш опыт изучения образцов земных минералов, содержащих разновалентные формы железа, интенсивность указанной полосы поглощения в спектре отражения контролируется не только долевыми количествами двух- и трехвалентного железа, но и его общим содержанием в силикатном веществе (Busarev и др., 2004). Интересно, что при повышенном содержании  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в земных пироксенах и оливинах эта полоса может даже маскировать их диагностическую полосу поглощения у 1 мкм (Adams, 1975). По причине высокого содержания гидросиликатов и близких им фаз в углистых хондритах (Dodd, 1981; Jarosewich, 1990) интенсивная полоса поглощения с центром у 0.75–0.80 мкм или на близких длинах волн придает их спектрам отражения характерную вогнутую форму во всем диапазоне 0.5–1.0 мкм (см., например, Busarev, Taran, 2002). Важным дополнительным индикатором гидросиликатов и высокоокисленных оксидов железа в видимом диапазоне является полоса поглощения у 0.44–0.45 мкм, обнаруженная в спектрах диффузного отражения раздробленных образцов земных серпентинов (Busarev и др., 2004). Оказалось, что эквивалентная ширина этой полосы поглощения в спектрах отражения набора серпентиновых образцов имеет высокую корреляцию с содержанием в них  $\text{Fe}^{3+}$  (Busarev и др., 2008). В качестве индикаторов 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). В упомянутой работе показано, что эти слабые полосы поглощения часто встречаются в спектрах отражения астероидов S-типа.

#### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры астероидов 10 Гигии, 135 Герты и 196 Филомелы были получены в разное время с ноября 2004 г. по ноябрь 2008 г. на 1.25-м телескопе Крымской обсерватории ГАИШ с ПЗС-спектрографом в диапазоне 0.40–0.91 мкм со спектральным разрешением  $\sim 8 \text{ \AA}$ . Регистрация каждого спектра астероида в указанном диапазоне выполнялась в два этапа (последовательно в интервалах длин волн 0.40–0.67 и 0.65–0.91 мкм или наоборот) и занимала около получаса. Кроме астероидов наблюдались также стандартные звезды, являющиеся одновременно и аналогами Солнца по спектрофотометрическим параметрам (16 Cyg B и HD 10307) (Hardorp, 1980; Cayrel de Strobel, 1996; Глушнева и др., 2000), которые использовались для определения спектральной прозрачности земной атмосферы, а также аппроксимации спектров отражения астероидов. Средние моменты времени, условия наблюдения



**Рис. 1.** Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 135 Герты, полученные 7–8 ноября 2004 г. Спектры 1–4 расположены в хронологическом порядке (сверху вниз) и смещены друг относительно друга для удобства восприятия. Значения относительной фазы вращения астероида указаны в скобках. Фаза вращения самого первого спектра условно принята за нулевую.

астероидов и стандартных звезд, а также ошибки спектров отражения приведены в таблице. Аппроксимация спектров отражения астероидов проводилась по следующей формуле (Бусарев, 1999):

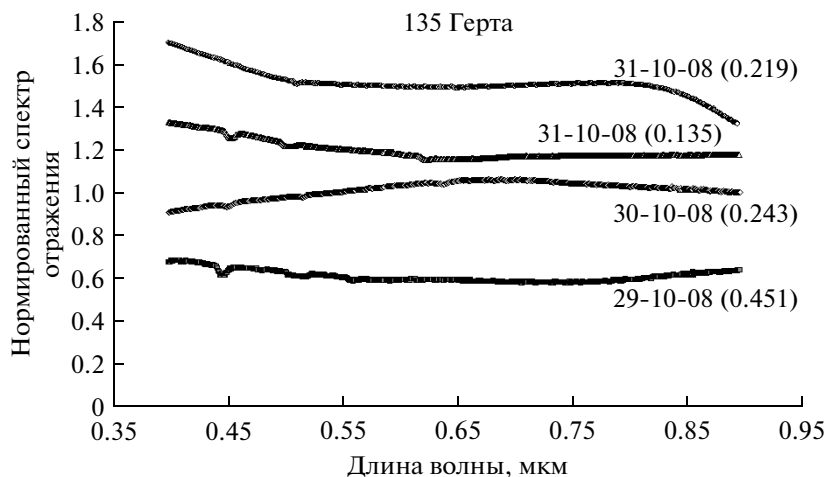
$$\rho(\varphi, \lambda) = k I_a(\varphi, \lambda) f(\lambda)^{-\delta(M_a(z) - M_s(z))} / I_s(\lambda), \quad (2)$$

где  $\rho(\varphi, \lambda)$  – спектральное распределение коэффициента (или фактора) яркости астероида,  $I_a(\varphi, \lambda)$  – спектральное распределение интенсивности светового потока от астероида,  $I_s(\lambda)$  – спектральное распределение интенсивности светового потока от звезды – солнечного аналога,  $f(\lambda)$  – функция спектральной прозрачности атмосферы для данной обсерватории, определяемая на каждую ночь наблюдений,  $\delta(M_a(z) - M_s(z))$  – разность воздушных масс, зависящая от зенитных расстояний ( $z$ ) астероида и звезды-аналога в моменты их наблюдений,  $k$  – некоторый коэффициент. Из формулы (1) видно, что  $\rho(\varphi, \lambda)$  и  $I_a(\varphi, \lambda)$  являются функциями не только длины волны ( $\lambda$ ), но и фазового угла астероида ( $\varphi$ ). Следует отметить, что при  $\varphi \approx 0^\circ$  спектральное распределение коэффициента яркости наблюдаемой полусферы астероида превращается в спектральное распределение его геометрического альбедо  $p(\lambda)$ .

