

УДК 523.44+523.4-355+523.98

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ ОДНОВРЕМЕННОЙ СУБЛИМАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ И ПОЯВЛЕНИЯ ПЫЛЕВОЙ ЭКЗОСФЕРЫ У ВОСЬМИ АСТЕРОИДОВ ГЛАВНОГО ПОЯСА ВБЛИЗИ ПЕРИГЕЛИЯ

© 2022 г. В. В. Бусарев^{a, b, *}, А. А. Савелова^a, М. П. Щербина^{a, b}, С. И. Барабанов^{b, c}

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

^bИнститут астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

^cТомский государственный университет (ТГУ), Москва, Россия

*e-mail: busarev@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 05.08.2021 г.

После доработки 25.10.2021 г.

Принята к публикации 26.11.2021 г.

В декабре 2020 г. на 2-м телескопе Терскольского филиала ИНАСАН нами проведены спектрофотометрические наблюдения в диапазоне $\sim 0.36\text{--}0.95$ мкм девяти астероидов Главного пояса (19 Фортуны, 52 Европы, 102 Мириам, 177 Ирмы, 203 Помпеи, 250 Беттины, 266 Алины, 379 Гуенны и 383 Янины), находившихся вблизи перигелиев своих орбит со значительными эксцентриситетами, с целью определения влияния на них максимальных подсолнечных температур. Изучение спектров отражения астероидов показало, что минералогия их вещества является низкотемпературной и в основном соответствует ранее установленной классификации (Tholen, 1989; Bus, Binzel, 2002). Но в спектрах восьми астероидов (за исключением 102 Мириам) впервые обнаружены значительные отклонения, выходящие за спектральные границы их таксономических типов при отсутствии заметных изменений спектральной прозрачности земной атмосферы на интервалах времени, меньших и превышающих время экспозиции. Такие особенности можно интерпретировать как рассеяние света подвижной (или неоднородной) пылевой экзосферой, образующейся у этих астероидов вблизи перигелия в процессе сублимации льдов при наиболее высоких подсолнечных температурах. Кроме того, как следует из данных, полученных со спутников GOES-16 и SOHO, на рассматриваемые астероиды в конце ноября 2020 г. (за 10 дней до начала наших наблюдений) оказала воздействие сильная солнечная вспышка в рентгеновском диапазоне, а затем — ударная волна в солнечном ветре, вызванная квазисинхронным с рентгеновской вспышкой корональным выбросом вещества на Солнце. Вероятно, это привело к дополнительному усилению сублимационной активности астероидов и проявлений производной пылевой экзосферы.

Ключевые слова: астероиды, спектрофотометрия, химико-минеральный состав вещества, сублимационная активность, влияние солнечной активности

DOI: 10.31857/S0320930X22020025

ВВЕДЕНИЕ

Астероиды традиционно считаются безатмосферными телами по причине малой массы, которая не позволяет им удерживать достаточно длительное время даже разреженную пылевую экзосферу. В то же время в течение двух последних десятилетий растет количество наблюдательных фактов, подтверждающих реальность возникновения у астероидов не только временной экзосферы, но и более интенсивной кометной активности под влиянием различных факторов (см., например, Meech, Belton, 1990; Jewitt, 2012; Küppers и др., 2014; Chandler и др., 2018 и ссылки там же). Спектральные наблюдения астероидов с признаками активности и анализ возможных причин этого явления (см., например, Бусарев

и др., 2016; Busarev и др., 2018; 2021) привели нас к следующим выводам. Необходимые условия регулярной сублимационной активности и образования временной пылевой экзосферы на небесных телах с преобладающим силикатным составом — это (1) значительное содержание льдов (у астероидов Главного пояса — преимущественно водяного льда по причине значительно более высокой летучести близкого к нему по термофизическим параметрам льда CO_2) в поверхностных слоях, причем на астероидах всех примитивных типов это может быть обусловлено как их общим происхождением (напр., Busarev, 2012), так и высокой пористостью и, соответственно, низкой теплопроводностью поверхностного вещества, способствующей сохранности в их недрах ледя-

ных соединений (см., например, Schorghofer, 2008), и (2) значительный эксцентриситет орбиты, который приводит к заметным колебаниям подсолнечной температуры (на астероидах Главного пояса — до нескольких десятков градусов) (Busarev и др., 2015; 2018). Наличие перечисленных свойств, возможно, приводит, к такому явлению, как впервые обнаруженная нами одновременная сублимационная активность нескольких примитивных астероидов Главного пояса, находящихся вблизи перигелиев своих орбит (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016). Кроме того, при усилении солнечной активности в спектрах отражения рассматриваемых астероидов был замечен рост максимумов рассеяния света, вызываемый, по-видимому, увеличением размеров их пылевых экзосфер под влиянием более интенсивного и скоростного солнечного ветра (Бусарев и др., 2019). В данной статье представлены результаты, которые можно интерпретировать как признаки одновременной сублимационной активности и образования разреженных пылевых экзосфер у восьми астероидов Главного пояса: 19 Фортуны, 52 Европы, 177 Ирмы, 203 Помпеи, 250 Беттины, 266 Алины, 379 Гуенны и 383 Янины, которые находились у перигелия в декабре 2020 г. Нами также обсуждаются некоторые особенности минералогии вещества этих астероидов, которые удалось обнаружить, вероятно, благодаря малой оптической толщине пылевой экзосферы.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АСТЕРОИДОВ, НАБЛЮДЕНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Новые спектрофотометрические наблюдения девяти астероидов Главного пояса 19 Фортуны, 52 Европы, 102 Мириам, 177 Ирмы, 203 Помпеи, 250 Беттины, 266 Алины, 379 Гуенны и 383 Янины, находившихся вблизи перигелиев их орбит, были выполнены с 7 по 13 декабря 2020 г. на 2-м телескопе высокогорной Терскольской обсерватории ИНАСАН (высота 3136 м над уровнем моря). Наблюдения проводились с призмным ПЗС-спектрографом (ПЗС-матрица WI CCD 1240 × 1150 пикс.) предельно низкого разрешения ($R \equiv \lambda/\Delta\lambda \sim 100$) в диапазоне ~0.35–0.95 мкм. Обработка ПЗС-данных выполнена с использованием стандартных процедур и спектрального программного пакета DECH (Галазутдинов, 1992). Длины волн в спектрах прокалиброваны по бальмеровским линиям водорода в спектре ближайшей непременной звезды раннего спектрального класса α Peg (B9III). Наблюдения проведены в хороших фотометрических условиях, а регистрация спектров каждого астероида продолжалась не более 1–1.5 ч благодаря их достаточно высокой яркости (видимые звездные величины астероидов находились в пределах 11–14^m). Расчет спектров отражения

астероидов осуществлялся по общепринятой методике, с использованием звезд-аналогов Солнца (см., например, Бусарев, 1999). В целом, относительные среднеквадратические ошибки в центральной части спектров отражения составляют 1–2% и находятся в пределах от 7 до 15% на их границах. Эфемериды астероидов на моменты наблюдений согласно информации с сайта JPL NASA (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>) и другие данные содержатся в таблице, а их спектры отражения представлены на рис. 1–9.

19 Фортуна со средним диаметром $D = 200$ км, периодом вращения $T_{\text{вр}} = 7.4437$ ч и геометрическим альбедом (в полосе V) $p_V = 0.037$ (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=19), принадлежит к примитивному таксономическому типу G (Tholen, 1989) или Ch (Bus, Binzel, 2002). Два нормированных (здесь и далее на 0.55 мкм) спектра отражения Фортуны изображены на рис. 1а (кривые 1 и 2) на фоне спектральных границ таксономического типа (здесь и далее будем называть эти границы “шаблоном”) Ch, построенных по всем имеющимся спектрам отражения астероидов этого типа из базы данных SMASSII (<https://sb-napps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/form.action>) и спектра отражения Фортуны из той же базы данных (рис. 1а, кривая 3). Спектры отражения астероидов из базы SMASSII будем рассматривать в качестве канонических, имея в виду, что они содержат информацию только о поверхностном веществе астероидов и не подвергаются влиянию гипотетической пылевой экзосферы. В частности, для вещества астероидов G- или Ch-типов свойственно содержание окисленных и гидратированных силикатов (см., например, Gaffey и др., 1989; 2002). Это подтверждается наличием в обоих спектрах Фортуны широкой, хотя и частично искаженной, полосы поглощения (ПП) с центром у 0.7 мкм, механизмом образования которой является интервалентный перенос заряда $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (Платонов, 1976; Бахтин, 1985; Burns, 1993). Дополнительными признаками низкотемпературной минералогии Фортуны служат слабая ПП у 0.44 мкм, вызываемая электронными переходами в Fe^{3+} в кристаллическом поле или при интервалентном переносе заряда $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (Rossman, 1975; Sherman, 1985; Busarev и др., 2015), а также ПП у 0.62 мкм, возникающая, предположительно, при электронных переходах в окислах металлов (Cr, Ni и др.) (см., например, Hiroi и др., 1996). Вместе с этим на полученных спектрах Фортуны (рис. 1а, кривые 1 и 2) происходит резкий рост отражательной способности на длинах волн $\lambda > 0.78$ мкм, что не согласуется с каноническим спектром SMASSII и с границами “шаблона” данного таксономического типа. Анализ устойчивости фотометрических условий по нормированным (здесь и далее на 0.55 мкм) спектрам стандартной звезды солнеч-

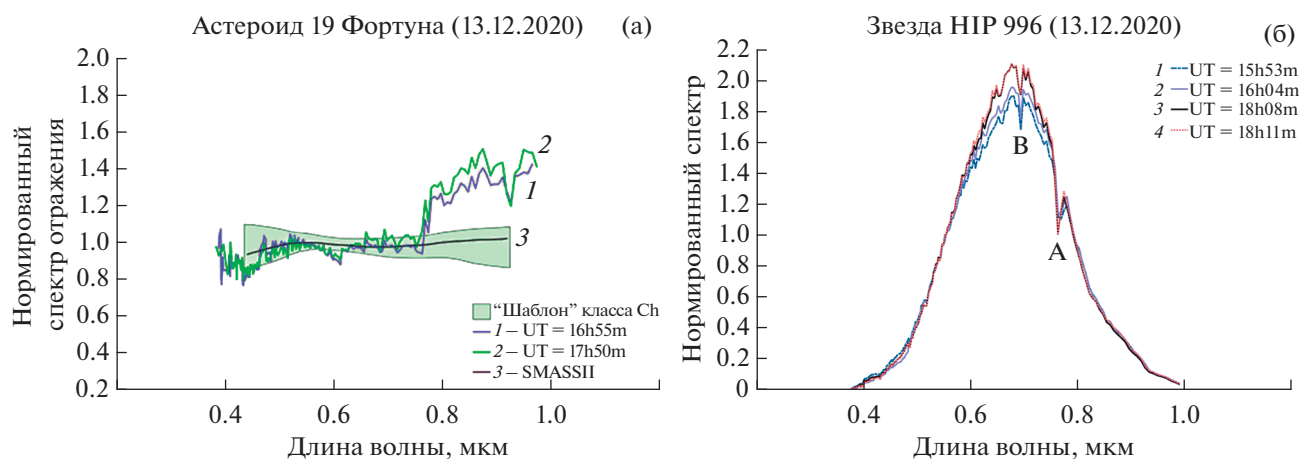


Рис. 1. (а) Нормированные спектры отражения (на значение на длине волны 0.55 мкм; аналогичная нормировка выполнена и на представленных в статье спектрах других астероидов — см. далее) астероида 19 Фортуна (кривые 1 и 2), представленные на фоне “шаблона” таксономического типа Ch и спектра этого астероида (кривая 3) из базы данных SMASII. На графике указано всемирное время (UT) получения спектров, соответствующее середине экспозиции. (б) Нормированные спектры (здесь и далее — на значение на длине волны 0.55 мкм) стандартной звезды солнечного типа HIP 996, полученные до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) наблюдений Фортуны. На последовательных спектрах звезды заметны общие изменения, связанные с вариациями воздушной массы земной атмосферы, а также наиболее сильные теллурические ПП молекулярного кислорода у 0.69 мкм (полоса B) и 0.76 мкм (полоса A), обозначенные на рисунке.

