

УДК 523.44

ОЦЕНКА СОСТАВА ВЕЩЕСТВА И ОБНАРУЖЕНИЕ СУБЛИМАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ АСТЕРОИДОВ 145 АДЕОНЫ, 704 ИНТЕРАМНИИ, 779 НИНЫ И 1474 БЕЙРЫ

© 2016 г. В. В. Бусарев^{a, b}, С. И. Барабанов^b, В. Б. Пузин^b

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Астрономический ин-т им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Москва, Россия

^bИнститут астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

e-mail: busarev@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 09.11.2015 г.

Спектрофотометрические наблюдения в диапазоне 0.35–0.92 мкм 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры, астероидов близких примитивных типов, позволили нам обнаружить в их спектрах отражения похожие минералогические полосы поглощения с центрами у 0.38, 0.44 и 0.67–0.71 мкм. На этих же астероидах мы впервые зарегистрировали спектральные признаки одновременной сублимационной активности (наличие максимумов в спектрах отражения у ~0.35–0.60 мкм у Адеоны, Интерамнии и Нины и вблизи ~0.55–0.75 мкм — у Бейры), которую мы связываем с их малыми гелиоцентрическими расстояниями и, соответственно, с высокой инсоляцией поверхности. Изучение вероятных образцов-аналогов дало возможность по указанным полосам поглощения осуществить идентификацию в веществе этих астероидов Fe³⁺ и Fe²⁺. В качестве аналогов нами были использованы образцы углистых хондритов — Оргуэль (С1), Мигеи (СМ2), Мурчисон (СМ2) и Борискино (СМ2), а также гидросиликаты группы серпентина. Лабораторное изучение образцов низкожелезистых (<2 мас. % FeO) магнетиальных серпентинов показало, что эквивалентная ширина имеющейся в их спектрах отражения полосы поглощения с центром у 0.44–0.46 мкм имеет высокую корреляцию с содержанием Fe³⁺ в октаэдрической и тетраэдрической координациях. Сделан вывод, что эта полоса поглощения может быть использована как качественный индикатор наличия Fe³⁺ в веществе астероидов и других твердых небесных тел. Сравнение параметров спектральных деталей перечисленных образцов-аналогов и астероидов показывает, что силикатная компонента их поверхностного вещества, по-видимому, представляет собой смесь гидратированных и окисленных соединений, включающих окислы и гидроокислы двух- и трехвалентного железа, а также углисто-хондритового материала. В то же время сублимационная активность Адеоны, Интерамнии, Нины и Бейры при высоких поверхностных температурах указывает на значительное содержание в их веществе водяного льда. Это противоречит ранее сложившимся представлениям об астероидах С- и близких к ним типов как о телах, включающих воду только в связанном состоянии. Кроме того, одновременность процесса сублимации на четырех телах примитивных типов на малых гелиоцентрических расстояниях может быть признаком массового характера этого явления на астероидах Главного пояса.

Ключевые слова: астероиды, спектр отражения, минералогия, сублимация льдов

DOI: 10.7868/S0320930X16040022

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, земная атмосфера имеет наиболее высокую прозрачность в диапазоне 0.38–1.1 мкм (см., например, Уокер, 1990). Это спектральное “окно” наиболее часто используется для спектрофотометрии небесных тел, включая астероиды. Но даже в этом диапазоне преимущественно обладают телескопы, расположенные в высокогорных обсерваториях, поскольку они вынесены за турбулентный приземный слой атмосферы, создающий наибольшие погрешности при наблюдениях. На одном из них, установленном на высоте 3150 м над уровнем моря, 2-м телескопе Терскольского

филиала ИНАСАН, были получены обсуждаемые здесь результаты. Такое положение телескопа расширяет используемый спектральный диапазон в коротковолновую сторону до ~0.35 мкм и позволяет значительно повысить отношение сигнал/шум.

Учитывая огромное число уже известных астероидов (около 500000) и ограничения на объем передаваемых данных с борта любого космического аппарата, систематические исследования этих тел могут быть выполнены только с помощью наземных астрономических инструментов. Причем дальнейший прогресс в изучении астероидов наземными методами может быть достигнут

не только путем увеличения количества исследуемых объектов, но и с помощью повышения точности спектральных измерений. Качественные спектры отражения астероидов содержат не только информацию о минеральном составе их вещества, но и о валентных состояниях железа и других спектрально-активных переходных металлов, указывающих на физико-химические условия формирования вещества и его последующей эволюции. Важное значение имеют также комплексные лабораторные исследования минералов, окислов, гидроксидов и других известных и искусственных соединений, которые углубляют и расширяют наши знания о характерных спектральных особенностях природных материалов и о квантовых механизмах возникновения этих особенностей. Как следует из последних оценок специалистов (см., например, Vernazza и др., 2015), пока только ~1/3 астероидного вещества может быть представлено в метеоритных коллекциях.

НАБЛЮДЕНИЯ

В сентябре 2012 г. на 2-м телескопе с призменным ПЗС-спектрометром (WI CCD 1240 × 1150 пикс.) Терскольского филиала ИНАСАН в диапазоне 0.35–0.90 мкм с разрешающей силой $R \approx 100$ была выполнена спектрометрия астероидов Главного пояса 145 Адеоны, 704 Интрамнии, 779 Нины и 1474 Бейры. В качестве стандарта и солнечного аналога использовалась звезда HD 10307 (G1.5V) (Hardorp, 1980). В период наблюдений фазовые углы 145 Адеоны, 704 Интрамнии, 779 Нины и 1474 Бейры составляли соответственно 14, 21, 18 и ~24°. Эфемериды и другие наблюдательные параметры астероидов приведены в табл. 1 на средние моменты всемирного времени их регистрации. Обработка ПЗС-данных проведена с использованием стандартных процедур и спектрального программного пакета DECH (Галазудинов, 1992). Калибровка длин волн осуществлена по бальмеровским линиям водорода в спектре звезды α Peg (B9III). Регистрация спектров каждого астероида осуществлялась в интервалах времени от 1 до 5 ч. Расчет спектров отражения выполнен по общепринятой методике (см., например, Бусарев, 1999). В целом, относительные средне-квадратические ошибки в центре используемого спектрального диапазона составляют 1–2% и находятся в пределах от 7 до 15% на его границах. Кроме того, в табл. 1 для каждого полученного астероидного спектра указано среднее значение отношения сигнал/шум и другие параметры. На рис. 1–4 показаны усредненные и нормированные спектры отражения рассматриваемых астероидов (на 0.55 мкм), а также имеющиеся (опубликованные) спектральные данные о них, полученные другими авторами.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

145 Адеона. Этот астероид имеет средний размер 151.14 км и геометрическое альbedo 0.06 согласно данным, полученным на ИСЗ WISE (Masiero и др., 2014), период вращения 15.071 ч (Harris и др., 2012), а также тип “С” (Tholen, 1989) или “Ch” (Bus, Binzel, 2002b), что определяет его низкотемпературную минералогию (см., например, Gaffey и др., 1989). Дополнительный индекс “h” в обозначении таксономического типа Адеоны означает, что в спектре отражения присутствует полоса поглощения с центром у 0.7 мкм, являющаяся признаком наличия в веществе гидросиликатов (Bus, Binzel, 2002a; 2002b). Она порождается интервалентным переносом заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ между соседними катионами железа с разной валентностью (см., например, Платонов, 1976; Бахтин, 1985; Burns, 1993). Это подтверждается и полученным нами средним (для всей наблюдательной ночи) нормированным спектром отражения Адеоны (рис. 1а), на котором указанная полоса поглощения является наиболее сильной, а ее относительная интенсивность достигает ~32%. На этом же спектре астероида есть и две более слабые полосы — у 0.40–0.47 мкм (с относительной интенсивностью ~10%) и у 0.36–0.39 мкм (с относительной интенсивностью ~5%). Как следует из экспериментальных и теоретических исследований окислов, гидроксидов и гидросиликатов, полосы у 0.36–0.39 мкм и 0.40–0.47 мкм могут быть результатами электронных переходов между уровнями ${}^6A_1({}^6S) \rightarrow {}^4E({}^4D)$ и ${}^6A_1({}^6S) \rightarrow {}^4T_2({}^4G)$, соответственно, порождаемыми в кристаллической решетке магнитно-взаимодействующими парами соседних катионов $Fe^{3+}-Fe^{3+}$ (или $Fe^{2+}-Fe^{3+}$) (Rossman, 1975; Sherman, 1985; Sherman, Waite, 1985; Бахтин, 1985; Хоменко, Платонов, 1987). Но полоса поглощения у 0.36–0.39 мкм на нашем спектре Адеоны сопоставима с уровнем шума. Сравнение спектра отражения Адеоны с аналогичными данными других авторов (рис. 1б) показывает, что полосы поглощения вблизи 0.36–0.39 мкм и 0.40–0.47 мкм у этого астероида нами обнаружены впервые, возможно, благодаря высокогорному положению используемого телескопа и, следовательно, доступности более коротковолнового спектрального диапазона. Полоса поглощения у 0.43 мкм была зарегистрирована ранее в спектрах нескольких других астероидов примитивных типов (Vilas и др., 1993). В двух работах (McCord, Chapman, 1975; Fornasier и др., 2014) сообщается о наличии в спектрах отражения Адеоны значительной полосы поглощения (~10%) с центром у 0.68–0.70 мкм (см. вставку “А” на рис. 1б). Эта полоса поглощения, вызываемая переносом заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ (Платонов, 1976; Бахтин, 1985; Burns, 1993), уже была обнаружена в спектрах многих астероидов примитивных типов (McCord, Chapman, 1975;