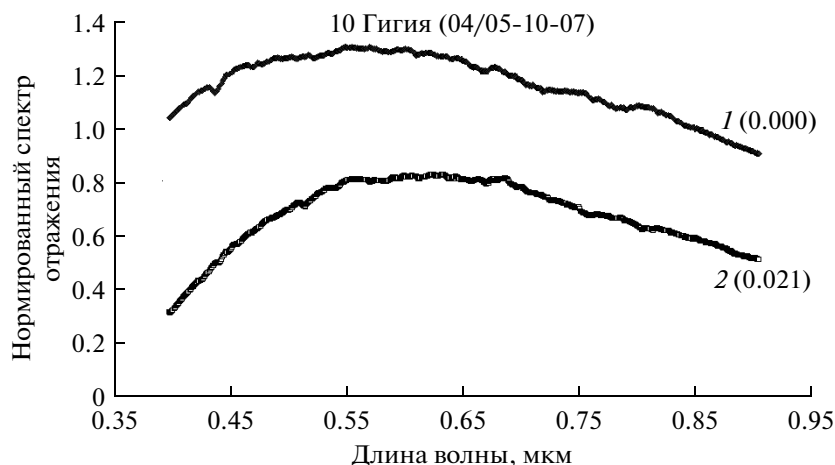
По расчетным спектрам отражения астероидов были определены их относительные среднеквадратические ошибки (стандартные отклонения от линии континуума) в диапазоне 0.44–0.85 мкм. Величина этих ошибок составляет не более 1%–2% в середине указанного диапазона и возрастает примерно до 5%–7% на его концах (см. табл.). Далее расчетные спектры отражения астероидов были сглажены методом “бегущего среднего” (по пяти точкам) и нормированы на длине волны 0.55 мкм. В некоторых случаях после такого сглаживания для удаления остаточной шумовой компоненты в спектрах отражения астероидов за пределами диапазона

0.44–0.85 мкм дополнительно применялась полиномиальная экстраполяция спектров вблизи 0.40–0.44 и 0.85–0.91 мкм. Полученные нормированные спектры отражения астероидов изображены на рис. 1–5. Соответствующие значения относительной фазы вращения астероидов указаны на рисунках рядом с обозначениями спектров (в скобках), а также в табл. За нулевую фазу для каждого из астероидов условно принималась фаза вращения (ФВ), соответствующая первому из полученных спектров. Все данные в табл. и на рисунках приведены в хронологическом порядке. Перейдем к более подробному описанию спектров отражения каждого из астероидов.

Изменения спектров отражения 135 Герты, астероида М-типа (Tholen, 1989), имеющего период вращения  $P = 8.40^h$  (Батраков и др., 2000), IRAS-диаметр (диаметр, определенный по наблюдениям с ИСЗ Infrared Astronomical Satellite (IRAS)) и альбедо, равные 79.2 км и 0.14, соответственно (Tedesco и др., 2004), в течение ночи 7–8 ноября 2004 г. в интервале ФВ 0.000–0.042 были сравнительно невелики (рис. 1). Однако их общая вогнутая форма характерна для силикатного гидратированного вещества или вещества углисто-хондритового состава, которое может входить в состав астероидов С–F-типов, но нетипично для астероида М-типа, состоящего из металлических соединений и высокотемпературных минералов типа пироксенов и оливинов (Gaffey и др., 1989; 2002). При ФВ 0.012–0.042 в диапазоне 0.70–0.91 мкм (рис. 1, кривые 2–4) произошло постепенное снижение отражательной способности астероида на (~20%–40%), связанное, вероятно, с появлением полосы поглощения у 1.0 мкм, вызванным ростом среднего содержания пироксена и оливина в составе вещества наблюдаемой полусферы астероида. Похожую форму имели спектры



**Рис. 2.** Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 135 Герты, полученные 29–31 октября 2008 г. Спектры смещены друг относительно друга для удобства восприятия.