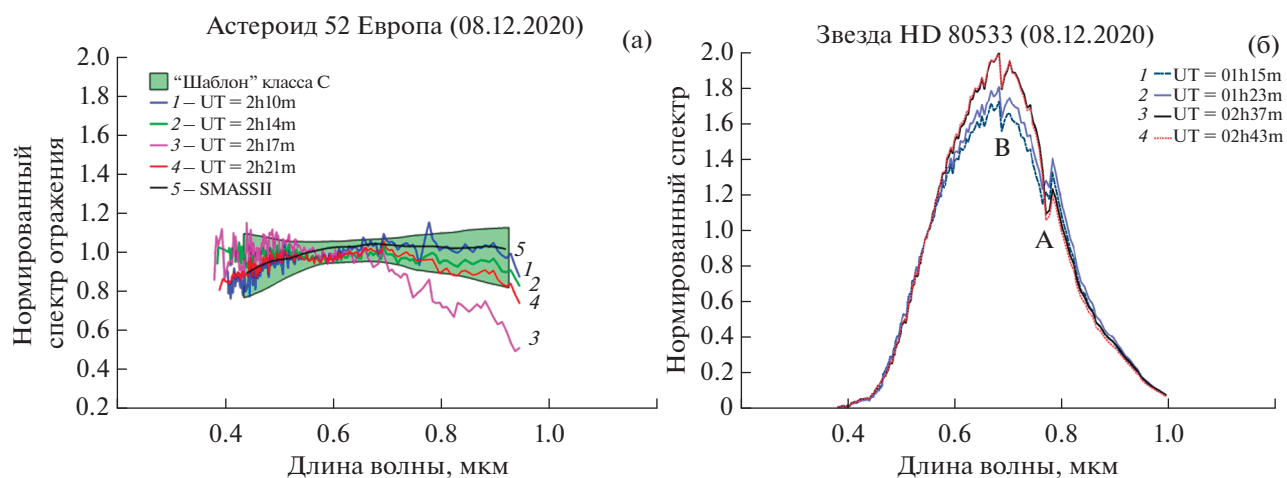


Рис. 2. (а) Нормированные спектры отражения астероида 52 Европа (кривые 1–4), представленные на фоне “шаблона” таксономического типа C и спектра этого астероида (кривая 5) из базы данных SMASII. (б) Нормированные спектры стандартной звезды солнечного типа HD 80533, полученные до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) наблюдений Европы. Теллурические ПП O_2 (A и B) обозначены на графике.

ного типа HIP 996, полученным до и после наблюдений астероида (рис. 16), показал, что при регистрации спектров Фортуны спектральная прозрачность земной атмосферы практически не менялась. На спектрах HIP 996 обозначены наиболее сильные теллурические полосы поглощения молекулярного кислорода у 0.69 мкм (полоса B) и 0.76 мкм (полоса A) (см., например, Kurucz, 2005). В длинноволновой части спектров HIP 996, где зарегистрирован рост отражательной способности астероида (рис. 1а), не заметно никаких от-

клонений (рис. 16). На этом основании мы предположили, что значительные отличия спектров отражения Фортуны (рис. 1а, спектры 1 и 2) при $\lambda > 0.78$ мкм от спектра SMASII (но хорошо согласующихся между собой при разнице времени их регистрации около часа), являются результатом отражения солнечного света не только поверхностью астероида, но и рассеяния пылевой экзосферой, возникшей при наиболее высоких подсолнечных температурах в результате сублимации льда. Воспользуемся упрощенной форму-

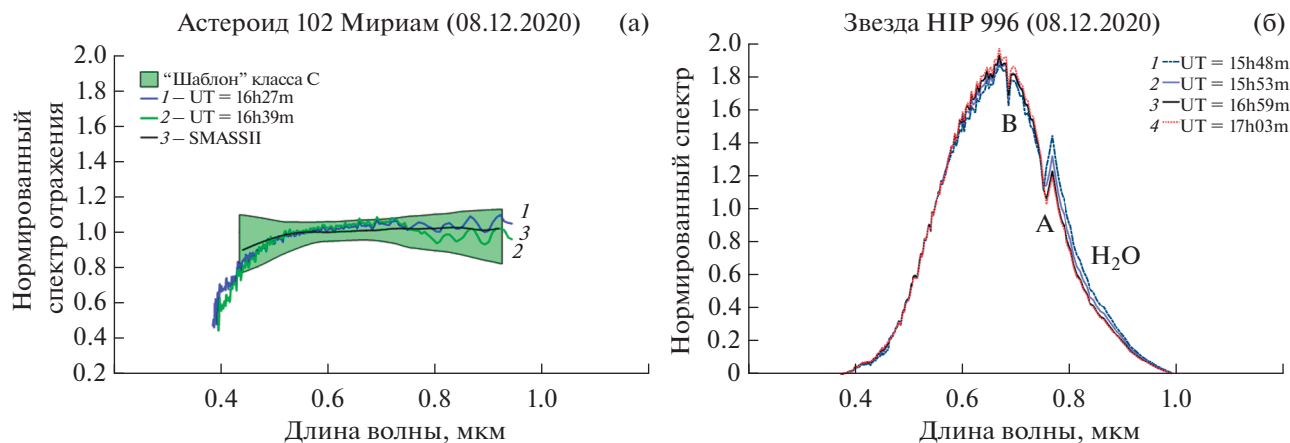


Рис. 3. (а) Нормированные спектры астероида 102 Мириам (кривые 1 и 2), представленные на фоне “шаблона” таксономического типа С и спектра этого астероида (кривая 3) из базы данных SMASSII. (б) Нормированные спектры стандартной звезды солнечного типа HIP 996, полученные до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) наблюдений Мириам. Отмечено положение теллурических ПП O_2 А и В, а также изменений, вызванных вариацией содержания паров H_2O в земной атмосфере на длинах волн $\lambda > 0.76$ мкм.

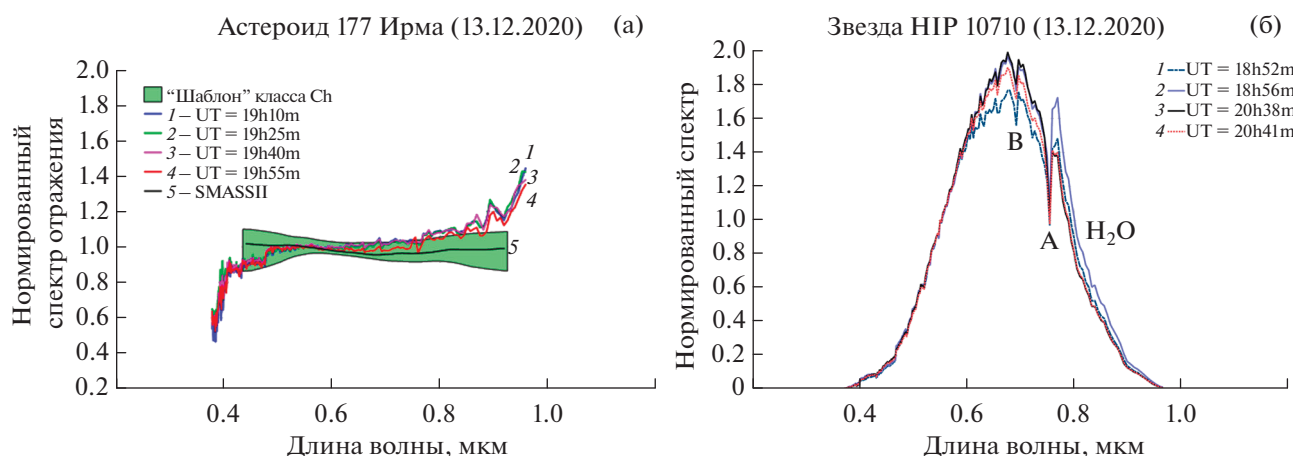


Рис. 4. (а) Нормированные спектры отражения астероида 177 Ирмы (кривые 1–4), представленные на фоне “шаблона” таксономического типа Ch и спектра этого астероида (кривая 5) из базы данных SMASSII. (б) Нормированные спектры стандартной звезды солнечного типа HIP 10710, полученные до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) наблюдений Ирмы. Обозначено положение теллурических ПП O_2 А и В, а также изменений, обусловленных вариациями содержания паров H_2O в земной атмосфере на длинах волн $\lambda > 0.76$ мкм.

лой для расчета эффективной температуры (T_{ss}) в подсолнечной точке на поверхности Фортуны, допуская, что теплопроводность в этой точке пренебрежимо мала, а также, что астероид является абсолютно черным телом и излучает в соответствии с законом Стефана–Больцмана (Бусарев и др., 2016):

$$T_{ss} = 394 \text{ K} ((1 - p_V)/r^2)^{1/4}, \quad (1)$$

где K — обозначение температуры в кельвинах, p_V — геометрическое альbedo астероида, r — гелиоцентрическое расстояние астероида в астрономических единицах. Для Фортуны, при ее движении от афелия до перигелия орбиты, этот диапазон

(232–272 К) является наиболее высокотемпературным по сравнению с другими обсуждаемыми астероидами (см. таблица). Результаты численного моделирования спектров отражения условного астероида примитивного типа (с низким альbedo), окруженного разреженной экзосферой из агрегатов пылевых субмикронных частиц различного состава (водяной лед, оливин и толины), показывают, что при обилии частиц ледяного состава в спектре отражения появляется максимум рассеяния света в коротковолновой части спектра ($y \sim 0.40$ – 0.50 мкм), а в случае преобладания частиц силикатного состава или органики образуется максимум $y \sim 0.60$ – 0.70 мкм, но возможен и