Таблица 1. Эфемериды и другие наблюдательные параметры астероидов

145 Адеона												
Дата	Среднее всемир. время (ч м с)	Прямое восхожд. (h m)	Склонение (° ')	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Долгота (°)	Фазовый угол (°)	I (^m)	Высота над горизонтом (°)	Время экспоз. (с)	Возд. масса	Среднее отнош. сигнал/шум
2012 09 19	22 54 00	02 29.58	-01 38.1	1.843	2.692	140.1	13.9	12.4	43.5	1200	1.451	3
2012 09 19	23 15 00	02 29.57	-01 38.1	1.843	2.692	140.1	13.9	12.4	44.5	1200	1.425	3.2
Звезда – солнечный аналог HD10307: в $t = 01^h 32^m$ всемирного времени высота над горизонтом 67° , воздушная масса 1.086												
704 Ингеранния												
Дата	Среднее всемир. время (ч м с)	Прямое восхожд. (h m)	Склонение (° ')	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Долгота (°)	Фазовый угол (°)	I (^m)	Высота над горизонтом (°)	Время экспоз. (с)	Возд. масса	Среднее отнош. сигнал/шум
2012 09 13	21 11 00	03 24.64	+39 00.2	2.080	2.616	111.1	21.0	10.9	47	600	1.366	5
2012 09 13	21 22 00	03 24.64	+39 00.2	2.080	2.616	111.1	21.0	10.9	49	600	1.324	5.1
2012 09 13	21 33 00	03 24.64	+39 00.3	2.080	2.616	111.1	21.0	10.9	51	600	1.286	4.9
2012 09 13	21 44 00	03 24.65	+39 00.3	2.080	2.616	111.1	21.0	10.9	53	600	1.252	5
2012 09 13	21 55 00	03 24.65	+39 00.4	2.080	2.616	111.1	21.0	10.9	55	600	1.220	5
Звезда – солнечный аналог HD10307: в $t = 19^h 25^m$ всемирного времени высота над горизонтом 48° , воздушная масса 1.345												
779 Нина												
Дата	Среднее всемир. время (ч м с)	Прямое восхожд. (h m)	Склонение (° ')	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Долгота (°)	Фазовый угол (°)	I (^m)	Высота над горизонтом (°)	Время экспоз. (с)	Возд. масса	Среднее отнош. сигнал/шум
2012 09 13	17 51 00	00 53.11	+32 40.7	1.289	2.149	138.5	18.1	11.0	35.5	300	1.719	4.4
2012 09 13	17 57 00	00 53.11	+32 40.7	1.289	2.149	138.5	18.1	11.0	36.5	300	1.678	4.5
2012 09 13	18 03 00	00 53.10	+32 40.7	1.289	2.149	138.5	18.1	11.0	37.5	300	1.640	4.6
2012 09 13	18 09 00	00 53.10	+32 40.7	1.289	2.149	138.5	18.1	11.0	38.5	300	1.604	4.6
2012 09 13	18 15 00	00 53.10	+32 40.7	1.289	2.149	138.5	18.1	11.0	39.5	300	1.570	5.5
2012 09 13	20 13 00	00 53.04	+32 41.0	1.289	2.149	138.6	18.0	11.0	61.5	300	1.138	5.5
2012 09 13	20 19 00	00 53.04	+32 41.0	1.289	2.149	138.6	18.0	11.0	62.5	300	1.127	5.3
2012 09 13	20 25 00	00 53.03	+32 41.0	1.289	2.149	138.6	18.0	11.0	63.5	300	1.117	5.4
2012 09 13	20 31 00	00 53.03	+32 41.1	1.288	2.149	138.6	18.0	11.0	64.5	300	1.108	5.5
2012 09 13	20 37 00	00 53.03	+32 41.1	1.288	2.149	138.6	18.0	11.0	65.5	300	1.099	4.3
2012 09 13	22 44 00	00 52.97	+32 41.4	1.288	2.149	138.7	18.0	11.0	79	900	1.019	5.3
2012 09 13	23 00 00	00 52.96	+32 41.4	1.288	2.149	138.7	18.0	11.0	78	900	1.022	5.1
Звезда – солнечный аналог HD10307: в $t = 19^h 25^m$ всемирного времени высота над горизонтом 48° , воздушная масса 1.345												

Таблица 1. Окончание

1447 Бейра												
Дата	Среднее всемир. время (ч м с)	Прямое восхожд. (h m)	Склонение (° ')	Δ (а. е.)	r (а. е.)	Долгота (°)	Фазовый угол (°)	$V^{(m)}$	Высота над горизонтом (°)	Время экспоз. (с)	Возд. масса	Среднее отнош. сигнал/шум
2012 09 18	20 11 00	22 32.96	+32 59.6	0.651	1.567	141.4	23.6	13.8	78.5	1200	1.021	12.7
2012 09 18	20 32 00	22 32.92	+33 00.0	0.651	1.567	141.4	23.6	13.8	76.5	1200	1.028	14.7
2012 09 18	20 53 00	22 32.88	+33 00.4	0.651	1.567	141.4	23.6	13.8	74	1200	1.040	13.2
2012 09 18	21 14 00	22 32.85	+33 00.7	0.651	1.567	141.4	23.6	13.8	70.5	1200	1.061	14.3
2012 09 18	21 35 00	22 32.81	+33 01.1	0.651	1.566	141.4	23.6	13.8	67	1200	1.086	11.5
Звезда — солнечный аналог HD 10307: в $t = 01^h 30^m$ всемирного времени высота над горизонтом 63° , воздушная масса 1.122												
2012 09 19	17 25 00	22 30.89	+33 22.5	0.650	1.563	140.8	23.9	13.8	61	1200	1.143	11.3
2012 09 19	17 46 00	22 30.85	+33 22.9	0.650	1.563	140.8	23.9	13.8	64.5	1200	1.108	12.3
2012 09 19	18 07 00	22 30.82	+33 23.2	0.649	1.563	140.8	24.0	13.8	68.5	1200	1.075	8.7
2012 09 19	18 28 00	22 30.78	+33 23.6	0.649	1.563	140.8	24.0	13.8	72	1200	1.051	8.2
2012 09 19	18 49 00	22 30.75	+33 24.0	0.649	1.563	140.8	24.0	13.8	75.5	1200	1.033	12.1
2012 09 19	19 39 00	22 30.66	+33 24.9	0.649	1.562	140.8	24.0	13.8	80	1200	1.015	11.2
2012 09 19	20 00 00	22 30.63	+33 25.3	0.649	1.562	140.8	24.0	13.8	80	1200	1.015	7.2
2012 09 19	20 21 00	22 30.59	+33 25.6	0.649	1.562	140.8	24.0	13.8	77.5	1200	1.024	6.5
2012 09 19	21 03 00	22 30.52	+33 26.4	0.649	1.562	140.7	24.0	13.8	75	1200	1.035	7.7
Звезда — солнечный аналог HD 10307: в $t = 01^h 30^m$ всемирного времени высота над горизонтом 61° , воздушная масса 1.143												

Примечания. Δ и r — геоцентрическое и теллюцентрическое расстояния астероида, V — его видимая звездная величина. Все расчеты эфемерид выполнены с помощью программы на сайте Центра Малых Планет (IAU MPC, <http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>).