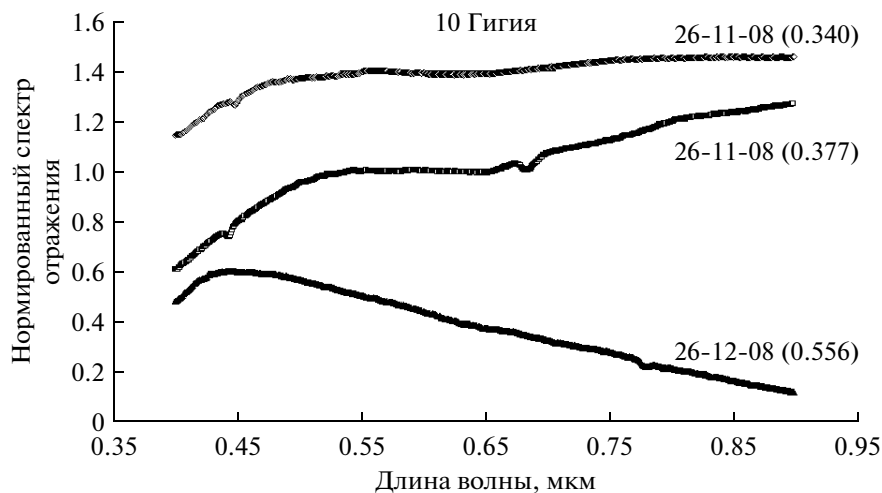


**Рис. 3.** Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 10 Гигии, полученные 4–5 октября 2007 г. Спектры смещены друг относительно друга для удобства восприятия. Значения относительной фазы вращения астероида указаны в скобках. Фаза вращения самого первого спектра условно принята за нулевую.

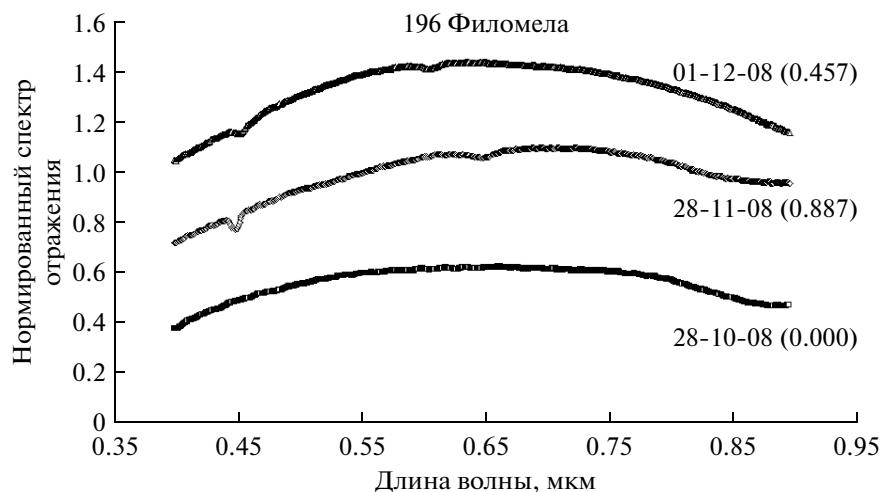
отражения Герты и 29–31 октября 2008 г., при некоторых других значениях и в большем интервале ФВ. Наблюдения астероида в указанный период показали, что форма его спектров отражения менялась более заметным образом (рис. 2): 31 октября она была вогнутой (при ФВ 0.135) и вогнуто-выпуклой, возможно, из-за появления пироксен-оливиновой полосы поглощения у 1.0 мкм (при ФВ 0.219), 30 октября – слегка выпуклой, что характерно для астероида М- или S-типа (при ФВ 0.243), и 29 октября – вогнутой (при ФВ 0.451). Следует также обратить внимание на более четкую регистрацию 29 и 31 октября в спектрах отражения полосы поглощения у 0.44–0.45 мкм, связанной с наличием в веществе астероида  $\text{Fe}^{3+}$ , и слабой комбинированной полосы поглощения оливина и пироксена у 0.50 мкм (рис. 2), вызываемой запрещенными по спину электронны-

ми переходами в  $\text{Fe}^{2+}$  в кристаллических полях этих минералов (Платонов, 1976; Бахтин, 1985). Таким образом, спектры отражения Герты, полученные при разных ФВ, свидетельствуют о переменности ее наблюдаемого спектрального типа (от C–F до M–S) и, следовательно, – о значительной неоднородности состава ее поверхностного вещества.

Два первых спектра отражения 10 Гигии, астероида C-типа (Tholen, 1989) с периодом вращения  $P = 27.62^{\text{h}}$  (Батраков и др., 2000), IRAS-диаметром и альбедо 407.1 км и 0.07, соответственно (Tedesco и др., 2004), были измерены ночью 4–5 ноября 2007 г. (рис. 3). Спектры были получены с небольшой разницей времени (около получаса) и обнаруженные на них различия оказались в пределах ошибок измерений (см. табл.), что и следовало ожидать для относительно медленно вращающегося астероида. Од-



**Рис. 4.** Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 10 Гигии, полученные 26 ноября–2 декабря 2008 г. Спектры расположены в хронологическом порядке (сверху вниз) и смещены друг относительно друга для удобства восприятия.



**Рис. 5.** Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения 196 Филомелы, полученные 28 октября–2 декабря 2008 г. Спектры расположены в хронологическом порядке (снизу вверх) и смещены друг относительно друга для удобства восприятия. Значения относительной фазы вращения астероида указаны в скобках. Фаза вращения самого первого спектра условно принята за нулевую.