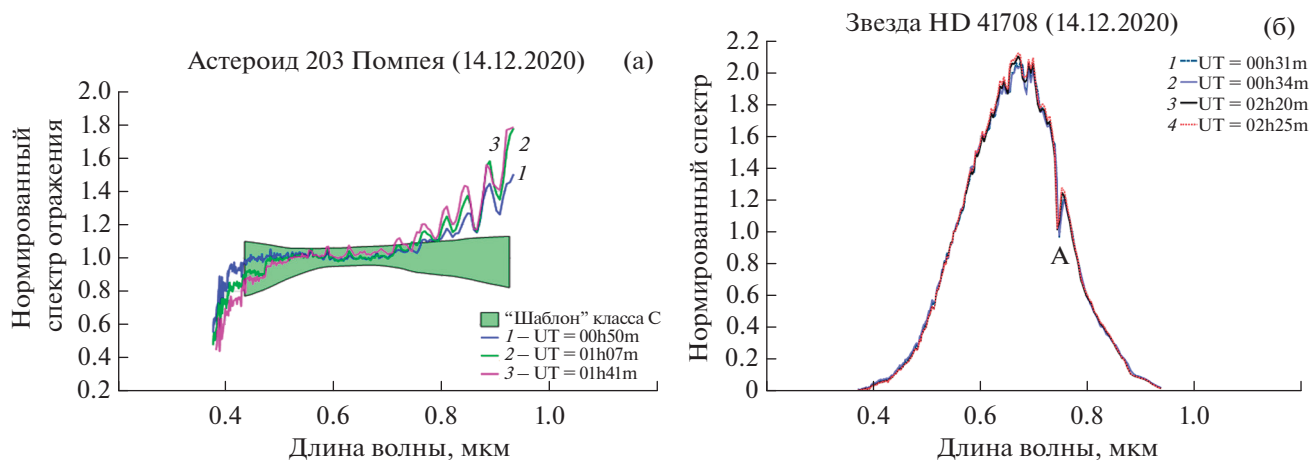


Рис. 5. (а) Нормированные спектры отражения астероида 203 Помпея (кривые 1–3), представленные на фоне “шаблона” таксономического типа С. (б) Нормированные спектры стандартной звезды солнечного типа HD 41708, полученные до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) наблюдений Помпеи. На спектрах показано положение теллурической ПП O_2 А.

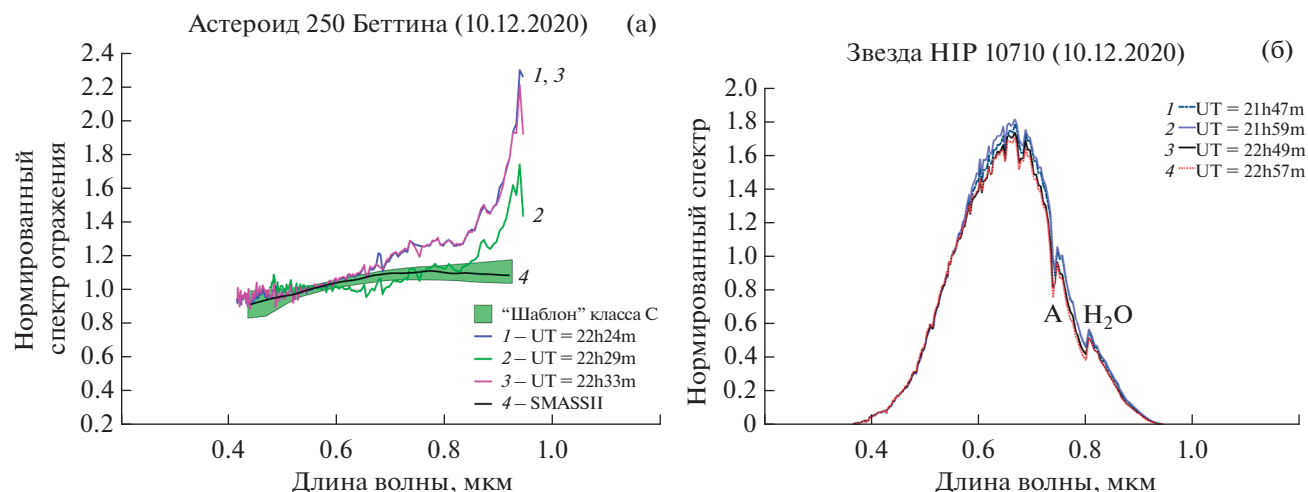


Рис. 6. (а) Нормированные спектры отражения астероида 250 Беттина (кривые 1–3), представленные на фоне “шаблона” таксономического типа Хк и спектра этого астероида (кривая 4) из базы данных SMASII. (б) Нормированные спектры стандартной звезды солнечного типа HIP 10710, полученные до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) наблюдений Беттины. На спектрах отмечены положения самых сильных теллурических ПП – O_2 А и паров воды.

комбинированный вариант (Busarev и др., 2021). Это моделирование (Petrova и др., 2000; Busarev и др., 2021) было выполнено с использованием теории переноса излучения с учетом действительной и мнимой части показателя преломления таких наиболее распространенных в космических условиях материалов, как водяной лед, силикаты (оливин) и органика (толины), а также принимались во внимание размеры и фрактальная структура агрегатов кометных пылевых частиц, известных по их микроскопическим изображениям, полученным с помощью космических аппаратов (см., например, Fulle и др., 2000; Güttler и др., 2019 и ссылки там же). Судя по спектрам отраже-

ния Фортуны (рис. 1а, кривые 1 и 2), отсутствие максимума вблизи коротковолновой границы и, напротив, – резкий рост на $\lambda > 0.76$ мкм можно рассматривать как признаки отсутствия в экзосфере астероида ледяных частиц (которые, вероятно, успели испариться) и наличия силикатных или силикатно-органических частиц.

52 Европа, самый крупный из рассматриваемых астероидов ($D = 303.918$ км, $p_V = 0.057$, $T_{\text{вр}} = 5.6304$ ч), была отнесена к примитивным таксономическим типам CF (Tholen, 1989) и C (Bus, Binzel, 2002) в двух известных таксономических классификациях (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=52). Использование адаптив-

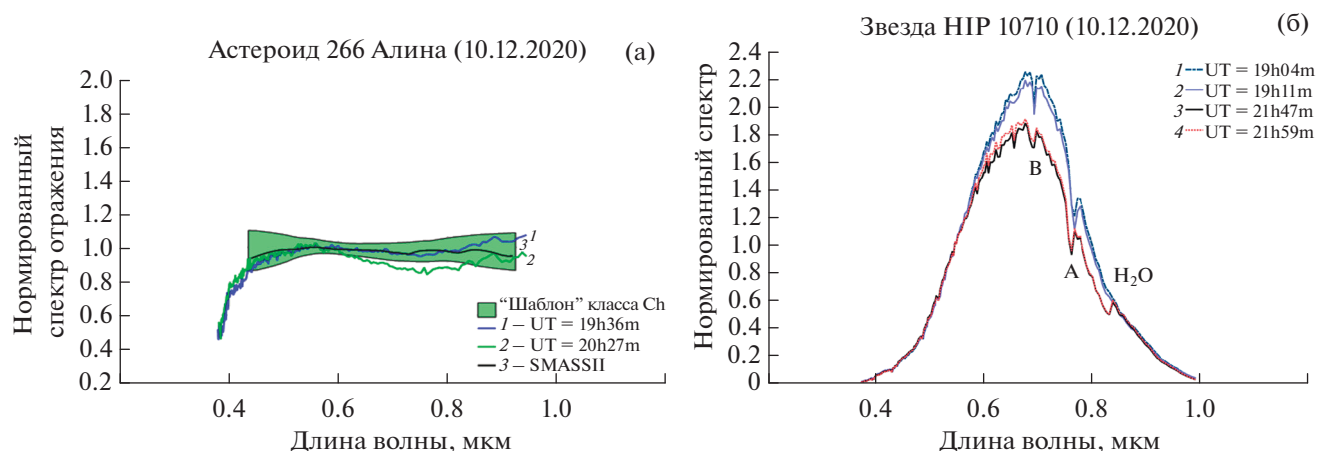


Рис. 7. Нормированные спектры отражения астероида 266 Алина (кривые 1 и 2), представленные на фоне “шаблона” таксономического типа Ch и спектра этого астероида (кривая 3) из базы данных SMASII. (б) Нормированные спектры стандартной звезды солнечного типа HIP 10710, полученные до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) наблюдений Алины. На спектрах отмечены положения наиболее сильных теллурических ПП O₂ A и B и паров воды.

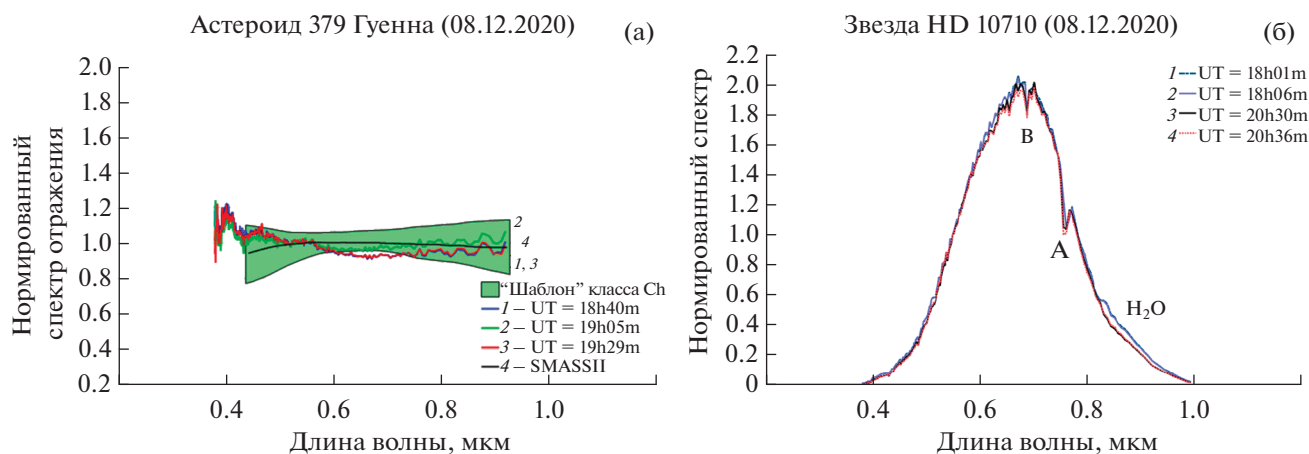


Рис. 8. Нормированные спектры отражения астероида 379 Гуенна (кривые 1–3), представленные на фоне “шаблона” таксономического типа C и спектра этого астероида (кривая 4) из базы данных SMASII. (б) Нормированные спектры стандартной звезды солнечного типа HIP 10710, полученные до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) наблюдений Гуенны. На спектрах отмечены положения наиболее сильных теллурических ПП O₂ A и B и спектрального интервала влияния паров воды.