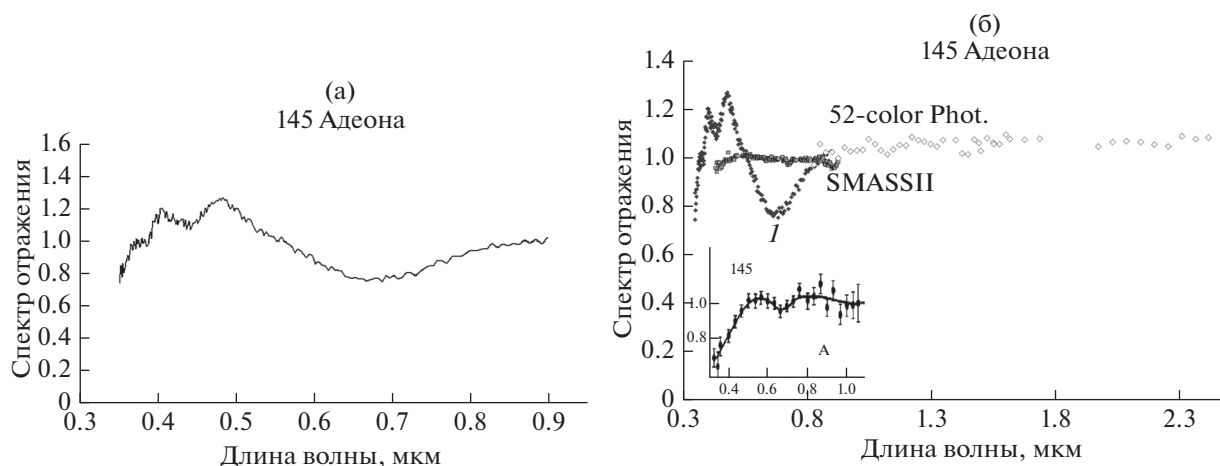


Рис. 1. Нормированный (на 0.55 мкм) спектр отражения 145 Адеона (а) и его сравнение с данными других авторов (б): SMASSII (Bus, Binzel, 2003a), с 52-цветной фотометрией (Bell и др., 1995) и данными McCord и Charman (1975) (вставка “А”); полученный нами спектр отражения Адеоны обозначен цифрой “I”.

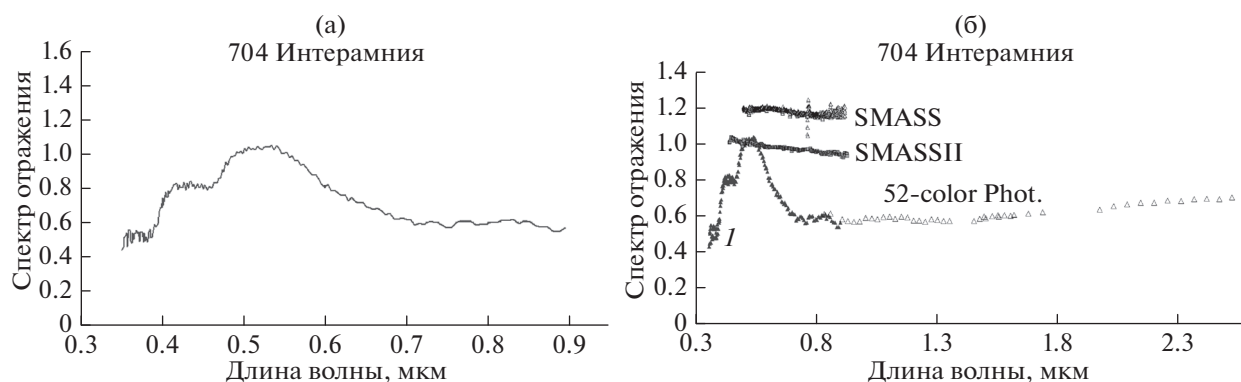


Рис. 2. Нормированный спектр отражения 704 Интерамнии (а) и его сравнение с данными других авторов (б): SMASS (Lazzaro и др., 2004), SMASSII (Bus, Binzel, 2003b) и с 52-цветной фотометрией (Bell и др., 1995); полученный нами спектр отражения Интерамнии обозначен цифрой “I”. Спектр отражения SMASS произвольно сдвинут вдоль вертикальной оси для удобства сравнения.

Vilas, Gafey, 1989; Vilas и др., 1994; Bus, Binzel, 2002a; Fornasier и др., 2014). Но ее относительная интенсивность на полученном нами спектре отражения Адеоны в несколько раз выше, чем у перечисленных авторов (см. рис. 1б), что, по-видимому, связано с резким ростом отражательной способности Адеоны в диапазоне 0.35–0.55 мкм (рис. 1а, 1б). Вернемся к обсуждению этого факта ниже и покажем, что указанная особенность вполне реальна и является общей для спектров отражения всех рассматриваемых в статье астероидов.

704 Интерамния. Средний диаметр и геометрическое альbedo Интерамнии – 307.31 км и 0.08 согласно данным ИСЗ WISE (Masiero и др., 2014). Астероид вращается с периодом 8.727 ч (Harris и др., 2012). Его установленные спектральные типы “F” (Tholen, 1989) или “B” (Bus, Binzel, 2002b), для которых характерна широкая полоса поглощения на длинах волн более ~0.5 мкм в комбинации с

общим отрицательным градиентом. Представленный на рис. 2а нормированный спектр отражения Интерамнии является средним из пяти спектров, полученных в течение ~3/4 ч, что соответствует ~0.08 ее периода вращения (табл. 1). Этот спектр Интерамнии похож на спектр Адеоны, поскольку на нем также имеются полосы поглощения с близкой интенсивностью с центрами у 0.38, 0.46 и 0.70 мкм (рис. 1а, 2а).

Соответственно, этим особенностям может быть дана аналогичная интерпретация. Сравнение со спектральными данными об Интерамнии других авторов показало, что нами, вероятно, впервые зарегистрированы полосы поглощения у 0.38 и 0.46 мкм (рис. 2а). Однако, как и в случае с Адеоной, значительный максимум в интервале ~0.35–0.60 мкм резко отличает его от спектров, полученных другими авторами (рис. 2а) (Lazzaro и др., 2004; Bus, Binzel, 2003b). Присутствие такого максимума вызывает сомнения в реальности

столь высокой интенсивности полосы поглощения с центром у 0.70 мкм Интерамнии. Но вернемся к этому вопросу позже.

779 Нина. Диаметр Нины составляет 80.57 км и геометрическое альbedo – 0.16 по данным ИС3 WISE (Masiero и др., 2014). Астероид вращается с периодом 11.186^h (Harris и др., 2012). По спектральным характеристикам его таксономический тип был определен ранее как “М” (Tholen, 1989), а затем – как “Х” (Bus, Binzel, 2002b). В то же время радиолокация Нины показала, что астероид, вероятно, неоднороден по составу вещества. Полученные значения его радарного альbedo – 0.16 и 0.50 (Shepard и др., 2010) – характерны либо для примитивного, либо для железо-каменного состава, соответственно. В то же время, величины радарного альbedo для Адеоны и Интерамнии существенно ниже (0.03 и 0.04) и однозначно указывают на низкотемпературный состав вещества этих тел (Magri, 2004). Следует подчеркнуть, что отмеченные различия в составе вещества рассматриваемых тел проявляются и в вышеприведенных значениях их геометрического альbedo (0.06, 0.08 и 0.16, соответственно). Всего нами было измерено 12 спектров отражения Нины на протяжении примерно половины периода вращения (табл. 1). При общем положительном градиенте мы обнаружили некоторые вариации их формы и наклона во всем спектральном диапазоне. На рис. 3а представлены три нормированных спектра отражения (1–3), которые получены путем усреднения последовательных 5, 5 и 2 спектров, соответственно (согласно табл. 1).