нако форма этих спектров отражения (рис. 3) не согласуется с установленным спектральным типом Гигии С, которому приписывается низкотемпературная минералогия (Gaffey и др., 1989; 2002), а, скорее, напоминает спектр отражения высокотемпературного минерала оливина (Платонов, 1976), свойственного астероидам S-типа (Gaffey и др., 1989). Спектры Гигии при других значениях ФВ были зарегистрированы 25–26 ноября 2008 г. также с небольшой разницей времени (около часа) (рис. 4, две верхние кривые). Хотя они имеют некоторые различия (~10%–20%) в диапазоне 0.65–0.91 мкм, но в основном согласуются со спектральным типом “С”. На этих спектрах отражения имеется слабая

полоса поглощения  $\text{Fe}^{3+}$  у 0.44–0.45 мкм, подтверждающая низкотемпературную минералогия вещества. Последний спектр отражения Гигии, измеренный нами 1–2 декабря 2008 г. при ФВ 0.556 (рис. 4, нижняя кривая), характеризует сторону астероида, диаметрально противоположную стороне, которой соответствуют два верхних спектра (на том же рисунке). Форма этого спектра отражения весьма необычна и заметно отличается от спектров Гигии, полученных при других ФВ. Во всем используемом нами спектральном диапазоне этот спектр имеет отрицательный наклон (рис. 4). Такая форма свойственна спектрам отражения астероидов В- и F-типов, близких к С-типу (Tholen, 1989). Итак,

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

Объект	Дата	UT, ч, мин, с	$\alpha$ , ч, мин, с	$\delta$ , град, угл. мин, угл. с	$\Delta$ , а. е.	$r$ , а. е.	$\varphi$ , град	$V$ , зв. вел.	$\omega$	$M(z)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
16 Суг В	2004 11 07	17 49 39	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.223	—	—	—
135 Герга (1)	2004 11 07	19 17 21	00 28 31	+05 54 41	1.237	2.115	16.3	11.2	0.000	1.298	0.036	0.017	0.081
135 Герга (2)	2004 11 07	19 23 30	00 28 31	+05 54 41	1.237	2.115	16.3	11.2	0.012	1.301	0.048	0.017	0.081
135 Герга (3)	2004 11 07	19 32 38	00 28 31	+05 54 40	1.237	2.115	16.3	11.2	0.030	1.306	0.021	0.008	0.060
135 Герга (4)	2004 11 07	19 38 40	00 28 31	+05 54 40	1.237	2.115	16.3	11.2	0.042	1.311	0.057	0.012	0.056
16 Суг В	2007 10 04	21 03 04	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.394	—	—	—
10 Пилгия (1)	2007 10 04	22 42 11	00 27 01	+08 51 24	2.370	3.367	1.7	10.2	0.000	1.307	0.046	0.012	0.047
10 Пилгия (2)	2007 10 04	23 16 58	00 27 00	+08 51 17	2.370	3.367	1.7	10.2	0.021	1.390	0.094	0.019	0.072
16 Суг В	2008 10 28	16 37 30	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.123	—	—	—
196 Филомела	2008 10 28	23 47 28	02 39 26	+09 21 10	2.163	3.151	2.3	11.0	0.000	1.604	0.041	0.010	0.115
135 Герга	2008 10 29	01 28 43	03 27 13	+22 29 25	1.308	2.269	8.4	11.2	0.451	1.689	0.060	0.010	0.059
16 Суг В	2008 10 29	18 29 30	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.425	—	—	—
135 Герга	2008 10 30	00 56 04	03 26 14	+22 26 57	1.307	2.271	7.9	11.2	0.243	1.447	0.034	0.007	0.100
16 Суг В	2008 10 30	18 35 30	19 41 52	+50 31 00	—	—	—	6.2	—	1.460	—	—	—
135 Герга	2008 10 31	01 13 22	03 25 11	+22 24 16	1.306	2.273	7.4	11.1	0.135	1.562	0.043	0.012	0.065
135 Герга	2008 10 31	01 55 43	03 25 09	+22 24 10	1.306	2.274	7.4	11.1	0.219	1.861	0.081	0.019	0.071
HD 10307	2008 11 25	23 25 00	01 41 47	+42 36 48	—	—	—	4.9	—	1.432	—	—	—
10 Пилгия (1)	2008 11 26	02 09 35	04 44 36	+25 14 24	2.516	3.494	2.6	10.4	0.340	1.628	0.024	0.006	0.100
10 Пилгия (2)	2008 11 26	03 11 02	04 44 34	+25 14 19	2.516	3.494	2.6	10.4	0.377	2.170	0.023	0.008	0.065
196 Филомела	2008 11 28	21 06 36	02 16 22	+08 35 53	2.279	3.156	9.7	11.5	0.887	1.344	0.030	0.007	0.062
HD 10307	2008 11 28	22 25 30	01 41 47	+42 36 48	—	—	—	4.9	—	1.268	—	—	—
196 Филомела	2008 12 01	20 34 48	02 14 47	+08 35 56	2.304	3.157	10.5	11.5	0.457	1.304	0.058	0.026	0.120
HD 10307	2008 12 01	22 59 15	01 41 47	+42 36 48	—	—	—	4.9	—	1.422	—	—	—
10 Пилгия	2008 12 02	02 13 08	04 39 24	+25 01 25	2.507	3.492	0.9	10.3	0.556	1.937	0.080	0.018	0.049