ной оптики на 10-м телескопе Кеск-II при наблюдениях этого астероида и последующее модельное восстановление формы тела позволило более точно определить его размеры как $a \times b \times c = (379 \times 330 \times 249) \pm (16 \times 8 \times 10)$ км (Merline и др., 2013). На рис. 2а (кривые 1–4) изображены полученные спектры отражения 52 Европы вместе с ее спектром из базы SMASII (кривая 5) (<https://sb-napps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/form.action>) на фоне “шаблона” таксономического типа C. Регистрация спектров выполнена с интервалом по времени всего 3–4 мин благодаря высокой яркости астероида (см. табл. 1). По причине значительной зашумленности спектров Европы нам не удалось обнаружить в них никаких ПП минерало-

гического происхождения, но общая форма спектров согласуется с таксономическим типом C (рис. 2а) и низкотемпературной минералогией астероида (см., например, Gaffey и др., 1989; 2002). Нами установлена стабильность фотометрических условий при наблюдениях 52 Европы по спектрам стандартной звезды HD 80533 (рис. 2б), полученным до (спектры 1 и 2) и после (спектры 3 и 4) наблюдений этого астероида. На спектрах звезды HD 80533 заметны только общие изменения интенсивности, связанные с уменьшением воздушной массы земной атмосферы, и теллурические ПП O₂ A и B, но отсутствуют локальные спектральные отклонения, подобные обнаруженным в спектрах астероида (рис. 2б). Хотя спектры от-

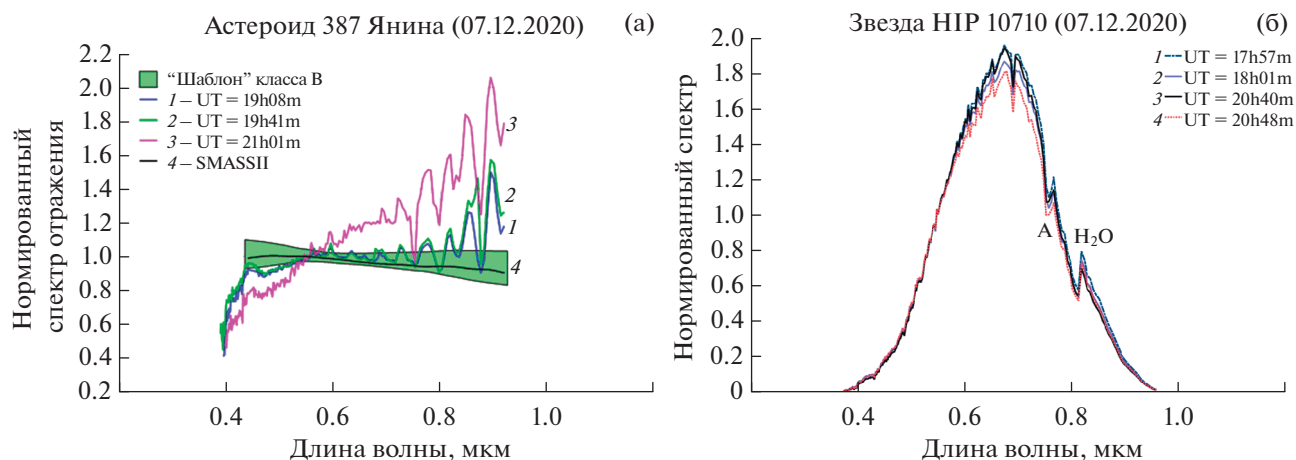


Рис. 9. Нормированные спектры отражения астероида 383 Янина (кривые 1–3), представленные на фоне “шаблона” таксономического типа В и спектра этого астероида (кривая 4) из базы данных SMASSII. (б) Нормированные спектры стандартной звезды солнечного типа HIP 10710, полученные до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) наблюдений спектров 1 и 2 Янины. Но спектр 3 Янины был получен после регистрации спектров 3 и 4 звезды. На спектрах HIP 10710 отмечены положения наиболее сильных теллурических ПП O_2 (А) и паров воды.

ражения 1, 2 и 4 Европы находятся в пределах “шаблона” данного таксономического типа (их относительные изменения $\sim 5\text{--}10\%$), различия спектра 3 от спектра SMASSII в длинноволновой части диапазона достигают $\sim 40\%$ (рис. 2а). Несмотря на один из самых коротких периодов вращения Европы, такие кратковременные ($\sim 3\text{--}4$ мин) вариации спектров отражения являются слишком большими. Попробуем оценить изменения, которые могут происходить в спектрах этого астероида при вращениях и наличии некоторой альбедной неоднородности поверхности, разрешаемой с помощью адаптивной оптики (Merline и др., 2013). Предположим, для простоты, что форма астероида является сферической, и используем среднее значение его периода вращения ($T_{\text{вр}} = 5.6304$ ч) и интервал времени 3 мин между регистрацией максимально различающихся спектров 2 и 3 (рис. 2а). Будем также учитывать, что при сравнительно малом фазовом угле Европы ($\sim 9^\circ$, см. табл.) альбедные неоднородности и структура поверхности в центральной части ее наблюдаемой полусферы не могли повлиять (из-за отсутствия теней) на общую яркость при вращении. Тогда доля поверхности, которая появляется (или исчезает) вблизи лимба на наблюдаемой стороне астероида за 3 мин, составляет 0.018. Если геометрическое альbedo этой части поверхности, например, в 5 раз отличалось от среднего значения альbedo астероида, то общее изменение яркости его наблюдаемой полусферы не превышало 0.1. Причем это — верхняя оценка, так как появление (или исчезновение) каких-либо участков поверхности вращающегося астероида вблизи лимбов происходит почти по касательной к лучу зрения, что резко снижает их вклад в общую яркость тела.

Итак, хотя альбедные неоднородности (и соответствующие спектральные вариации) на поверхности Европы могут быть причиной различий спектров 1, 2 и 4 (в пределах $\sim 5\text{--}10\%$), но они не позволяют объяснить кратковременное более значительное изменение общего градиента спектра 3, при котором его расхождение со спектром SMASSII (рис. 2а, кривая 5) у длинноволновой границы превысило 30%. С другой стороны, изучение спектров отражения раздробленных образцов метеоритов, минералов и других твердых материалов (включая льды разного состава) (см., например, Wagner и др., 1987; Gaffey и др., 1989; 2002; Cloutis и др., 2011а; 2011b) в качестве аналогов поверхностного вещества астероидов и ядер комет показало, что глубина минералогических ПП в спектрах этих образцов в видимом диапазоне (и соответственно, — в наблюдаемых спектрах астероидов) обычно не превосходит $\sim 30\text{--}40\%$. В то же время, в соответствии с результатами нашего моделирования спектров отражения астероида примитивного типа, окруженного пылевой экзосферой из субмикронных агрегатов частиц (Busarev и др., 2021), изменение знака общего градиента спектра отражения (например, с отрицательного на положительный) в видимом диапазоне при изменении состава частиц экзосферы (от ледяного до силикатного) может привести к спектральным различиям до $\sim 80\%$ в коротковолновой части спектра и до $\sim 60\%$ — в его длинноволновой части (рис. 10). Таким образом, можно предполагать, что кратковременные изменения спектров Европы являются результатом комплексного влияния пылевой экзосферы, возникшей у этого астероида вблизи перигелия, и альбедных неоднородностей поверхности (при малой оптиче-

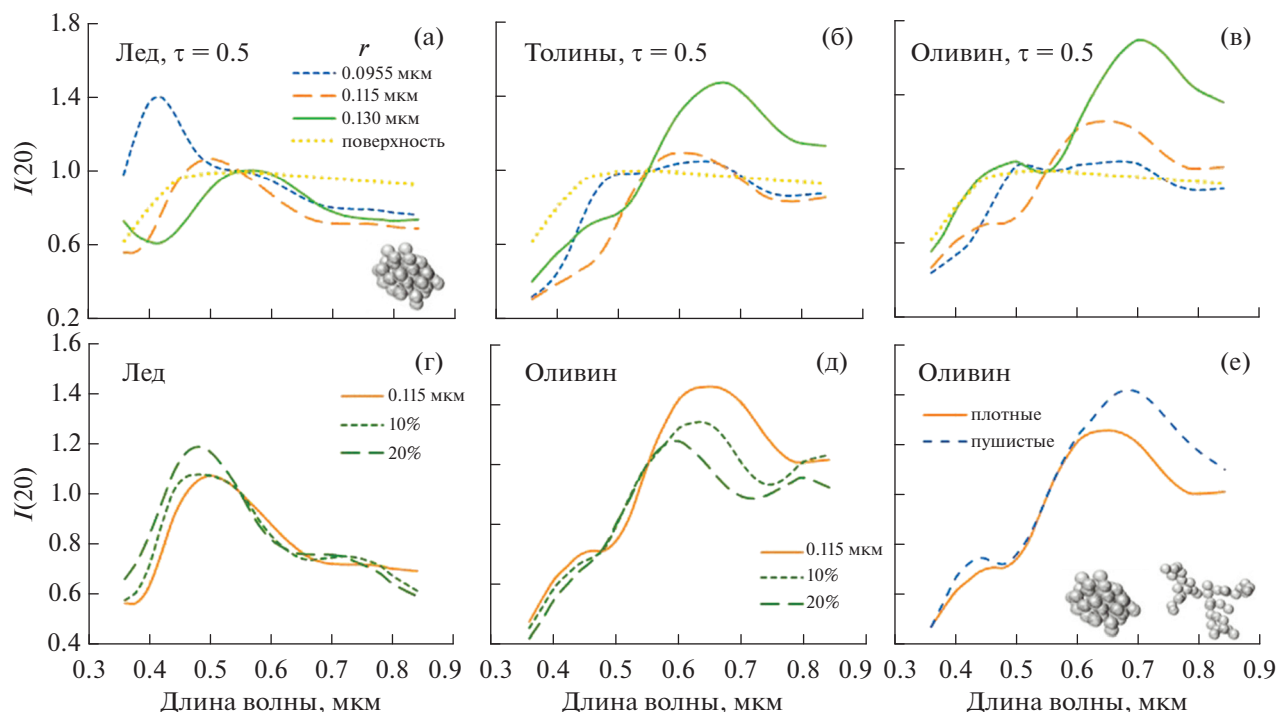


Рис. 10. На рисунках представлены модельные нормированные (на $\lambda = 0.55$ мкм) спектры обратно-рассеянной интенсивности (при фазовом угле 20°) условного астероида, имеющего геометрическое альбедо $p_V = 0.072$ на $\lambda = 0.55$ мкм и спектр отражения астероида С-типа (показанный на рисунках (а–в) точечной линией), окруженный экзосферой, состоящей из субмикронных агрегатов частиц (их примеры показаны на вставках в правом нижнем углу рисунков (а) и (е)), которые состоят из еще более мелких (примерно на порядок) сферических частиц, три варианта размеров которых указаны в правом верхнем углу рисунка (а). Один из трех вариантов состава вещества частиц (лед, оливин или толины) указан в левом верхнем углу каждого рисунка. На рисунках (г) и (д) показаны варианты модельных спектров отражения для случаев отклонений от сферической формы на ± 10 и $\pm 20\%$ средних по размеру (0.115 мкм) сферических ледяных и оливининовых частиц, составляющих более крупные агрегаты частиц (Busarev и др., 2021).

ской толщине экзосферы). Признаком наличия на поверхности и/или в пылевой экзосфере Европы ледяных частиц может быть небольшой максимум в коротковолновых частях ее спектров отражения (рис. 2а, кривые 2 и 3), что также согласуется с более низкотемпературным диапазоном подсолнечных температур (209–234 К) по сравнению с 19 Фортуной. Тем не менее, учитывая отклонение только одного полученного нами спектра от “шаблона” таксономического типа астероида (рис. 2а, кривая 4), нельзя исключить случайный характер этого эффекта. Поэтому сделанные предположения о пылевой экзосфере астероида являются предварительными и необходимы его повторные наблюдения вблизи перигелия.