Учитывая значительное сходство спектров 2 и 3 на рис. 3а, мы их также усреднили и результирующий спектр отражения астероида (обозначенный цифрой 1, рис. 3б), считая его наиболее представительным, сравнили с аналогичными характеристиками Нины, полученными другими авторами (рис. 3б) (Lazzaro и др., 2004; Bus, Binzel, 2003c; Ockert-Bell, 2011). Обращает на себя внимание близкое сходство спектра 1 (рис. 3б) со спектрами отражения Адеоны и Интерамнии, особенно наличием полос поглощения с центрами у 0.39 и 0.46 мкм и резкого максимума в диапазоне 0.40–0.70 мкм. Полосы поглощения у 0.39 и 0.46 мкм в спектре Нины зарегистрированы нами, по-видимому, также впервые по той же причине ограниченности спектрального диапазона в коротковолновой области в данных из других источников. Интерпретация этих полос поглощения в спектре Нины может быть аналогична той, что дана выше при обсуждении спектров отражения Адеоны. Признаки слабой, но широкой, полосы поглощения с центром у 0.70 мкм имеются только на спектре Нины, полученном Лазаро и другими (Lazzaro и др., 2004) (рис. 3б). Кажущаяся высокая относительная интенсивность этой полосы поглощения при сравнении наших и IRTF-данных (Ockert-Bell, 2011) (до

~32%) (рис. 3б) вызывает сомнения по причине резкого максимума в интервале ~0.40–0.70 мкм, как и в спектрах отражения Адеоны и Интерамнии.

Таким образом, рассмотрение полученных нами спектров отражения Адеоны, Интерамнии и Нины позволило, с одной стороны, установить их сходство между собой, а с другой стороны, – отличие от предшествующих данных вблизи коротковолновой границы. Вообще говоря, обнаруженный максимум в коротковолновой области не характерен для спектров отражения астероидов силикатного состава, имеющих, как правило, нейтральный или положительный градиент континуума (см., например, Bus, Binzel, 2002a). Интерамния и Нина в период их наблюдений (13–19 сентября 2012 г., табл. 1) находились вблизи их перигелийных расстояний от Солнца, то есть тогда, когда температура их поверхности была наиболее высокой, а Адеона – на среднем гелиоцентрическом расстоянии, приближаясь к Солнцу и также испытывая рост температуры. Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что из рассматриваемых астероидов Адеона, вероятно, имеет наиболее примитивный состав вещества с наибольшим количеством летучих, как следует из значений ее геометрического и радиолокационного альbedo. Можно предположить, что зарегистрированный необычный максимум в спектрах отражения Адеоны, Интерамнии и Нины является результатом рассеяния солнечного света в оболочке или коме из газообразных H₂O и CO₂ и частиц пыли микронного размера, образовавшихся при сублимации льдов. Действительно, с этим согласуются результаты моделирования спектра отражения астероида, окруженного кометоподобной комой из частиц субмикронного размера, состоящих из водяного льда и толинов (Carvano, Lorenz-Martins, 2009) (рис. 4). Видно, что форма такого модельного спектра (рис. 4, “Total”) очень похожа на полученные нами спектры отражения Адеоны, Интерамнии и Нины (рис. 1–3). Остановимся на этом подробнее в разделе “Дискуссия”.

1474 Бейра. Этот астероид является Марскроссером, т.е. пересекает орбиту Марса, имеет период вращения 4.184 ч и спектральный тип “В” (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=1474>). Поскольку геометрическое альbedo (как и диаметр) Бейры пока точно не измерено, то совпадение или сходство спектральных типов Интерамнии и Бейры может быть использовано для приближенной оценки геометрического альbedo последней. Итак, если считать, что геометрическое альbedo Бейры $p_v \sim 0.08$, а абсолютная звездная величина $H_v = 12.66^m$ (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=1474>), то ее диаметр можно найти по используемой в планетной фотометрии формуле (см., например, Бусарев, 2011):

$$\lg D = 3.128 - 0.5 \lg p_v - 0.2 H_v, \quad (1)$$

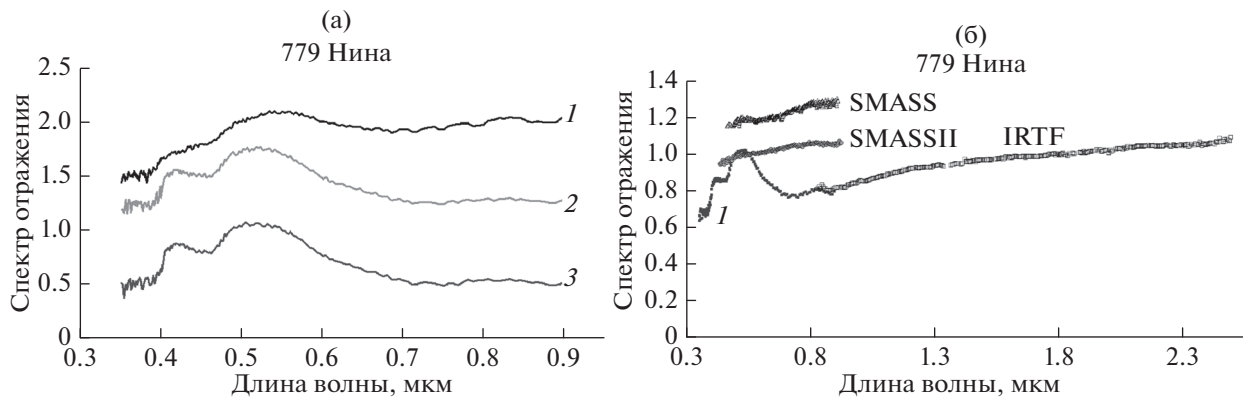


Рис. 3. Нормированные спектры отражения 779 Нины, полученные на интервале времени, соответствующем $\sim 1/2$ периода вращения (спектры 1 и 2 произвольно сдвинуты вдоль вертикальной оси) (а). Сравнение среднего нормированного спектра отражения Нины с данными других авторов (б): SMASS (Lazzaro и др., 2004), SMASSII (Bus, Binzel, 2003с) и IRTF (Ockert-Bell, 2011); полученный нами спектр отражения Нины обозначен цифрой “1”. Спектр отражения SMASS произвольно сдвинут вдоль вертикальной оси.

откуда $D = 13.95$ км. С учетом более ранней оценки диаметра Бейры ~ 7 км (Gehrels, 1972) получаем предполагаемые пределы ее размеров как 7–14 км.

Нормированные спектры отражения (рис. 5, кривые 1 и 2; спектр 1 смещен относительно спектра 2 на 0.4 единицы вверх для удобства сравнения), являющиеся средними для двух последовательных ночей (см. табл. 1), показывают, что у Бейры наряду с ростом отражательной способности в коротковолновой области (< 0.55 мкм) имеется резкий максимум в центре видимого диапазона, у ~ 0.55 – 0.75 мкм. Сразу отметим, что во время наблюдений Бейры, как и вышерассмотренные астероиды, находилась вблизи перигелийного расстояния и приближалась к Солнцу. Перечисленные наиболее значительные особенности в спектрах отражения Бейры мы также связываем с процессом образования комы из сублимированных частиц преимущественно H_2O и, возможно, пылевых частиц несколько большего размера. Не исключено, что на последнее указывает положение основного максимума рассеяния на более длинных волнах по сравнению со спектрами Адеоны, Интерамнии и Нины. Возникает еще один интересный вопрос: может ли большая интенсивность центрального максимума на спектре Бейры 19.09.2012 (обозначенном цифрой 2 на рис. 5) быть связана с более высокой температурой ее поверхности? Как будет показано ниже, уменьшение гелиоцентрического расстояния астероида за сутки составляло по отношению к среднему всего $\sim 0.3\%$, что могло обеспечить повышение температуры поверхности этого астероида в подсолнечной точке всего на 0.4° . Поэтому более правдоподобным объяснением нарастания максимума рассеяния на спектре отражения Бейры 19.09.2012 г. может быть неоднородность комы, появляющаяся из-за переменной интенсивно-

сти сублимации льдов с разных участков поверхности астероида. На спектрах Бейры имеются также слабые полосы поглощения у 0.41 – 0.43 мкм (рис. 5), близкие к полосе у 0.44 мкм, найденной в спектрах отражения Адеоны, Интерамнии и Нины, по-видимому, той же природы. Весьма вероятно, что эти особенности возникают в поверхностном веществе Бейры благодаря Fe^{3+} , но искажены рассеянием света в коме. Если не принимать во внимание центральный максимум, общая форма спектров отражения Бейры (рис. 5) является вогнутой, что является признаком широкой полосы