Обозначения: UT — всемирное время;  $\alpha$  — прямое восхождение;  $\delta$  — склонение;  $\Delta$  — геоцентрическое расстояние;  $r$  — гелиоцентрическое расстояние;  $\varphi$  — фазовый угол;  $V$  — видимая звездная величина;  $\omega$  — относительная фаза вращения;  $M(z)$  — воздушная масса; ошибки спектров отражения астероидов:  $\sigma_1$  — стандартное отклонение у 0.44–0.45 мкм,  $\sigma_2$  — стандартное отклонение у 0.59–0.60 мкм,  $\sigma_3$  — стандартное отклонение у 0.84–0.85 мкм; цифры в скобках рядом с некоторыми названиями астероидов обозначают порядковые номера спектров астероидов, полученных на одну и ту же дату.

спектры отражения Гигии, полученные при ее разных ФВ, свидетельствуют о переменности ее спектрального типа в пределах от С до В–F и даже S.

И, наконец, были измерены три спектра 196 Филомелы, астероида S-типа (Tholen, 1989) с периодом вращения  $P = 8.34^h$  (Батраков и др., 2000), IRAS-диаметром и альбедо 136.4 км и 0.23, соответственно (Tedesco и др., 2004). Спектры получены 28–29 октября 2008 г., 28–29 ноября 2008 г. и 1–2 декабря 2008 г. при разных, но более или менее равномерно распределенных ФВ в пределах периода вращения астероида (таблица). Спектры отражения Филомелы по форме соответствуют спектральному типу “S” и различаются на ~6%–9% только у границ используемого спектрального диапазона, что находится в пределах ошибок измерений (рис. 5). Такие результаты измерений свидетельствуют о высокотемпературной минералогии (Gaffey и др., 1989) и относительно однородном составе поверхностного вещества Филомелы. Слабые полосы поглощения у 0.44–0.45 мкм, 0.60 и 0.67 мкм на втором и третьем (по времени) спектрах указывают на наличие на поверхности Филомелы небольших образований, сложенных окисленным и/или гидратированным веществом, либо на его примеси в основном материале этого астероида.

Необходимо отметить, что значительные вариации спектров отражения Гигии и Герты зарегистрированы в период достаточно устойчивой спектральной прозрачности атмосферы. При нормировке спектров отражения были исключены вариации яркости рассматриваемых астероидов, связанные с нерегулярностью их формы. Фазовые световые углы астероидов были невелики и менялись в сравнительно небольших пределах ( $0.9^\circ$ – $2.6^\circ$  у Гигии,  $2.3^\circ$ – $10.5^\circ$  у Филомелы и  $7.4^\circ$ – $16.3^\circ$  у Герты) и фазовая функция не могла существенно повлиять на их спектральную отражательную способность. Поэтому можно утверждать, что обнаруженные спектральные различия при вращении астероидов связаны с изменениями средней спектральной отражательной способности или альбедо их наблюдаемой полусферы и, соответственно, — среднего химико-минералогического состава их вещества.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее вероятные причины наличия локальных неоднородностей вещества на астероидах — это последствия их взаимных столкновений или падений на них более мелких тел. Частота и энергия таких столкновений были весьма высокими в прошлом (~3–4 млрд. лет назад), обусловленные резонансно-гравитационными и гравитационными возмущениями со стороны растущего Юпитера и проникающими в главный пояс астероидов крупных допланетных тел (Сафронов, 1969; Сафронов, Зиглина, 1991; O’Brien и др., 2007). Но процесс падения более мелких тел на астероиды может про-

должаться и в настоящее время (см., например, Petit и др., 2001; Bottke и др., 2005). Самыми заметными следами ударных событий на поверхности астероидов являются ударные кратеры и выбросы вещества. Они хорошо видны на снимках астероидов с высоким разрешением, сделанных со сближавшихся с ними космических аппаратов. Как известно из работ по изучению земных ударных кратеров (см., например, Melosh, 1989; Grieve, 1991), при соударениях метеоритных тел с земной поверхностью со скоростями порядка 1–10 км/с давления в эпицентре удара могли достигать десятков гигапаскалей, а температура — нескольких тысяч градусов. Результатом воздействия на силикатное вещество таких давлений и температур является его полное плавление и частичное испарение, по крайней мере — на дне кратера. Однако в случае астероидов, как показывают исследования метеоритов и модельные расчеты, даже при очень сильных ударах, энергия которых приближается к энергии разрушения тела, не происходит его глобального разогрева до высоких температур (Keil и др., 1997). То есть при значительных давлениях и температурах в эпицентре ударного взрыва на астероидах происходит только частичное плавление и испарение поверхностного вещества, независимо от состава вещества сталкивающихся тел. Даже в таких экстремальных условиях на астероиде более вероятно образование брекчий (частично сплавленных конгломератов частиц, в большинстве случаев разнородных как по физическому состоянию, так и по химико-минералогическому составу), чем сплошных расплавов (Dodd, 1981; Keil, 2000; Bischoff и др., 2006). Из этого следует, что ударный метаморфизм поверхностного вещества астероидов весьма неоднороден и имеет локальный характер.