102 Мириам ($D = 82.595$ км, $p_V = 0.051$, $T_{\text{вр}} = 23.613$ ч) (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=102) принадлежит к примитивному таксономическому типу Р (Tholen, 1989) или С (Bus, Binzel, 2002). Два спектра отражения этого достаточно медленно вращающегося астероида (рис. 3а, кривые 1 и 2) были зарегистрированы с интервалом 12 мин (см. табл.). Как видно, они хорошо согласуются с “шаблоном” таксономического типа С,

практически полностью совпадают друг с другом в диапазоне 0.38–0.75 мкм, но несколько различаются на более длинных волнах (~ 0.75 –0.95 мкм). Поэтому можно сделать вывод, что наши результаты подтверждают ранее установленный таксономический тип С и низкотемпературную минералогию Мириам. Окисленное и, возможно, гидратированное состояние вещества Мириам также подтверждается слабой ПП у 0.44 мкм, обусловленной, вероятно, электронными переходами в Fe^{3+} в кристаллическом поле гидросиликатов или при интервалентном переносе заряда $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ (Rossman, 1975; Sherman, 1985; Busarev и др., 2015). В то же время необходимо объяснить различия спектров Мириам (до ~ 5 –8%) на длинах волн 0.75–0.95 мкм, так как эти кратковременные различия не могут быть вызваны плавным изменением минералогического состава вещества медленно вращающегося астероида (с периодом вращения, превышающим более чем в 4 раза период вращения 52 Европы). Рассмотрим вначале результаты наблюдений стандартной звезды HIP 996, спектры которой регистрировались до и после наблюдений Мириам (рис. 3б). Очевидно, что примерно

Эфемериды и другие наблюдательные параметры астероидов

Дата	UT сред. (час. мин)	Прямое восхожд. (час. мин, с)	Склонение (угл. град, мин, с)	Геоцентр. расстояние (а. е.)	Гелиоцентр. расстояние (а. е.)	Элонгация (угл. град)	Фазов. угол (угл. град)	Звезд. велич. (V^m)	Высота над гориз. (угл. град)	Время экспоз. (с)	Возд. масса	Диапазон T_{ss} (К)
19 Фортуна ($q = 2.0591238$ а. е., $e = 0.1568158857$)												
2020 12 13	16 55	23 32 11	−02 39 46.7	1.8041	2.0657	90.7033	28.46	11.49	38.2	720	1.598	232–272
2020 12 13	17 50	23 32 14	−02 39 29.3	1.8045	2.0657	90.6774	28.46	11.50	31.7	480	1.879	
Стандартные звезды: HIP 996, вр. экспоз. 19 с, высота над горизонтом 59.8°, возд. масса 1.1567												
52 Европа ($q = 2.7527648$ а. е., $e = 0.110590267$)												
2020 12 08	02 10	06 47 58	+16 22 33.0	1.8501	2.7683	153.7883	9.05	10.53	39.8	90	1.555	209–234
2020 12 08	02 14	06 47 58	+16 22 33.2	1.8501	2.7683	153.7915	9.05	10.53	38.7	90	1.578	
2020 12 08	02 17	06 47 58	+16 22 33.4	1.8501	2.7683	153.7939	9.05	10.53	38.5	100	1.596	
2020 12 08	02 21	06 47 58	+16 22 33.7	1.8501	2.7683	153.7970	9.04	10.53	37.8	100	1.621	
Стандартные звезды: HD 80533, вр. экспоз. 50 с, высота над горизонтом 66.7°, возд. масса 1.0886												
102 Мириам ($q = 1.993828$ а. е., $e = 0.2509829$)												
2020 12 08	16 27	01 00 59	+05 10 18.8	1.4389	2.1039	119.2759	24.10	12.83	50.7	600	1.280	213–275
2020 12 08	16 39	01 01 00	+05 10 19.6	1.4390	2.1039	119.2687	24.10	12.83	51.1	600	1.273	
Стандартные звезды: HIP 996, вр. экспоз. 11 с, высота над горизонтом 65.2°, возд. масса 1.1013												
177 Ирма ($q = 2.1234698$ а. е., $e = 0.23372772$)												
2020 12 13	19 10	02 59 49	+19 21 55.7	1.3176	2.2038	146.0607	14.44	12.73	64.4	600	1.100	212–269
2020 12 13	19 25	02 59 49	+19 21 54.5	1.3176	2.2038	146.0492	14.44	12.73	63.8	780	1.109	
2020 12 13	19 40	02 59 49	+19 21 53.3	1.3177	2.2039	146.0376	14.45	12.73	62.5	780	1.122	
2020 12 13	19 55	02 59 49	+19 21 52.1	1.3178	2.2039	146.0260	14.45	12.73	60.9	900	1.139	
Стандартные звезды: HIP 10710, вр. экспоз. 33 с, высота над горизонтом 55.9°, возд. масса 1.2067												
203 Помпея ($q = 2.57623149$ а. е., $e = 0.058882284$)												
2020 12 14	00 50	05 36 58	+28 24 12.2	1.6230	2.6043	174.2474	2.17	12.18	44.8	900	1.414	229–243
2020 12 14	01 07	05 36 57	+28 24 11.6	1.6230	2.6044	174.2545	2.17	12.18	41.7	1800	1.497	
2020 12 14	01 41	05 36 56	+28 24 10.5	1.6230	2.6044	174.2686	2.17	12.18	35.6	1800	1.712	

Продолжение

Дата	UT сред. (час. мин)	Прямое восхожд. (час. мин, с)	Склонение (угл. град, мин, с)	Геоцентр. расстояние (а. е.)	Гелиоцентр. расстояние (а. е.)	Элонгация (угл. град)	Фазов. угол (угл. град)	Звезд. велич. (μ^m)	Высота над гориз. (угл. град)	Время экспоз. (с)	Возд. масса	Диапазон T_{ss} (K)
Стандартные звезды: HD 41708, вр. экспоз. 28 с, высота над горизонтом 43.0°, возд. масса 1.4642												
250 Беттина ($q = 2.71828939$ а. е., $e = 0.135467114$)												
2020 12 10	22 24	04 12 34	+36 10 07.1	1.8027	2.7545	161.5388	6.50	11.38	62.2	180	1.129	202–232
2020 12 10	22 29	04 12 34	+36 10 07.0	1.8028	2.7545	161.5362	6.50	11.38	61.4	180	1.138	
2020 12 10	22 33	04 12 34	+36 10 06.9	1.8028	2.7545	161.5341	6.50	11.38	60.6	180	1.146	
Стандартные звезды: HIP 10710, вр. экспоз. 58 с, высота над горизонтом 43.0°, возд. масса 1.4642												
266 Алина ($q = 2.373554$ а. е., $e = 0.1538767$)												
2020 12 10	19 36	03 22 36	+15 47 36.3	1.5135	2.4338	153.3172	10.46	12.20	61.7	900	1.130	218–254
2020 12 10	20 27	03 22 35	+15 47 19.9	1.5137	2.4338	153.2748	10.48	12.20	58.1	900	1.173	
Стандартные звезды: HIP 10710, вр. экспоз. 39 с, высота над горизонтом 49.3°, возд. масса 1.3187												
379 Гюенна ($q = 2.575949$ а. е., $e = 0.179882466$)												
2020 12 08	18 40	03 01 24	+14 49 31.2	1.9247	2.8224	150.2441	9.97	13.22	60.7	1200	1.139	202–243
2020 12 08	19 05	03 01 23	+14 49 29.2	1.9248	2.8224	150.2240	9.98	13.22	61.1	1200	1.136	
2020 12 08	19 29	03 01 23	+14 49 27.3	1.9250	2.8224	150.2047	9.98	13.22	60.5	1200	1.143	
Стандартные звезды: HIP 10710, вр. экспоз. 20 с, высота над горизонтом 59.3°, возд. масса 1.1630												
383 Янина ($q = 2.61194817$ а. е., $e = 0.16769949$)												
2020 12 07	19 08	02 26 47	+11 46 58.5	1.7642	2.6139	142.2881	13.32	13.99	57.1	1800	1.184	204–241
2020 12 07	19 41	02 26 47	+11 46 58.1	1.7644	2.6139	142.2626	13.33	13.99	54.6	2700	1.219	
2020 12 07	21 01	02 26 45	+11 46 57.4	1.7649	2.6139	142.2009	13.35	14.03	44.5	2700	1.419	
Стандартные звезды: HIP 10710, вр. экспоз. 45 с, высота над горизонтом 57.4°, возд. масса 1.1869												

Примечание: UT — всемирное время на момент середины экспозиции; а. е. — астрономические единицы; q — перигелийное расстояние; элонгация — угол с вершиной у наблюдателя между направлениями на астероид и Солнце; T_{ss} — подсолнечная температура. Приведенные параметры, за исключением времен экспозиции, диапазонов подсолнечных температур и параметров стандартных звезд, получены с помощью он-лайн сервиса Horizons (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>).

в том же спектральном диапазоне в интервале времени, включающем наблюдения астероида (рис. 3б), в земной атмосфере происходили вариации содержания водяного пара, которые, вероятно, и вызвали небольшие изменения ее спектральной прозрачности и, соответственно, привели к указанным различиям спектров 1 и 2 Мириам. Итак, мы не обнаружили явных признаков сублимационной активности и образования пылевой экзосферы у 102 Мириам. Но этот факт нуждается в дополнительном объяснении, которое будет приведено в разделе “Дискуссия”.

177 Ирма ($D = 69.049$ км, $p_V = 0.022$, $T_{\text{вр}} = 13.856$ ч) (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=177) принадлежит к примитивному таксономическому типу С (Tholen, 1989) или Ch (Bus, Binzel, 2002). Ирма имеет самое низкое значение геометрического альбеда из рассматриваемых здесь астероидов, что может быть признаком значительного содержания в ее веществе органических соединений и/или темноцветных минералов, окислов и гидроокислов. Коротковолновая часть всех четырех полученных спектров отражения Ирмы в основном укладывается в “шаблон” таксономического типа Ch (рис. 4а, кривые 1–4) и поэтому характеризует низкотемпературную минералогию ее поверхностного вещества. На спектре 4 (рис. 4а) обнаружена характерная для астероидов данного типа широкая ПП с центром у 0.7 мкм, имеющаяся также на спектре Ирмы из базы данных SMASS. Такая ПП, как правило, является результатом интервалентного переноса заряда $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ между соседними катионами в кристаллической решетке гидратированных силикатов (Платонов, 1976; Burns, 1993). Дополнительным подтверждением низкотемпературной минералогии Ирмы является слабая ПП у 0.44 мкм, вызываемая, вероятно, электронными переходами в Fe^{3+} в гидросиликатах (Busarev и др., 2015), а также ПП неизвестного происхождения у 0.47 мкм (рис. 4, кривые 1–4). В то же время значительный рост всех полученных спектров Ирмы (при их хорошем согласии между собой) на $\lambda > 0.8$ мкм (рис. 4а) может быть признаком наличия у астероида временной пылевой экзосферы из частиц силикатно-органического состава, как следует из результатов моделирования (рис. 10) (Busarev и др., 2021). Спектры стандартной звезды HIP 10710 (рис. 4б) в основном подтверждают стабильность фотометрических наблюдательных условий в земной атмосфере, за исключением вариаций содержания водяного пара (отмечены на рис. 4б символом “ H_2O ”) в диапазоне 0.76–0.95 мкм. В то же время видно, что указанные вариации (при их максимальной амплитуде у 0.78 мкм) не оказали заметного влияния на спектры отражения 177 Ирмы (рис. 4а и 4б). Поэтому мы полагаем, что рост отражательной способности этого астероида в

длинноволновой области был обусловлен, в основном, влиянием пылевой экзосферы.