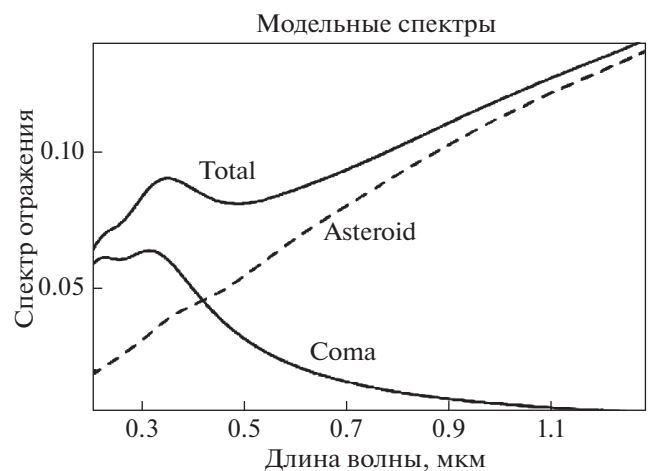


Рис. 4. Модельные спектры отражения астероида, покрытого слоем 10-мкм частиц из смеси водяного льда и толинов (“Asteroid”), сферической комы вокруг астероида, состоящей из частиц 0.2-микронного размера из того же материала при их концентрации $2e + 16$ м $^{-3}$ (“Coma”), и комбинированной системы (“Total”). Воспроизведено с разрешения авторов после незначительных изменений (Carvano, Lorenz-Martins, 2009).

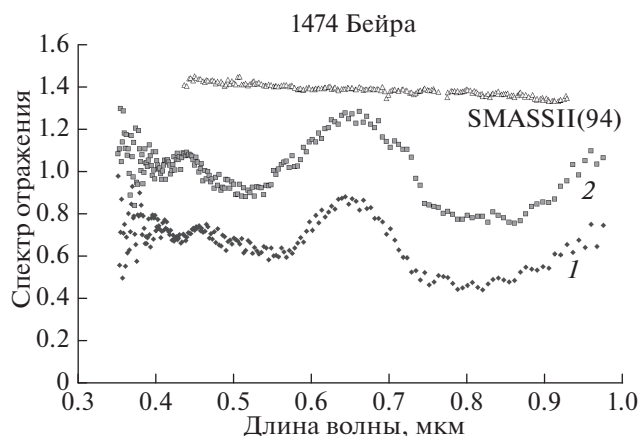


Рис. 5. Нормированные спектры отражения 1474 Бейры (1 и 2, усредненные по данным на 18.09.12 и 19.09.12, соответственно) и их сравнение со спектром отражения астероида (SMASSII), полученным в 1994 г. примерно на том же гелиоцентрическом расстоянии (Bus, Binzel, 2003d). Спектры 1 и SMASSII(94) произвольно сдвинуты вдоль вертикальной оси.

поглощения во всем видимом диапазоне (с центром у 0.7–0.8 мкм) и, соответственно, — присутствия в поверхностном веществе значительного количества гидратированных силикатов. Рассмотрим это подробнее в следующем разделе.

ИЗУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ-АНАЛОГОВ

С учетом установленных спектральных типов астероидов с преобладающей низкотемпературной минералогией (см., например, Gaffey и др., 1989; Clark и др., 2011), вероятными аналогами их вещества являются гидратированные силикаты и углистые хондриты. В качестве первых мы использовали образцы магнезиальных серпентинов и хлоритов, а вторых — образцы углистых хондритов. Следует отметить, что полученные нами результаты согласуются с проведенными спектральными исследованиями серпентинов и образцов углистых хондритов (King, Clark, 1989; Calvin, King, 1997; Hiroi, Zolensky, 1999; Clark и др., 2011; Cloutis и др., 2011a; 2011b). Основными результатами наших ранее опубликованных исследований ряда образцов серпентинов, хлоритов и четырех углистых хондритов (Оргюэль (C1), Мигеи (CM2), Мурчисон и Борискино (CM2)) (Busarev, Taran, 2002; Busarev и др., 2004; 2008; 2015), сводятся к следующему.

Как подтверждение вывода о преобладании гидросиликатов в матрице углистых хондритов (см., например, Dodd, 1981) у тех и других оказались похожие спектры отражения — с плоской или вогнутой формой во всем видимом и ближнем ИК-диапазонах (рис. 6 и 7). Такая форма определяется наличием одной широкой или двух по-

лос поглощения, вызываемых уже упоминавшимся процессом интервалентного переноса заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ в гидросиликатах (Платонов, 1976; Бахтин, 1985; Burns, 1993). Кроме того, у низкожелезистых (не более 2 мас. % FeO/Fe_2O_3) магнезиальных серпентинов нами обнаружена весьма интенсивная (до 25% по отношению к континууму) полоса поглощения с центром у 0.44 мкм, имеющая высокую корреляцию с содержанием в образцах Fe^{3+} (в октаэдрической и тетраэдрической координациях) (Busarev и др., 2008; 2015). Необходимо отметить, что такой тип серпентинов характерен для ранней стадии серпентинизации (см., например, Deeg и др., 1963; Brearley, 2006), которая может быть наиболее распространенной в космических условиях. Поскольку эта полоса поглощения является слабой или отсутствует при более высоких содержаниях окислов железа, нами сделан вывод о том, что она может быть только качественным индикатором Fe^{3+} при спектральных исследованиях твердых небесных тел (Busarev и др., 2015). В то же время этой полосы поглощения нет в спектрах отражения изученных нами углистых хондритов, но в спектре образца Оргюэль есть слабая полоса поглощения поблизости — у 0.45–0.57 мкм (рис. 6) (Busarev, Taran, 2002). В данном случае, по-видимому, подтверждается установленное нами экспериментально отсутствие полосы поглощения с центром у 0.44 мкм при высоком содержании в веществе окислов железа. В частности, электронно-зондовые измерения показали, что в метеорите Оргюэль среднее содержание FeO/Fe_2O_3 составляет 24.35 мас. %, а в метеорите Мурчисон — 33.49 мас. % (Calvin, King, 1997). Очевидно, изученные нами образцы углистых хондритов не вполне соответствуют составу рассматриваемых астероидов. И здесь уместно еще раз напомнить о том, что по причине крайней неустойчивости наиболее примитивного метеоритного вещества, которое в основном и представляет собой фрагменты астероидов с низкотемпературной минералогией, в земных метеоритных коллекциях может быть представлена только ~1/3 астероидной субстанции (Vernazza и др., 2015).

Таким образом, сравнение полученных спектров отражения Адеоны, Ингерамнии, Нины и Бейры и образцов-аналогов на качественном уровне свидетельствует о том, что силикатная компонента их поверхностного вещества, по-видимому, представляет собой смесь гидратированных и окисленных соединений, включающих окислы и гидроокислы двух- и трехвалентного железа, а также углисто-хондритового материала. Последний может быть либо менее обогащен окислами железа, либо содержаться в меньшей пропорции, чем низкожелезистые гидросиликаты более поздней генерации.

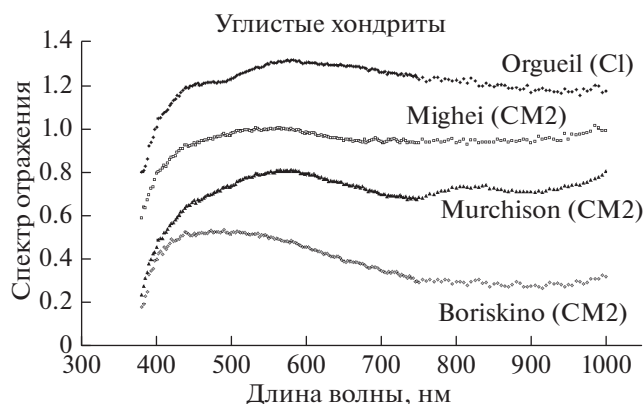


Рис. 6. Лабораторные нормированные спектры отражения (на длине волны 550 нм) четырех раздробленных образцов (крупность частиц ≤ 0.25 мм) метеоритов углистых хондритов Оргюэль (Orgueil), Мигей (Mighei), Мурчисон (Murchison) и Борискино (Boriskino) (рядом с названиями указаны химические группы метеоритов) (Busarev, Taran, 2002). Спектры произвольно смещены друг относительно друга вдоль вертикальной оси для удобства сравнения.