Вследствие случайного характера ударных процессов эволюция каждого астероида и отдельных образований на его поверхности имеет свои специфические особенности. В зависимости от величины и вектора скорости падавшего тела дно ударного кратера может быть заполнено как веществом ударника, так и веществом самого астероида (Pierazzo, Melosh, 2000). Это означает, что при падении на астероиды более мелких тел может происходить перенос или доставка на них вещества другого типа (поскольку оно возникло на другом родительском теле). Даже если ударный кратер или выброс вещества из него сформировался в основном из материала астероида, значительные ударные нагрузки и высокие температуры могли привести к изменениям структуры и состава горных пород и минералов (дроблению, перемешиванию, нагреванию, частичному плавлению, удалению летучих и т.п.) (см., например, Коржинский, 1957). Как известно из многочисленных исследований метеоритов — фрагментов астероидов, — поверхностное вещество последних подвергалось интенсивной и многократной ударной переработке, включавшей целый ряд

кратковременных, преимущественно восстановительных процессов, поскольку они, с одной стороны, сопровождались высокими давлениями и температурами, а с другой — привели к образованию обедненных кислородом неравновесных расплавов или конденсатов (Dodd, 1981; Scott и др., 1992; Ryan, Melosh, 1998; Keil, 2000; Wasserman, Melosh, 2001).

Кроме того, недавно было обнаружено, что при конденсации паров силикатного вещества, сопровождающей удары твердых тел, протекает химическая реакция, характерная для мантийных процессов с высокими значениями температуры и давления (Mao, Bell, 1977). При моделировании с помощью импульсного лазера процессов ударного плавления, испарения и конденсации железосодержащих образцов авгита и перидотита в гелиевой атмосфере было показано, что происходит химическое диспропорционирование двухвалентного железа, при котором  $\text{Fe}^{2+}$  преобразуется в форму  $\text{Fe}^0$  и  $\text{Fe}^{3+}$  (Яковлев и др., 2009). Определение и изучение состава последовательных слоев конденсата в этом эксперименте привело к однозначному выводу: наряду с уменьшением концентрации  $\text{Fe}^{2+}$  растет содержание не только  $\text{Fe}^0$ , но и  $\text{Fe}^{3+}$ , причем последнего — в несколько раз быстрее. Согласно интерпретации авторов высокая плотность газа в единичном объеме образовавшегося при ударе пара как бы “запирает” освободившийся кислород в “системе”: в течение некоторого времени он остается в этом объеме, что повышает вероятность его реакции с  $\text{FeO}$  и окисления железа до трехвалентного состояния. Сравнительное изучение тем же методом состава ударного конденсата на частицах мелкой фракции лунного реголита в образцах, доставленных КА Луной-16, подтвердило действие реакции диспропорционирования двухвалентного железа в естественных условиях безатмосферных небесных тел: в последовательных слоях ударного конденсата соотношения валентных форм железа в среднем составили  $\text{Fe}^0 : \text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+} = 1.2 : 1.9 : 0.7$  (Яковлев и др., 2009; Gerasimov и др., 2002). Этот результат важен для интерпретации наблюдаемых спектральных характеристик твердых безатмосферных небесных тел.

Возвращаясь к рассматриваемым нами астероидам, обсудим возможное влияние ударных процессов на их вещество. Астероиды С-типа (к которому принадлежит Гигия) считаются родительскими телами метеоритов — углистых хондритов, а астероиды S-типа (к которому принадлежит Филомела) — родительскими телами обычных хондритов по причине близости их спектров отражения (Gaffey и др., 1989). При лабораторных исследованиях углистых хондритов наиболее примитивных групп (C1, CM, CO, CV) установлено, что их вещество, как правило, не подвергалось нагреванию свыше 100–200 К и обогащено слоистыми гидросиликатами, содержащими воду в связанном состоя-