Таксономический тип 203 Помпеи ($D = 124.592$ км, $p_V = 0.036$, $T_{\text{вр}} = 24.052$ ч) (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=203) DCX (Tholen, 1989) пока не был установлен достаточно определенно, но является низкотемпературным, судя по предельно низкому значению геометрического альбеда. В базе данных SMASSII спектр Помпеи также отсутствует, поэтому “шаблон” таксономического типа был нами подобран программным способом. Как удалось установить, все три полученных спектра отражения астероида в диапазоне 0.38–0.70 мкм лучше всего укладываются в “шаблон” таксономического типа С, соответствующего низкотемпературной минералогии вещества (Gaffey и др., 1989; 2002). Но эти же спектры не совпадают с данным “шаблоном” С-типа на длинных волнах (рис. 5а). Однако такой вариант представляется возможным при наличии у Помпеи во время наблюдений пылевой экзосферы. Действительно, несмотря на медленное осевое вращение Помпеи, на ее спектрах, полученных с интервалами 17 и 35 мин, имеются заметные различия, как в коротковолновом, так и в длинноволновом диапазонах (рис. 5а). В то же время фотометрические условия наблюдений астероида не менялись: это видно по идеально совпадающим спектрам стандартной звезды HD 41708 (рис. 5б). Таким образом, с высокой вероятностью у Помпеи обнаружена пылевая экзосфера, хотя и достаточно разреженная, которая образовалась при прохождении астероидом перигелия. Последнее обстоятельство, по-видимому, позволило зарегистрировать очень слабые минералогические ПП поверхностного вещества астероида: у 0.44 мкм, вызванные электронными переходами в катионах Fe^{3+} в кристаллическом поле гидросиликатов (Busarev и др., 2015), и у 0.47 мкм — неизвестного происхождения (рис. 5а, кривые 1–3). С учетом коротковолновых и длинноволновых изменений спектров Помпеи, состав частиц ее пылевой экзосферы может быть комбинированным (лед-силикаты-органика, с преобладанием последних) (рис. 10) (Busarev и др., 2021).

250 Беттина ($D = 120.995$ км, $p_V = 0.112$, $T_{\text{вр}} = 5.0545$ ч) (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=250) принадлежит к таксономическому типу М (Tholen, 1989) или Xk (Bus, Binzel, 2002). Беттина имеет самый короткий период вращения среди рассматриваемых астероидов. Изучение кривых блеска астероидов М-типа показывает, что они в среднем имеют меньшие периоды вращения, чем астероиды S- и C-типов (Belskaya, Lagerkvist, 1996). Вероятно, такая особенность объясняется большей средней плотностью М-астероидов. Однако геометрическое альбеда Беттины, почти совпадающее с нижней грани-

цей общего диапазона его значений ($\sim 0.1\text{--}0.3$) у астероидов данного типа (Tholen, Barucci, 1989), является признаком в среднем более низкотемпературного состава ее поверхностного вещества или наличия в нем низкотемпературных включений типа гидросиликатов или даже водяного льда. Полученные спектры отражения Беттины совпадают с “шаблоном” таксономического типа Хк только частично — в более коротковолновой части спектра $\sim 0.38\text{--}0.60$ мкм (рис. 6а, кривые 1–3). Но зашумленность спектров Беттины не позволила нам обнаружить какие-либо минералогические ПП поверхностного вещества. В то же время очевидны общие кратковременные изменения спектров, полученных с интервалами 4–5 мин, и их значительный рост на длинах волн $\lambda > \sim 0.83$ мкм (рис. 6а). Следует подчеркнуть, что наблюдения Беттины выполнены при достаточно устойчивых наблюдательных условиях в земной атмосфере, контроль которых выполнен по спектрам стандартной звезды HIP 10710 (рис. 6б). Это позволяет предположить, что зарегистрированные спектральные изменения вызваны рассеянием света пылевой экзосферой астероида, образовавшейся вблизи перигелия. С учетом изменений спектров во всем спектральном диапазоне состав субмикронных агрегированных частиц экзосферы Беттины может быть комбинированным (лед-силикаты-органика, с преобладанием последних) (рис. 10) (Busarev и др., 2021).

266 Алина ($D = 109.494$ км, $p_V = 0.027$, $T_{\text{вр}} = 13.018$ ч) (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=266) была классифицирована как астероид примитивного таксономического типа С (Tholen, 1989) или Ch (Bus, Binzel, 2002). Два спектра отражения, полученные с интервалом времени, равным 51 мин, совпадают в коротковолновом диапазоне, у $0.38\text{--}0.60$ мкм (рис. 7а, кривые 1 и 2), причем спектр 1 совпадает также с “шаблоном” таксономического типа Ch и хорошо согласуется со спектром из базы данных SMASSII, что подтверждает низкотемпературную минералогию астероида, а спектр 2 выходит за пределы “шаблона”. Слишком большое отклонение (до $\sim 15\%$) спектра 2 от спектра 1 в диапазоне $\sim 0.60\text{--}0.90$ мкм (рис. 7а) при изменении относительной фазы вращения астероида на 6.5% не может вызываться изменением состава поверхностного вещества астероида в соответствии с оценочным расчетом, аналогичным сделанному для 52 Европы. При этом мы учитывали предельно низкое значение альбедо и сравнительно малый фазовый угол ($\sim 10^\circ$; см. таблицу) Алины, а также небольшой амплитудный диапазон ее кривой блеска в пределах 0.6^m (https://minplanobs.org/alcdef/php/alcdef_Generate-ALCDEFPage.php). Последнее означает, что астероид обладает достаточно правильной формой (близкой к сферической) и у него отсутствуют значительные вариации альбедо. Также обращает на

себя внимание заметный рост (до $\sim 15\%$) на обоих спектрах на $\sim 0.85\text{--}0.95$ мкм (рис. 7а). Перечисленные отклонения отсутствуют на спектрах стандартной звезды HIP 10710, за исключением спектрального интервала $\sim 0.78\text{--}0.95$ мкм, где были изменения (отличающиеся по характеру от изменений на спектрах астероида), связанные с вариациями содержания паров воды в земной атмосфере (рис. 7б). Таким образом, можно предполагать, что обнаруженные вариации на спектрах отражения 266 Алины в основном вызваны наличием пылевой экзосферы, частицы которой, вероятно, имеют комбинированный состав (силикаты-органика), судя по наличию максимумов у длинноволновой границы спектра (рис. 7а и 10) (Busarev и др., 2021).

379 Гуенна ($D = 84.787$ км, $p_V = 0.046$, $T_{\text{вр}} = 14.141$ ч) (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=379) была отнесена к примитивным таксономическим типам В (Tholen, 1989) и С (Bus, Binzel, 2002). Но полученные три спектра отражения (с интервалами около 25 мин; см. табл.) соответствуют только первому варианту спектральной классификации этого астероида (В-класс, Tholen, 1989), но не согласуются со спектром этого астероида из базы данных SMASSII (рис. 8а). При этом следует отметить почти идеальное совпадение трех последовательных спектров Гуенны, что демонстрирует очень хорошие фотометрические условия наблюдений и достоверность полученных данных. Это подтверждается спектрами стандартной звезды HIP 10710, за исключением небольших спектральных отклонений, вызванных вариацией содержания паров H_2O в земной атмосфере на $\lambda > \sim 0.83$ мкм (рис. 8б), по-видимому, слабо проявляющихся на спектрах астероида (рис. 8а). Поэтому можно предположить, что нехарактерная для астероида С-типа форма спектров Гуенны (с максимумом у 0.4 мкм и широким минимумом у 0.7 мкм, а также слабым общим отрицательным градиентом) (рис. 8а), является результатом рассеяния света в пылевой экзосфере, возникшей у перигелия при сублимации ледяных материалов. Коротковолновое положение этого небольшого максимума указывает на частично ледяной состав субмикронных агрегатов частиц экзосферы Гуенны (рис. 10) (Busarev и др., 2021).

Таксономический тип В и низкотемпературная минералогия астероида 383 Янина ($D = 4.3482$ км, $p_V = 0.040$, $T_{\text{вр}} = 6.4$ ч) (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=383) были установлены в обеих упомянутых классификациях (Tholen, 1989; Bus, Binzel, 2002). Тем более необычной выглядит форма всех трех полученных спектров отражения Янины со значительным положительным градиентом, в отличие от отрицательного у спектра из базы SMASSII (рис. 9а). Интересно также, что спектры 1 и 2 (с разницей времени регистрации

около 30 мин; см. табл.) почти полностью совпадают, а спектр 3, полученный через 1 ч 20 мин после второго, заметно отличается по наклону (рис. 9а). Перечисленные особенности спектров Янины, полученных вблизи ее перигелия в достаточно стабильных наблюдательных условиях (что установлено с помощью анализа спектров стандартной звезды HIP 10710; рис. 9б), можно объяснить наличием временной пылевой экзосферы. Увеличение отражательной способности этого астероида во всем диапазоне с ростом длины волны (но, судя по его спектру SMASSII, имеющего спектр с небольшим отрицательным градиентом; рис. 9а, кривая 4) является признаком силикатно-органического состава частиц его экзосферы (рис. 10) (Busarev и др., 2021). В то же время вблизи коротковолновой границы спектров Янины (где ее экзосфера, вероятно, была практически прозрачной) нам удалось зарегистрировать полосу поглощения ее поверхностного вещества у 0.44 мкм (рис. 9а, кривые 1–3), связанную с электронными переходами в катионах Fe^{3+} в кристаллическом поле гидросиликатов (Busarev и др., 2015).