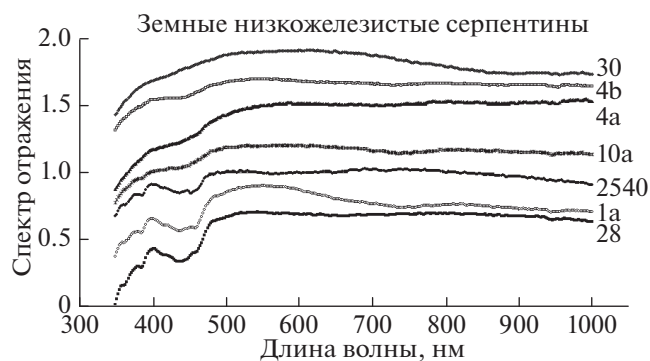


Рис. 7. Лабораторные нормированные (на длине волны 550 нм) спектры отражения семи раздробленных образцов (частицы ≤ 0.25 мм) низкожелезистых серпентинитов (номера образцов указаны рядом с кривыми). Спектры смещены друг относительно друга вдоль вертикальной оси для удобства сравнения и расположены в порядке нарастания интенсивности полосы поглощения у 400–480 нм (сверху–вниз) (Busarev и др., 2015).

ДИСКУССИЯ

Для достижения более благоприятных условий наблюдения Интерамнии, Нины и Бейры были проведены вблизи их перигелиев, а Адеоны – на среднем гелиоцентрическом расстоянии, когда она приближалась к Солнцу. Как уже говорилось, наличие необычных резких максимумов в спектрах отражения этих астероидов может быть интерпретировано как проявление рассеяния солнечного света в слабой коме из газообразных H_2O и CO_2 , а также микронных частиц льда и силикатной пыли (увлекаемых с астероидной поверхности при истечении газовых составляющих), возникающей при повышении температуры на минимальных гелиоцентрических расстояниях. Если такая кома не связана со случайным ударным событием, то может возникать регулярно у примитивных и гидратированных астероидов с приближением к Солнцу. Если подобный астероид достаточно массивен и его гравитационное поле может удержать основной объем комы продолжительное время, то при охлаждении газообразных частиц комы возможен их переход в ледяное состояние, то есть десублимация.

Оценим максимальные температуры в подсолнечной точке на поверхности Адеоны, Интерамнии, Нины и Бейры. В качестве ориентира будем использовать результат измерения температуры на поверхности 21 Лютеции с помощью прибора VIRTIS с борта КА Rosetta. Эти измерения показали, что температура на Лютеции меняется в пределах 170–245 К (от полностью затененных до освещенных областей) (Coradini и др., 2011) на гелиоцентрическом расстоянии 2.715 а. е. Среди наиболее обильных вблизи планетных поверхно-

стей летучих (см., например, Dodson–Robison и др., 2009) H_2O , CO_2 и их смеси имеют самое близкое расположение тройной точки к указанному температурному диапазону. Но по сравнению с H_2O у двуокиси углерода тройная точка сдвинута на фазовой диаграмме примерно на 60 градусов ниже (Longhi, 2005; Feistel, Wagner, 2007; Fray, Schmitt, 2009 и ссылки там же). Поэтому можно ожидать, что под поверхностью примитивных астероидов имеется слой замерзших летучих соединений, в котором преобладает водяной лед, сохранившийся с момента формирования этих тел или накопившийся при выпадении более мелких ледяных объектов и пыли (см., например, Fanale, Salvail, 1989; Jewitt, Guilbert-Lepoutre, 2012). То есть в случае экскавации водяного льда на таком астероиде при ударном событии и его интенсивной сублимации при наиболее высоких температурах, вокруг него может образоваться кома из газообразных и ледяных частиц. Как известно, большинство небесных объектов (включая планеты) имеют спектры излучения примерно черного тела и эффективные температуры, описываемые законом Стефана–Больцмана. Количество солнечной электромагнитной энергии, проходящей через единичную площадку условной верхней границы земной атмосферы в подсолнечной точке (по определению – это солнечная постоянная, $C_E = L_{\text{Sun}}/4\pi r_E^2 = 1367 \text{ Вт/м}^2$, где L_{Sun} – излучательная способность Солнца, r_E – гелиоцентрическое расстояние Земли или 1 а. е.) и аналогичная величина для единичной площадки, нормальной к направлению на Солнце, находящейся на гелиоцентрическом расстоянии r (в а. е.) связаны соотношением

“обратных квадратов”: $E = C_E \cdot 4\pi r_E^2 / 4\pi r^2$. Тогда мы можем рассчитать эффективную температуру в подсолнечной точке на поверхности астероида (без учета теплопроводности) (T_{ss}), учитывая значение константы Стефана–Больцмана $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ Дж с}^{-1} \text{ м}^{-2} \text{ К}^{-4}$ (или $\text{Вт м}^{-2} \text{ К}^{-4}$) и $r_E = 1 \text{ а. е.}$

$$\begin{aligned} T_{ss} &= ((1 - p_v)C_E \times 4\pi r_E^2 / 4\pi \sigma r^2)^{1/4} = \\ &= ((1 - p_v)241.08 \times 10^8 \text{ К}^4 / r^2)^{1/4} \text{ или} \quad (2) \\ T_{ss} &= 394 \text{ К}((1 - p_v) / r^2)^{1/4}. \end{aligned}$$

Расчеты по этой формуле дают следующие температуры в подсолнечной точке на поверхности рассматриваемых астероидов в моменты наблюдений: $T_{ss,o} = 236.5 \text{ К}$ (Адеона), $T_{ss,o} = 238.6 \text{ К}$ (Интерамния), $T_{ss,o} = 257.3 \text{ К}$ (Нина) и $T_{ss,o} = 308.3 \text{ К}$ (Бейра, спектр 1) и 308.7 К (Бейра, спектр 2). Видно, что значения температур, соответствующие спектрам 1 и 2 Бейры (рис. 5) отличаются всего на 0.4° . Более длинноволновое положение пика рассеяния в спектре отражения Бейры может быть признаком наличия в окружающей коме не только ледяных, но и силикатных частиц несколько большего размера. Присутствие таких частиц в коме Бейры, возможно, связано с более интенсивным процессом сублимации при более высоких поверхностных температурах. Необходимо также отметить следующее обстоятельство. Вышеприведенные спектральные данные других авторов о рассматриваемых астероидах были зарегистрированы на больших гелиоцентрических расстояниях, за исключением спектра отражения Бейры (рис. 5, SMASS), полученного вблизи перигелийного расстояния астероида в 1994 г. и опубликованного только в 2003 г. (Bus, Binzel, 2003d). Отсутствие признаков сублимационной активности на этом спектре Бейры пока необъяснимо. Если не ставить под сомнение достоверность этих данных, то можно только предполагать, что процесс сублимации на Бейре начался позже, в результате ударного события.