нии (см., например, Dodd, 1981; Rubin, 1997; Huss и др., 2006). Можно предполагать, что вследствие ударных событий, вызывающих локальное нагревание и плавление, вещество типа углистых хондритов дегидратирует и по составу становится похожим на вещество обычных хондритов с соответствующим преобразованием формы спектра отражения. Именно такое поведение спектральных характеристик углистых хондритов было установлено при лабораторных исследованиях их раздробленных образцов, нагретых до разных температур (Hiroi и др., 1993). Необходимо отметить, что, хотя рассматриваемый нами астероид 135 Герта и отнесен к М-типу (Tholen, 1989), но может быть тоже частично покрыт гидросиликатами. На это указывает наличие в его спектрах отражения диагностической полосы поглощения  $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$  у 3.0 мкм (Rivkin и др., 2000), слабой полосы поглощения  $\text{Fe}^{3+}$  у 0.44–0.45 мкм по нашим данным (рис. 1–2), а также его относительно невысокое IRAS-альbedo 0.14 (Tedesco и др., 2004). Как уже отмечалось, форма спектров отражения Герты менялась от слегка выпуклой (типичной для астероидов M–S-типов) до плоской или вогнутой (типичной для астероидов C–F-типов) (рис. 2). Похожие изменения в спектрах отражения при вращении были обнаружены и у другого гидратированного астероида М-типа — 21 Лютетии (Busarev, 2008). Как показали исследования Лютетии в области полосы поглощения  $\text{Fe}^{3+}$  у 0.44–0.45 мкм с помощью спектрально-частотного метода (Бусарев и др., 2007), на нем имеется множество локальных неоднородностей гидратированного и/или окисленного вещества с размерами в основном от нескольких километров до нескольких десятков километров (Прокофьева и др., 2005).

Таким образом, основными причинами появления в спектрах отражения астероидов полос поглощения  $\text{Fe}^{3+}$  у 0.44–0.45 и  $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}$  у 0.75–0.80 мкм являются: содержание в веществе их “собственных” гидратированных и/или высокоокисленных соединений (в частности, на астероидах примитивных типов), доставка таких соединений при падениях примитивных тел углисто-хондритового состава с высоким содержанием гидросиликатов (особенно на астероидах магматических типов) (Busarev, 1998; Бусарев, 2002), а также — действие химической реакции диспропорционирования двухвалентного железа при образовании конденсата силикатного вещества в ударных процессах (Яковлев и др., 2009). Нельзя исключить и разные комбинации перечисленных причин. Возможно, что при наличии на поверхности астероидов гидратированных и/или высокоокисленных соединений действие ударных процессов приводит к усилению полос поглощения  $\text{Fe}^{3+}$  или  $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}$  в их спектрах отражения. В то же время из полученных средних соотношений при диспропорционировании  $\text{Fe}^{2+}$  в ударных процессах (Яковлев и др., 2009) видно, что сохраняется их пре-



имущественно восстановительный характер. Поэтому естественно предполагать, что если поверхность астероида сложена веществом типа обыкновенных хондритов, в котором преобладают такие минералы как оливины и пироксены, более устойчивые к высоким температурам и давлениям, чем гидросиликаты, крупные ударные события не приводят к резким изменениям в составе вещества и/или степени его окисления и, соответственно, — в спектральных характеристиках наблюдаемой полусферы астероида. Возможно, это подтверждается полученными нами спектрами отражения Филомелы (рис. 5).

Следует подчеркнуть, что наблюдения рассмотренных астероидов выполнены при малых фазовых световых углах, в условиях устойчивой спектральной прозрачности атмосферы. Отсутствие значительных погрешностей в наблюдательных данных подтверждает совпадение формы спектров отражения астероидов при близких значениях фазы вращения. Поскольку спектральные свойства каждого астероида определяются средним химико-минералогическим составом вещества его наблюдаемой полусферы, то на них влияют имеющиеся локальные неоднородности состава вещества. Возможно, что такими неоднородностями поверхности Гигии и Герты, вызывающими спектральные различия при вращении, являются последствия крупных ударных событий. На основе представленных результатов и упомянутых опубликованных данных можно утверждать, что возникновение локальных неоднородностей состава поверхностного вещества, связанных с ударными событиями, весьма вероятно на астероидах примитивных типов (С, G, В и F) или на гидратированных астероидах других типов и менее вероятно на астероидах высокотемпературных типов (M, S, E, V и др.) по причине более высокой температурной устойчивости их вещества.

Полученные результаты показывают, что при оценке спектрального типа и соответствующей минералогии каждого астероида необходимо устанавливать пределы изменения его спектральных характеристик на интервале времени, соизмеримом с периодом его вращения, и, в случае обнаружения заметных различий, их учитывать.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов Л.А., Лунишко Д.Ф., Бельская И.Н. О фотометрической неоднородности поверхности астероидов // *Астрон. журн.* 1983. Т. 60. Вып. 5. С. 999–1004.
- Батраков Ю.В., Кочетова О.М., Скрипниченко В.И. и др. Эфемериды малых планет на 2001 год. С.-Пб.: Изд. ИПА РАН, 2000. С. 244–245.
- Бахтин А.И. Породообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Изд. 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 M-, 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.
- Глушинева И.Н., Шенаврин 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.
- Коржинский Д.С. Физико-химические основы парагенезисов минералов М.: АН СССР, 1957. 184 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 M-астероида 21 Лютеция спектральным и частотным методами // *Астрон. вестн.* 2005. Т. 39. № 5. С. 457–468.
- 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.
- 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. 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.
- 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.
- Bowell E., Gehrels T., Zellner B. Magnitudes, colors, types, and adopted diameters of asteroids // *Asteroids* / Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press, 1979. P. 1108–1129.
- Burns J.A., Tedesco E.F. Asteroid lightcurves: Results for rotations and shapes // *Asteroids* / Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press, 1979. P. 494–527.
- Burns R.G., Huggins F.E., Abu-Eid R.M. Polarized absorption spectra of single crystals of lunar pyroxenes and olivines // *Moon.* 1972. V. 4. Issue 1–2. P. 93–102.
- Burns R.G. Mineralogical applications of crystal field theory. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 1993. 224 p.
- Busarev V.V. Spectral features of M-asteroids: 75 Eurydike and 201 Penelope // *Icarus.* 1998. V. 131. P. 32–40.