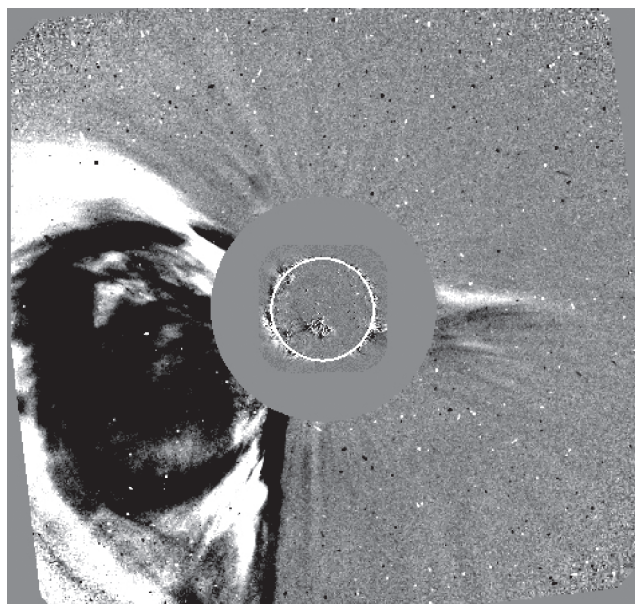
Расчетные диапазоны подсолнечных температур Беттины, Гуенны и Янины оказались наиболее низкотемпературными (см. табл.).

Обращает на себя внимание необычная регулярная структура в виде повторяющихся и совпадающих на последовательных спектрах полос поглощения в длинноволновой части спектров 1–3 Янины, а также на спектрах 102 Мириам, 203 Помпеи и 379 Гуенны, которой мы пока не можем дать никаких объяснений. Возможно, что такие эффекты связаны со вспышечными и эруптивными событиями, происходившими на Солнце в период наблюдений рассматриваемых астероидов, которые кратко обсуждаются в следующем разделе.

ДИСКУССИЯ

Ранее нами было обнаружено явление одновременной сублимационной активности нескольких астероидов примитивных типов Главного пояса, находящихся у перигелия в момент наблюдений (Busarev и др., 2015; 2018; 2021; Бусарев и др., 2016). Если в перечисленных работах обсуждалась одновременная активность трех–четырех примитивных астероидов, то в данной статье приведены признаки вероятной одновременной активности уже, по крайней мере, семи таких тел (если пока не учитывать 52 Европу). Наблюдательные подтверждения сублимационной активности большего числа примитивных астероидов Главного пояса делает предположение о значительном содержании водяного льда в их веществе более обоснованным. В свою очередь, это может свидетельствовать об образовании если не всех, то большинства родительских тел астероидов примитивных типов Главного пояса за

линией льда, возможно, в зонах формирования Юпитера и других планет-гигантов. Причем, как показывают результаты недавнего моделирования предполагаемой миграции Юпитера и других планет-гигантов в ранний период формирования Солнечной системы (см., например, Clement и др., 2019), эти обратимые события не изменили кардинально структуру Главного пояса астероидов, репопуляция которого продолжалась до окончания роста всех планет-гигантов. Об этом свидетельствует гелиоцентрическое распределение таксономических типов астероидов в современном Главном поясе: высокотемпературных типов — в основном на его внутреннем крае, а низкотемпературных типов — на внешнем (Tholen, Barucci, 1989). В наших предшествующих публикациях приведены и другие наблюдательные результаты (Бусарев, 2002; 2016; Busarev, 2012; Busarev и др., 2021), подтверждающие указанный вариант происхождения примитивных астероидов. Но отсутствие признаков сублимационной активности (и производной от нее пылевой экзосферы) у перигелия на 102 Мириам означает, что не все астероиды примитивных типов могут проявлять такую активность, которая зависит от степени сохранности ледяных материалов под поверхностью таких тел. Возможно, первоначальная классификация Мириам как астероида Р-типа (близкого к D-типу) (Tholen, 1989) является признаком наличия значительной по толщине силикатно-органической мантии (как у ядер комет, потерявших свою активность), надежно защищающей недра этого примитивного по происхождению астероида от перепадов подсолнечной температуры. Следует также дополнительно обсудить результаты наших исследований астероида М-типа 250 Беттины. Важно отметить, что по результатам ИК-наблюдений (у 3 мкм) астероидов М-типа на их значительной части (~35%) обнаружены гидросиликаты (Rivkin и др., 2000). Этому факту необычного сочетания на астероидах М-типа высокотемпературных и низкотемпературных соединений пока не найдено убедительного объяснения. Возможно, что еще в ранней Солнечной системе в результате столкновений с каменно-ледяными телами (Бусарев, 2002; Busarev, 2012) в поверхностном веществе таких астероидов (или в их более глубоких слоях) сохранились ледяные материалы, которые испытывают сублимацию вблизи перигелия на дневной стороне и, наоборот, конденсируются на ночной стороне этих тел, что можно рассматривать в качестве механизма, поддерживающего длительное “выживание” летучих соединений на астероидах М-типа. Этому, вероятно, способствует диапазон подсолнечных температур на Беттине, который наиболее смещен к более низким температурам (202–231 К; см. табл.) по сравнению с другими обсуждаемыми астероидами.



C2: 29.11.2020 14:00

AIA 193: 29.11 14:03

Рис. 11. Первоначальная форма коронального выброса вещества на Солнце по данным спутниковых наблюдений с помощью коронографа на КА SOHO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?date=20201129) (диск Солнца в центре изображения закрыт маской), повлиявшего на рассматриваемые астероиды во время их наблюдений.

В период наших наблюдений перечисленные астероиды находились на гелиоцентрических расстояниях $\sim 2.1\text{--}2.8$ а. е. и в пределах сравнительно небольшого углового сектора $\sim 80^\circ$ по углам элонгации, что обеспечило им сходство физических условий в окружающей межпланетной среде. Как известно, основными факторами, влияющими на астероиды и другие небесные тела, являются постоянная солнечная электромагнитная и корпускулярная радиация (последнюю называют “солнечным ветром”), а также ударные волны в солнечном ветре, возникающие при эруптивных событиях на Солнце (см., например, Borovsky, 2020 и ссылки там же). В период общей низкой солнечной активности, определяющей достаточно спокойное “фоновое” состояние межпланетной среды, наблюдаемые астероиды оказались под влиянием двух редких, но значительных событий на Солнце: вспышки с мощностью выше средней в рентгеновском диапазоне (класса M) 29 ноября 2020 г. (https://tesis.lebedev.ru/sun_flares.html?m=11&d=29&y=2020) и связанного с ней коронального выброса вещества (КВВ) сложной формы типа “гало” (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?date=20201129) (рис. 11).

Это означает, что образование пылевой экзосферы у рассматриваемых астероидов имеет комплексный характер и могло быть вызвано не толь-

ко газовыми потоками при сублимации ледяных материалов (особенно на 250 Беттине, где их наличие в большом объеме маловероятно), но и при воздействии солнечной вспышки в рентгеновском диапазоне, а затем — ударной волны в солнечном ветре (которую можно определить как плазменную магнитогидродинамическую волну). Импульс электромагнитной энергии от вспышки на Солнце (которая началась 29 ноября 2020 г. в UT = 16:00 и длилась ~ 4 ч) распространялся до астероидов со скоростью света и вызвал, вероятно, сильную электризацию поверхностного вещества, что привело мельчайшие силикатные частицы в состояние левитации (см., например, Lee, 1996). А ударная волна в солнечном ветре, вызванная связанным со вспышкой КВВ, достигла астероидов примерно через $\sim 8\text{--}10$ дней (в зависимости от значений гелиоцентрического расстояния и угла элонгации каждого астероида), учитывая среднюю скорость распространения солнечного ветра ~ 550 км/с (см., например, Hundhausen и др., 1994; Borovsky, 2020). Последнее событие, по-видимому, оказало сильное деструктивное воздействие на поверхностное вещество астероидов и привело к образованию значительной массы очень мелкой пыли разного состава. Но для изучения более детальных и комплексных эффектов необходимо выполнение 3D-моделирования распространения ударной волны в солнечном ветре (см., например, von Forstner и др., 2018; Gou и др., 2019) с учетом параметров и формы первоначального выброса вещества на Солнце (рис. 11), а также его последующего взаимодействия с межпланетной плазмой с “вмороженным” магнитным полем.

Наряду с анализом спектральных признаков сублимационной активности нами выполнена оценка преобладающей минералогии вещества астероидов, которая оказалась в основном соответствующей ранее установленным таксономическим классам астероидов (за исключением 250 Беттины и 379 Гуены). Для 203 Помпеи сделана независимая оценка таксономического типа (C), так как ранее он имел значительную неопределенность. Кроме того, благодаря разреженности экзосфер (вероятно, при оптической толщине не более ~ 0.4) у некоторых астероидов, особенно в коротковолновой части их спектров отражения и при достаточно низком уровне шума, были идентифицированы отдельные ПП, которые также подтверждают их низкотемпературную минералогия (у 19 Фортуны, 102 Мириам, 177 Ирмы, 203 Помпеи и 383 Янины). В то же время обнаруженные спектральные особенности сублимационных экзосфер астероидов нуждаются в дополнительных исследованиях. При наблюдениях каждого из них контролировалась спектральная прозрачность земной атмосферы (по спектрам использованных стандартных звезд),

которая в основном была стабильной. Но атмосфера является подвижной средой и невозможно полностью исключить кратковременные флуктуации изображений объектов при их наблюдениях даже в хороших фотометрических условиях. Поэтому, с одной стороны, мы опираемся на результаты моделирования спектров отражения активных астероидов, а с другой, учитываем следующее благоприятное обстоятельство. Земная атмосфера имеет наиболее высокую прозрачность в диапазоне 0.38–1.1 мкм (см., например, Уокер, 1990), в котором наиболее часто выполняется спектрофотометрия небесных тел, включая астероиды. Но даже в указанном диапазоне преимуществом обладают телескопы (на одном из которых выполнены наши наблюдения), расположенные в высокогорных обсерваториях, поскольку они вынесены за турбулентный приземный слой атмосферы, создающий наибольшие погрешности при оптических наблюдениях. Следует также отметить, что в указанном спектральном “окне” земной атмосферы имеется более узкое “окошко”, примерно в пределах ~0.38–0.6 мкм, в котором практически отсутствует селективное поглощение даже в слабых теллурических ПП, порождаемых молекулярным поглощением в земной атмосфере (см., например, Kucisz, 2005). Это означает, что в случае искажения изображения небесного объекта в широком спектральном диапазоне (например, 0.38–1.1 мкм) при крупномасштабной атмосферной турбулентности, его спектр в диапазоне ~0.38–0.6 мкм может оставаться практически неизменным. В то же время очевидным вариантом для подтверждения достоверности спектральных признаков пылевой экзосферы у активных астероидов, находящихся вблизи перигелия, являются их внеатмосферные наблюдения, которые, как мы надеемся, удастся осуществить в ближайшем будущем.

ВЫВОДЫ

Спектрофотометрические наблюдения девяти астероидов Главного пояса, имеющих в основном примитивные типы и значительные эксцентриситеты орбит, а также находящихся вблизи перигелия, было предпринято с целью изучения их предполагаемой сублимационной активности при наиболее высоких подсолнечных температурах. В ходе предшествующих наблюдений подобных астероидов в 2012 и 2019 гг. нами была обнаружена одновременная сублимационная активность нескольких таких тел вблизи перигелия (Бусарев и др., 2016; Busarev и др., 2015; 2018; 2021). В результате наблюдений и анализа спектров отражения астероидов 19 Фортуны, 52 Европы, 177 Ирмы, 203 Помпеи, 250 Беттины, 266 Алины, 379 Гуенны и 383 Янины было установлено следующее.