Из теории Ми, описывающей рассеяние света частицами сферической формы (Mie, 1908; Hansen, Travis, 1974; Nakke, 1993), следует, что при размерах частиц намного меньше длины волны света и при отсутствии в них поглощения (как для водяного и “сухого льда” в видимой области), в коме астероида происходит рассеяние падающего света преимущественно в синей части спектра. Как известно, с уменьшением размера частиц вплоть до нанометрового (соответствующего молекулам газов) предельным случаем здесь является рэлеевское рассеяние, эффективность которого пропорциональна $\sim \lambda^{-4}$. Но основываясь на нашем предположении о том, что гипотетическая кома астероидов, вероятно, включает значительную долю микронных ледяных частиц (в основном H_2O), мы можем воспользоваться имеющи-

ми результатами численного расчета эффективности рассеяния света такими частицами (Hansen, Travis, 1974). Как показано в упомянутой работе, для частиц с показателем преломления водяного льда ($n = 1.33$) интенсивность рассеяния максимальна при величине размерного параметра $x = (2\pi\rho/\lambda) \approx 6$ или $\rho/\lambda \approx 1$, где ρ – радиус рассеивающих частиц. Из этого следует, что в данном случае средний радиус таких частиц (ρ) и спектральное положение максимума рассеяния (λ) примерно совпадают. Тогда, на основании перечисленных теоретических результатов и нашего анализа спектров отражения рассмотренных астероидов (рис. 1–3 и 5), мы можем оценить радиус ледяных (H_2O) частиц в гипотетической коме следующими средними величинами: $\sim 0.48 \text{ мкм}$ (Адеона), $\sim 0.53 \text{ мкм}$ (Интерамния) $\sim 0.52 \text{ мкм}$ (Нина) и $\sim 0.65 \text{ мкм}$ (Бейра). Здесь следует также признать, что использование нами теоретической модели Carvano–Lorenz–Martins (2009) (рис. 4) для качественной интерпретации спектров отражения астероидов Главного пояса с признаками сублимационной активности было не вполне корректным. В этой пока единственной подобного рода работе преследовалась цель описания спектральных характеристик более удаленных кометоподобных объектов, обогащенных органикой типа толинов, которые имеют сложную спектральную зависимость показателя преломления (Khare и др., 1984), что не соответствует нашему случаю.

Таким образом, на основе полученных спектров отражения и лабораторных спектральных данных мы можем выполнить оценку состава поверхностного вещества Адеоны, Интерамнии, Нины и Бейры. Как было показано, спектры отражения рассматриваемых астероидов содержат полосы поглощения с центрами у 0.38 , 0.44 и 0.67 – 0.71 мкм , которые можно связать с присутствием в веществе ионов железа Fe^{3+} или комбинации Fe^{2+} и Fe^{3+} . Сравнение параметров этих спектральных деталей в спектрах отражения Адеоны, Интерамнии, Нины и Бейры, с аналогичными параметрами у образцов серпентинитов и углистых хондритов показывает, что силикатная компонента поверхностного вещества астероидов представляет собой смесь гидратированных и окисленных соединений, включающих окислы и гидроокислы двух- и трехвалентного железа, а также углисто-хондритового материала. Важно подчеркнуть, что рассеяние отраженного от астероидов света в слабой коме из сублимированных частиц не меняет положение собственных полос поглощения астероидов, характеризующих их минералогию. Но процесс рассеяния, вероятно, искажает интенсивность этих полос поглощения, особенно – полосы с центром у 0.7 мкм , где градиент континуума спектра меняет свой знак с отрицательного на положительный.

В то же время, сублимационная активность рассматриваемых астероидов вблизи минимальных гелиоцентрических расстояний указывает на значительное содержание в их поверхностном веществе водяного льда. Такой результат, вообще говоря, противоречит ранее сложившимся представлениям об астероидах С-типа. Считается, что поскольку такие астероиды являются наиболее вероятными родительскими телами углистых хондритов (см., например, Zolensky и др., 1989; Gaffey и др., 1989; 2002), в их веществе может быть не более воды в связанном состоянии (ОН), чем содержится в этих метеоритах, т.е. примерно до 20 мас. % (Dodd, 1981; Brearley, 2006). Другими словами, эта величина и является пока известным общим количеством воды в веществе астероидов С-типа. Вопрос о том, сколько может быть воды в адсорбированном состоянии (H_2O) в углистых хондритах и веществе примитивных астероидов, остается открытым. Для ответа на него необходимы прямые измерения, которые возможно осуществить только с помощью космической техники. Из численного моделирования (Grimm, McSween, 1993) следует, что родительские тела астероидов С- и близких к ним типов должны были включать значительную ледяную компоненту и в результате распада короткоживущих изотопов (^{26}Al и др.), вероятно, испытали водную дифференциацию. Другими возможными факторами аккумуляции летучих соединений на астероидах в ранней Солнечной системе могли быть изменение активности молодого Солнца и соответствующие сдвиги границы конденсации водяного льда (“snow line”) или динамические возмущения со стороны Юпитера и связанный с этим “вброс” в Главный пояс нетипичного ледяного материала (Сафронов, Зиглина, 1991; Бусарев, 2002).

ВЫВОДЫ

Эллипсоидальность орбит астероидов Главного пояса приводит к заметным изменениям температуры поверхности этих тел и, таким образом, создает естественную возможность тестирования их вещества на присутствие летучих. Эксцентриситеты орбит у Адеоны (0.1445849) и Интерамнии (0.1542949) сравнительно невелики, а у Нины (0.2270344) и Бейры (0.4907551) – они более значительные. Тем не менее полученные результаты однозначно указывают на высокую сублимационную активность всех этих астероидов на малых или минимальных гелиоцентрических расстояниях и, следовательно, – на значительное содержание летучих соединений (в первую очередь H_2O и CO_2) в их поверхностном веществе. Необходимо подчеркнуть, что нами впервые обнаружены спектральные признаки одновременной сублимационной активности на четырех астероидах Главного пояса, находящихся на малых или

перигелийных расстояниях. Хотя во время наблюдений Адеона была на среднем гелиоцентрическом расстоянии, она приближалась к Солнцу и температура на ее поверхности повышалась. Кроме того, из рассматриваемых астероидов Адеона, вероятно, имеет наиболее примитивный состав вещества, с наибольшим количеством летучих, как следует из значений ее геометрического и радиолокационного альbedo. Мы не можем утверждать, что сублимационная активность на рассматриваемых астероидах была вызвана близкими по времени ударными событиями. Очевидно, возникновение кометоподобной комы у астероидов представляет собой кратковременное явление по причине слабости их гравитационных полей. Необходимыми общими условиями активизации этого процесса могут быть только высокое содержание льдов в поверхностном веществе и рост температуры. Одновременность этого явления на нескольких астероидах примитивных типов, скорее, указывает на сходство их характеристик и, соответственно, условий их происхождения. Если это так, то зарегистрированная нами сублимационная активность на Адеоне, Интерамнии, Нине и Бейре может быть признаком массового характера этого процесса на многих или большинстве примитивных астероидов Главного пояса при повышении их поверхностных температур с приближением к Солнцу. Для подтверждения изложенных здесь результатов и предположений необходимы новые систематические наблюдения уже рассмотренных, а также многих других астероидов С- и близких к ним типов с помощью спектрофотометрического и других методов. Кроме того, необходимо продолжение теоретических исследований рассеяния света в сложных системах, подобных вышерассмотренным.

Авторы благодарят анонимного рецензента за ряд полезных замечаний, позволивших улучшить содержание представленной статьи.