- 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), Berlin: Technical Univ., ESA-SP-500, 2002. P. 933–936.
- 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 // 40<sup>th</sup> Vernadsky Inst. – Brown Univ. Microsimp. on Comparative Planetology. Moscow, 2004. Abstract № 15.
- Busarev V.V.* Spectral signs of carbonaceous chondritic material on (21) Lutetia // Asteroids, Comets, Meteors 2008, Baltimore, USA, 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. Microsimp. on Comparative Planetology. Moscow, 2008. Abstract № 6.
- Cayrel de Strobel G.* Stars resembling the Sun // Astron. and Astrophys. Rev. 1996. V. 7. P. 243–288.
- Degewij J., Tedesco E.F., Zellner B.* Albedo and color contrasts on asteroid surfaces // Icarus. 1979. V. 40. P. 364–374.
- Dodd R.T.* Meteorites – A petrologic-chemical synthesis. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981. 368 p.
- 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., 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.
- 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. 2002. Abstract № 1276.
- Grieve R.A.F.* Terrestrial impact: The record in the rocks // Meteoritics. 1991. V. 26. P. 175–194.
- Hardorp J.* The Sun among the stars // Astron. and Astrophys. 1980. V. 91. P. 221–232.
- Hiroi T., Pieters C.M., Zolensky M.E., Lipschutz M.E.* Evidence of thermal metamorphism on the C, G, B and F asteroids // Science. 1993. V. 261. P. 1016–1018.
- 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.
- Housen K.R., Wilkening L.L., Chapman C.R., Greenberg R.J.* Regolith development and evolution on asteroids and the moon // Asteroids / Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press, 1979. P. 601–627.
- Huss G.R., Rubin A.E., Grossman J.N.* Thermal metamorphism in chondrites // Meteorites and the early Solar system II / Eds Lauretta D.S., McSween H.Y., Jr. Tucson: Univ. Arizona Press, 2006. P. 567–586.
- Jarosewich E.* Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses // Meteoritics. 1990. V. 25. P. 323–337.
- Keil K., Stöffler D., Love S.G., Scott E.R.D.* Constraints on the role of impact heating and melting in asteroids // Meteorit. and Planet. Sci. 1997. V. 32. P. 349–363.
- Keil K.* Thermal alteration of asteroids: Evidence from meteorites // Planet. and Space Sci. 2000. V. 48. P. 887–903.
- 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.
- Mao H.K., Bell P.M.* Disproportionation equilibrium in iron-bearing systems at pressures above 100 kbar with applications to chemistry of the Earth's mantle // Energetics of Geological Processes / Eds Saxena S.K., Bhattacharji S. Springer-Verlag, 1977. P. 237–249.
- Melosh H.J.* Impact cratering: A geologic process. N.-Y.: Oxford Univ. Press, 1989. 245 p.
- Morrison D., Zellner B.* Polarimetry and radiometry of the asteroids // Asteroids / Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press, 1979. P. 1090–1097.
- 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.
- Petit J.-M., Morbidelli A., Chambers J.* The primordial excitation and clearing of the asteroid belt // Icarus. 2001. V. 153. P. 338–347.
- Pierazzo E., Melosh H.J.* Hydrocode modeling of oblique impacts: The fate of the projectile // Meteorit. and Planet. Sci. 2000. V. 35. P. 117–130.
- Ryan E.V., Melosh H.J.* Impact fragmentation: From the laboratory to asteroids // Icarus. 1998. V. 133. P. 1–24.
- Rivkin A.S., Howell E.S., Lebofsky L.A., et al.* The nature of M-class asteroids from 3- $\mu$ m observations // Icarus. 2000. V. 145. P. 351–368.
- Rubin A. E.* Mineralogy of meteorite groups // Meteoritics and Planet. Sci. 1997. V. 32. P. 231–247.
- Scott E.R.D., Keil K., Stöffler D.* Shock metamorphism of carbonaceous chondrites // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1992. V. 56. P. 4281–4293.
- 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.
- Wasserman A.A., Melosh H.J.* Chemical reduction of impact processed materials // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXII. Houston, 2001. Abstract № 2037.