(1) В спектрах отражения перечисленных астероидов, полученных с небольшими интервалами времени (от нескольких минут до одного часа), обнаружены изменения (часто совпадающие на последовательных спектрах), которые невозможно объяснить различиями в составе вещества этих тел при их достаточно медленном вращении. Кроме того, в период наблюдений отсутствовали заметные вариации спектральной прозрачности земной атмосферы, контролируемой по спектрам стандартных звезд. Весьма вероятно, что такие изменения вызваны неоднородной пылевой экзосферой, возникшей у астероидов вблизи перигелия в результате сублимации водяного льда.

(2) Увеличение числа астероидов примитивных типов, у которых зарегистрирована одновременная сублимационная активность, является признаком массовой распространенности на них водяного льда. Отсюда следует предположение о вероятном общем происхождении таких астероидов (или их родительских тел) в ранней Солнечной системе за границей конденсации водяного льда. Очевидно, для подтверждения этой гипотезы необходимы модельные исследования динамической эволюции популяций малых тел, которые образовались в зонах формирования планет-гигантов (и в первую очередь Юпитера) и оставались там до тех пор, пока не были выброшены последними на более стабильные орбиты, в частности — в Главный пояс астероидов.

(3) Наличие пылевой экзосферы астероида, образующейся при сублимации водяного льда, не препятствует (в случае ее достаточно малой оптической толщины) оценке минералогии его поверхностного вещества, если не происходит искажение общей формы его спектра отражения. Анализ спектральных характеристик рассматриваемых астероидов показал, что при достаточно низком уровне шума возможна идентификация слабых минералогических ПП.

(4) Результаты численного моделирования спектров отражения условного астероида, окруженного пылевой экзосферой, состоящей из агрегатов пылевых субмикронных частиц определенных составов (Busarev и др., 2021), позволяют оценить состав частиц пылевой экзосферы реального астероида по расположению в его спектре характерных максимумов. Для большинства рассматриваемых астероидов состав частиц экзосферы оказался силикатным или силикатно-органическим, вероятно, по причине быстрого испарения частиц ледяного состава, а также в условиях общего низкого уровня солнечной активности (при редких солнечных эруптивных событиях, которые, с повышением их энергии и частоты, могут приводить к деструкции поверхностных слоев астероидов примитивных типов и пополнению их экзосферы ледяными частицами).

(5) Как показал анализ спектров отражения рассматриваемых астероидов, знание минералогии их поверхностного вещества (установленные таксономические типы) облегчает обнаружение и изучение пылевой экзосферы в случае ее возникновения.

(6) Пылевая экзосфера астероида (особенно примитивного типа) является не только индикатором наличия летучих и других соединений в его поверхностном веществе, но и позволяет изучать структуру и другие особенности ударных МГД-волн, образующихся при солнечных эруптивных событиях, на гелиоцентрическом расстоянии астероида.

Авторы выражают благодарность А.В. Захарову и анонимному рецензенту за внимательное прочтение рукописи и полезные рекомендации, которые позволили значительно улучшить описание представленных в статье результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахтин А.И. Пороодообразующие 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.
(Busarev V.V. Spectrophotometry of atmosphereless celestial bodies of the Solar system // Sol. Syst. Res. 1999. V. 33. № 2. 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. Syst. Res. 2002. V. 36. № 1. P. 39–47.)
- Бусарев В.В. Новые спектры отражения 40 астероидов: сравнение с предшествующими результатами и интерпретация // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 1. С. 15–26.
(Busarev V.V. New reflectance spectra of 40 asteroids: A comparison with previous results and interpretation // Sol. Syst. Res. 2016. V. 50. № 1. P. 13–23.)
- Бусарев В.В., Барабанов С.И., Пузин В.Б. Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 4. С. 300–312.
(Busarev V.V., Barabanov S.I., Puzin V.B. Material composition assessment and discovering sublimation activity on asteroids 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, and 1474 Beira // Sol. Syst. Res. 2016. V. 50. № 4. P. 281–293.)
- Бусарев В.В., Шербина М.П., Барабанов С.И., Ирсмамбетова Т.Р., Кохинова Г.И., Хамроев У.Х., Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гумеров Р.И., Иртуганов Э.Н., Мельников С.С. Подтверждение сублимационной активности примитивных астероидов Главного пояса 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны и ее вероятные спектральные признаки у 51 Немаузы и 65 Цибелы // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 4. С. 273–290.
(Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I., Irs-mambetova T.R., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh., Khamitov I.M., Bikmaev I.F., Gumerov R.I., Irtuganov E.N., Mel'nikov S. S. Confirmation of the sublimation activity of the primitive Main-Belt asteroids 779 Nina, 704 Interamnia, and 145 Adeona, as well as its probable spectral signs on 51 Nemausa and 65 Cybele // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 4. P. 261–277.)
- Галазутдинов Г.А. Система обработки звездных эшелеспектров. II. Обработка спектров // Препр. Спец. астрофиз. обсерв. 1992. № 92. С. 27–52.
- Платонов А.Н. Природа окраски минералов. Киев: Наукова думка, 1976. 264 с.
- Юкер Г. Астрономические наблюдения / Ред. Щеглов П.В. М.: Мир, 1990. 351 с.
- Belskaya I.N., Lagerkvist C.I. Physical properties of M class asteroids // Planet. and Space Sci. 1996. V. 44. № 8. P. 783–794.
- Borovsky J.E. What magnetospheric and ionospheric researchers should know about the solar wind // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2020. V. 204. 105271.
- Burns R.G. Mineralogical applications of crystal field theory. New York: Cambridge Univ. Press, 1993. 224 p.
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A feature-based taxonomy // Icarus. 2002. V. 158. № 1. P. 146–177.
- Busarev V.V. A hypothesis on the origin of C-type asteroids and carbonaceous chondrites // Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2012, Abstract #6017, Niigata, Japan (<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1211/1211.3042.pdf>).
- 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.
- Busarev V.V., Makalkin A.B., Vilas F., Barabanov S.I., Shcherbina M.P. New candidates for active asteroids: Main-belt (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (1474) Beira, and near-Earth (162,173) Ryugu // Icarus. 2018. V. 304. P. 83–94.
- Busarev V.V., Petrova E.V., Irs-mambetova T.R., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact // Icarus. 2021. V. 369. 114634 (18 p.)
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114634>
- Chandler C.O., Curtis A.M., Mommert M., Sheppard S.S., Trujillo C.A. SAFARI: Searching Asteroids for Activity Revealing Indicators // Publ. Astron. Soc. Pacif. 2018. V. 130. № 993. 114502 (16 pp).
- Clement M.S., Raymond S.N., Kaib N.A. Excitation and depletion of the asteroid belt in the early instability scenario // Astron. J. 2019. V. 157. № 1. 38 (11 p).
- Cloutis E.A., Hiroi T., Gaffey M.J., Alexander C.M. O'D., Mann P. Spectral reflectance properties of carbona-

- aceous 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. 309–349.
- Fulle M., Levasseur-Regourd A.C., McBride N., Hadamcik E.* In-situ dust measurements from within the coma of 1P/Halley: First-order approximation with a dust dynamical model // *Astron. J.* 2000. V. 119. P. 1968–1977.
- 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., et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 183–204.
- Gou T., Liu R., Kliem B., Wang Y., Veronig A.M.* The birth of a coronal mass ejection // *Sci. Adv.* 2019. V. 5: eaau7004 (9 p.).
- Güttler C., Mannel T., Rotundi A., Merouane S., Fulle M., Bockelée-Morvan D., Lasue J., Levasseur-Regourd A.C., Blum J., Naletto G., Sierks H., Hilchenbach M., Tubiana C., Capaccioni F., Paquette J.A., Flandes A., Moreno F., Agarwal J., Bodewits D., Bertini I., Tozzi G.P., Hornung K., Langevin Y., Krüger H., Longobardo A., Della Corte V., Tóth I., Filacchione G., Ivanovski S.L., Mottola S., Rinaldi G.* Synthesis of the morphological description of cometary dust at comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 630. A24.
- 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.
- Hundhausen J., Burkepile J.T., St Cyr O.C.* Speeds of coronal mass ejections: SMM observations from 1980 and 1984–1989 // *J. Geophys. Res.: Atmosph.* 1994. V. 99. P. 6543–6552.
- Jewitt D.* The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. № 3. 66 (14 p.).
- Kurucz R.L.* New atlases for solar flux, irradiance, central intensity, and limb intensity // *Memorie della Societa Astronomica Italiana Suppl.* 2005. V. 8. P. 189–191.
- Küppers M., O'Rourke L., Bockelée-Morvan D., Zakharov V., Lee S., von Allmen P., Carry B., Teyssier D., Marston A., Müller T., Crovisier J., Barucci M.A., Moreno R.* Localized sources of water vapour on the dwarf planet (1) Ceres // *Nature*. 2014. V. 505. P. 525–527.
- Lee P.* Dust levitation on asteroids // *Icarus*. 1996. V. 124. P. 181–194.
- Meech K.J., Belton M.J.S.* The atmosphere of 2060 Chiron // *Astron. J.* 1990. V. 100. P. 1323–1393.
- Merline W.J., Drummond J.D., Carry B., Conrad A., Tamblyn P.M., Dumas C., Kaasalainen M., Erikson A., Mottoola S., Durech J., Rousseau G., Behrend R., Casalnuovo G.B., Chinaglia B., Christou J.C., Chapman C.R., Neyman C.* The resolved asteroid program – size, shape, and pole of (52) Europa // *Icarus*. 2013. V. 225. P. 794–905.
- Petrova E.V., Jockers K., Kiselev N.N.* Light scattering by aggregates with sizes comparable to the wavelength: an application to cometary dust // *Icarus*. 2000. V. 148. P. 526–536.
- Rivkin A.S., Howell E.S., Lebofsky L.A., Clark B.E., Britt D.T.* The nature of M-class asteroids from 3- μ m observations // *Icarus*. 2000. V. 145. P. 351–368.
- 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.
- Sherman D.M.* The electronic structure of Fe^{3+} coordination sites in iron oxides: Application to spectra, bonding and magnetism // *Phys. Chem. Minerals*. 1985. V. 12. P. 161–175.
- Schorghofer N.* The lifetime of ice on main belt asteroids // *Astrophys. J.* 2008. V. 682. P. 697–705.
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomic classifications // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Tholen D.J., Barucci M.A.* Asteroid taxonomy // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Univ. Arizona Press, 1989. P. 298–315.
- von Forstner J.L.F., Guo J., Wimmer-Schweingruber R.F., Hassler D.M., Temmer M., Dumbovic M., Jian L.K., Appel J.K., Calogovic J., Ehresmann B., Heber B., Lohf H., Posner A., Steigies C.T., Vršnak B., Zeitlin C.J.* Using Forbush decreases to derive the transit time of ICMEs propagating from 1 AU to Mars // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. V. 123. P. 39–56.
- Wagner J.K., Hapke B.W., Wells E.N.* Atlas of reflectance spectra of terrestrial, lunar, and meteoritic powders and frosts from 92 to 1800 NM // *Icarus*. 1987. V. 69. P. 14–28.