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку наблюдений астероидов (проект № 12-02-90444-Укр).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахтин А.И.* Породообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Издат. Казанского ун-та, 1985. 192 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.* Спектрофотометрия астероидов и ее приложения / LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, Саарбрюккен, 2011, 250 с. (*Busarev V.V.* Spectrophotometry of asteroids and its applications / LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, Saarbrücken, 2011, 250 p., ISBN: 978-3-8465-3704-6, LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany (in Russian)).
- Галазутдинов Г.А.* Система обработки звездных Эшелле-спектров. II. Обработка спектров // Препринт Спец. астрофиз. обсерв. 1992. № 92. С. 27–52.
- Платонов А.Н.* Природа окраски минералов. Киев: Наукова думка, 1976. 264 с.
- Сафронов В.С., Зиглина И.Н.* Происхождение пояса астероидов // *Астрон. вестн.* 1991. Т. 25. № 2. С. 190–199.
- Уокер Г.* Астрономические наблюдения / Ред. Щеглов П.В. М.: Мир, 1990. 351 с.
- Хоменко В.М., Платонов А.Н.* Породообразующие пироксены: оптические спектры, окраска и плеохроизм. Киев: Наукова думка, 1987. 216 с.
- Bell J.F., Owensby P.D., Hawke B.R., Brown R.H., Cruikshank D., Hartmann W.K.* 52-color Asteroid Survey // EAR-A-RDR-3-52COLOR-V2.1. NASA Planetary Data System, 1995.
- Brearley A.J.* The action of water // *Meteorites and the Early Solar System II* / Eds Lauretta D.S., McSween H.Y.JR. Univ. Arizona Press, 2006. P. 587–624.
- Burns R.G.* Mineralogical applications of crystal field theory. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1993. 224 p.
- Bus S.J., Binzel R.P.* Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. The observations // *Icarus.* 2002a. V. 158. P. 106–145.
- Bus S.J., Binzel R.P.* Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A feature-based taxonomy // *Icarus.* 2002b. V. 158. P. 146–177.
- Bus S., Binzel R.P.* 145 Adeona CCD Spectrum // EAR-A-10028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0: 145_01_TAB. NASA Planetary Data System, 2003a.
- Bus S., Binzel R.P.* 704 Interamnia CCD Spectrum // EAR-A-10028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0: 704_01_TAB. NASA Planetary Data System, 2003b.
- Bus S., Binzel R.P.* 779 Nina CCD Spectrum // EAR-A-10028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0: 779_01_TAB. NASA Planetary Data System, 2003c.
- Bus S., Binzel R.P.* 1474 Beira CCD Spectrum // EAR-A-10028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0: 1474_01_TAB. NASA Planetary Data System, 2003d.
- 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. и др., 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 Microsymp. on Comparative Planetology, Moscow, 2008. Abstract № 6.
- Busarev V.V., Barabanov S.I., Rusakov V.S., Puzin V.B., Kravtsov V.V.* Spectrophotometry of (32) Pomona, (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (330825) 2008 XE3, and 2012 QG42 and laboratory study of possible analog samples // *Icarus.* 2015. V. 262. P. 44–57.
- Calvin W.M., King T.V.V.* Spectral characteristics of iron-bearing phyllosilicates: Comparison to Orgueil (C11), Murchison and Murray (CM2) // *Meteorit. and Planet. Sci.* 1997. V. 32. P. 693–701.
- Carvano J.M., Lorenz-Martins S.* Modeling the effects of a faint dust coma on asteroid spectra / *Proc. IAU Symp.* / Eds Fernández J.A. и др. 2009. V. 263. P. 223–226.
- 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.
- Coradini A., Capaccioni F., Erard S., and 46 co-authors.* The surface composition and temperature of asteroid 21 Lutetia as observed by Rosetta/VIRTIS // *Science.* 2011. V. 334. P. 492–494.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J.* Rock-Forming Minerals: Sheet Silicates. V. 3. N.Y.: John Wiley, 1963. P. 170–190.
- Dodd R.T.* Meteorites – A Petrologic-chemical Synthesis. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981. 368 p.
- Dodson-Robison S.E., Willacy K., Bodenheimer P., Turner N.J., Bechman C.A.* Ice lines, planetesimal composition and solid surface density in the solar nebula // *Icarus.* 2009. V. 200. P. 672–693.
- Fanale F.P., Salvail J.R.* The water regime of asteroid (1) Ceres // *Icarus.* 1989. V. 82. P. 97–110.
- Feistel R., Wagner W.* Sublimation pressure and sublimation enthalpy of H₂O ice Ih between 0 and 273.16 K // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2007. V. 71. P. 36–45.
- 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.
- Fray N., Schmitt B.* Sublimation of ices of astrophysical interest: A bibliographic review // *Planet. and Space Sci.* 2009. V. 57. P. 2053–2080.
- 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.
- Gehrels T. Physical parameters of asteroids and interrelations with comets // From plasma to planet. Proc. Twenty-first Nobel Symp. held 6–10 Sept., 1971, Sweden / Ed. Evlius A. N.Y.: Wiley Interscience Division, 1972. P. 174.
- Grimm R.E., McSween H.Y., Jr. Heliocentric zoning of the asteroid belt by aluminum-26 heating // Science. 1993. V. 259. P. 653–655.
- Hapke B. Theory of reflectance and emittance spectroscopy. Cambridge Univ. Press, 1993. 455 p.
- Hansen J.E., Travis L.D. Light scattering in planetary atmosphere // Space Sci. Rev. 1974. V. 16. P. 527–610.
- Hardorp J. The Sun among the stars // Astron. and Astrophys. 1980. V. 91. P. 221–232.
- Hiroi T., Zolensky M.E. UV-VIS-NIR absorption features of heated phyllosilicates as remote-sensing clues of thermal histories of primitive asteroids // Antarct. Meteorite Res. 1999. V. 12. P. 108–116.
- Jewitt D., Guilbert-Lepoutre A. Limits to ice on Asteroids (24) Themis and (65) Cybele // Astron. J. 2012. V. 143. P. 21–28.
- Khare B.N., Sagan C., Arakawa E.T., Suits F., Callcott T.A., Williams M.W. Optical constants of organic tholins produced in a simulated titanian atmosphere: From soft X-ray to microwave frequencies // Icarus. 1984. V. 60. P. 127–137.
- King T.V.V., Clark R.N. Spectral characteristics of chlorites and Mg-serpentines using high-resolution reflectance spectroscopy // J. Geophys. Res. 1989. V. 94 (B10). P. 13997–14008.
- Lazzaro D., Angeli C.A., Carvano J.M., Mothé-Diniz T., Duffard R., Florezak M. S³OS²: The visible spectroscopic survey of 820 asteroids // Icarus. 2004. V. 172. P. 179–220.
- Longhi J. Phase equilibria in the system CO₂–H₂O I: New equilibrium relations at low temperatures // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. P. 529–539.
- Magri C. Personal communication, 2004 (http://echo.jpl.nasa.gov/~lance/asteroid_radar_properties/mba.html).
- Masiero J.R., Grav T., Mainzer A.K., Nugent C.R., Bauer J.M., Stevenson R., Sonnett S. Main-belt asteroids with WISE/NEOWISE: Near-infrared albedos // Astrophys. J. 2014. V. 791. P. 121–131.
- McCord T.B., Chapman C.R. Asteroids: Spectral reflectance and color characteristics. II // Astrophys. J. 1975. V. 197. P. 781–790.
- Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien speziell kolloidaler Goldlösungen // Ann. Phys. 1908. V. 25. P. 377–445.
- Ockert-Bell M.E. Near IR Spectrum of Asteroid 779 Nina // EAR-A-I0046-4-IRTFSPEC-V2.0:OCKERTBELLETAL2010_779_081107T142601_TAB. NASA Planetary Data System, 2011.
- Harris A.W., Warner B.D., Pravec P. 2012. Asteroid Lightcurve Derived Data V13.0. EAR-A-5-DDR-DE-RIVED-LIGHTCURVE-V13.0. NASA Planetary Data System.
- Rossmann G.R. Spectroscopic and magnetic study of ferric iron hydroxy sulfates: Intensification of color in ferric iron clusters bridged by a single hydroxide ion // Amer. Mineral. 1975. V. 60. P. 698–704.
- Shepard M.K., Clark B.E., Ockert-Bell M., Nolan M.C. and 12 co-authors. A radar survey of M- and X-class asteroids. II. Summary and synthesis // Icarus. 2010. V. 208. P. 221–237.
- Sherman D.M. The electronic structure of Fe³⁺ coordination sites in iron oxides: Application to spectra, bonding and magnetism // Phys. Chem. Minerals. 1985. V. 12. P. 161–175.
- Sherman D.M., Waite T.D. Electronic spectra of Fe³⁺ oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV // Amer. Mineral. 1985. V. 70. P. 1262–1269.
- Tholen D.J. Asteroid taxonomic classifications // Asteroids II / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Vernazza P., Marsset M., Beck P., Binzel R.P., Birlan M., Brunetto R., Demeo F.E., Djouadi Z., Dumas C., Merouane S., Mousis O., Zanda B. Interplanetary dust particles as samples of icy asteroids // Astrophys. J. 2015. V. 806. P. 204–213.
- Vilas F., Gaffey M.J. Phyllosilicate absorption features in main-belt and outer-belt asteroid reflectance spectra // Science. 1989. V. 246. P. 790–792.
- Vilas F., Hatch E.C., Larson S.M., Sawyer S.R., Gaffey M.J. Ferric iron in primitive asteroids: A 0.43- μ m absorption feature // Icarus. 1993. V. 102. P. 225–231.
- Vilas F., Jarvis K.S., Gaffey M.J. Iron alteration minerals in the visible and near-infrared spectra of low-albedo asteroids // Icarus. 1994. V. 109. P. 274–283.
- Zolensky M.E., Bourcier W.L., Gooding J.L. Aqueous alteration on the hydrous asteroids: Results of EQ3/6 computer simulations // Icarus. 1989. V. 78. P. 411–425.