

УДК 520.44+523.44+523.4-1/-8

СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВАЯ АКТИВНОСТЬ АСТЕРОИДОВ ПРИМИТИВНЫХ ТИПОВ КАК ПРИЗНАК НАЛИЧИЯ ЛЬДА H_2O

© 2024 г. В. В. Бусарев^{a,b,*}, Е. В. Петрова^c, М. П. Щербина^{a,b}, М. А. Бурлак^a,
Н. П. Иконникова^a, М. В. Максимова^a

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

^bИнститут астрономии РАН (ИНСАН), Москва, Россия

^cИнститут космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 01.03.2024 г.

После доработки 05.05.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

С 12 декабря 2022 г. по 28 февраля 2023 г. нами проведен *UBVRI*-обзор и рассчитаны аппроксимированные спектры отражения доступных для наблюдений в указанный период времени 65 астероидов Главного пояса, включая 50 объектов примитивных типов, находившихся вблизи перигелия. Целью этих наблюдений был поиск спектральных признаков сублимационно-пылевой активности астероидов и образования у них временной пылевой экзосферы, связанных с наличием в их недрах льда H_2O , при наиболее высоких подсолнечных температурах. Исходя из анализа точности и формы аппроксимированных спектров отражения астероидов примитивных типов, условно ограниченных значением геометрического альбедо ≤ 0.10 , нами обнаружена сублимационно-пылевая пылевая активность 164 Евы, 360 Карловы и 750 Оскара по отчетливым кратковременным вариациям отражательной способности этих астероидов в полосе *U*. Похожие спектральные изменения и связанная с ними сублимационно-пылевая активность обнаружены в одну из ночей у астероида 629 Бернардина с повышенным значением геометрического альбедо (0.14 или 0.19), что может быть признаком неоднородности состава его вещества и, возможно, наличия локального обнажения водяного льда. Кроме того, у трех астероидов высокотемпературных типов, 757 Портлендии, 1121 Наташи и 1687 Глароны, зарегистрированы заметные спектральные вариации во всем диапазоне, которые могут быть связаны с выбросом с их поверхности субмикронной пыли другими механизмами. Для обоснования и интерпретации результатов наблюдений выполнено численное моделирование спектров отражения условных астероидов таксономических типов C (с низкотемпературной минерологией) и S (с высокотемпературной минерологией), окруженных оптически тонкой пылевой экзосферой, состоящей из агрегатных или однородных субмикронных частиц разного состава. На основе этого моделирования нами предложен количественный критерий идентификации слабой сублимационно-пылевой активности астероидов примитивных типов в видимом диапазоне.

Ключевые слова: астероиды, *UBVRI*-фотометрия, спектры отражения, химико-минеральный состав вещества, лед H_2O , пылевая активность астероидов, солнечная вспышечная и эруптивная активность, электростатическое поле фотоэмиссионной природы

DOI: 10.31857/S0320930X24060099, EDN: NHBYRO

ВВЕДЕНИЕ

Основным признаком астероидов как малых небесных тел традиционно считалось отсутствие не только газовой атмосферы, но и разреженной пылевой экзосфера по причине очень слабого гравитационного поля (уступающего земному от ~ 30 до 10^5 раз с уменьшением размера тела от ~ 1000 до 1 км). Но еще в 1950 г. был открыт первый астероид, сближающийся с Землей (AC3), 4015 Вильсон–Харрингтон, обладающий четко выраженным пылевым хвостом и принятый за комету (Cunningham, 1950). А на протяжении примерно двух последних десятилетий продолжается дискуссия о возможной активности астероидов и их вероятной эволюционной связи с ядрами комет, начавшаяся с обнаружения в Главном поясе астероидов (ГПА) объектов примерно километрового размера, проявивших кратковременную кометоподобную активность (например, Hsieh и др., 2004; Hsieh, Jewitt, 2006). Вначале эти тела были приняты за утратившие активность ядра комет из семейства Юпитера, оказавшиеся на астероидных орbitах в ГПА под действием гравитационных резонансов (Hsieh, Jewitt, 2006; Hsieh, Haghighipour, 2016). Но более тщательное изучение около 30 таких объектов в ГПА, а также анализ возможных механизмов их активности, показали, что они больше похожи на астероиды, а не на ядра классических комет (например, Jewitt, 2012; Chandler и др., 2021; Devogèle и др., 2021; Jewitt, Hsieh, 2022 и ссылки там). У рассматриваемых активных тел пока не найдены признаки формирования на далекой периферии Солнечной системы в форме более летучих соединений, чем лед H_2O , например, CO или CO_2 . Как показывают модельные расчеты темпов сублимации основных астрофизических льдов с повышением температуры (например, Chandler и др., 2020), на гелиоцентрических расстояниях ГПА (~ 2.1 – 3.2 а. е.) скорость сублимации сухого льда почти на семь порядков превосходит ту же скорость у льда H_2O . Это означает, что при заметных количествах льда CO_2 на обсуждаемых телах кома из газообразного CO_2 у них была бы обнаружена. Подтверждением этого является регистрация с помощью космического телескопа James Webb Space Telescope (JWST) у одного из таких объектов – 238P/Read – комы из парообразной воды при отсутствии CO_2 (Kelley и др., 2023). С другой стороны, большая часть известных на настоящий момент ~ 60 тел, имеющих

какие-то признаки активности (Chandler и др., 2024), представляют собой классические астероиды примитивных типов, в недрах которых может быть лед H_2O в соответствии с их происхождением. Поэтому, более естественное объяснение сублимационно-пылевой активности (СПА) значительного количества астероидов основано на известном распределении астероидов Главного пояса по таксономическим (спектральным) типам (Tholen, 1989; Bus, Binzel, 2002), согласно которому $\sim 75\%$ известных астероидов относится к примитивным типам с предполагаемым содержанием водяного льда, что, в свою очередь, указывает на их образование вблизи границы конденсации водяного льда в ранней Солнечной системе. Обсудим это более подробно в разделе Дискуссия.

Целью наших обзорных спектральных наблюдений было изучение СПА и механизма образования пылевой экзосферы (ПЭ) на не слишком малых (от десятка до сотни километров в диаметре) астероидах примитивных типов Главного пояса, гравитационное поле которых может удерживать ПЭ некоторое время по сравнению с упоминавшимися телами километровых размеров. Поскольку сила воздействия внешних факторов (кроме ударных) на освещенную сторону астероида обратно пропорциональна квадрату его гелиоцентрического расстояния, нами была избрана стратегия поиска активных астероидов вблизи перигелия среди тел с эксцентриситетами орбит более 0.1.

О МЕТОДИКЕ ПОЛУЧЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Следует отметить, что наиболее распространенным способом обнаружения активности астероидов при их наземных наблюдениях является изучение формы их изображений на прямых снимках (обычно в полосе V) по сравнению с точечными изображениями звезд. Появление какой-либо асимметрии на изображении астероида трактуется как признак его активности в форме комы, хвоста или выброса вещества, связанного с ударным событием. Разновидностью прямого метода обнаружения активности астероида является фотометрический метод, когда выполняется мониторинг видимой звездной величины астероида на заданном интервале времени, на котором также проводится расчет звездной величины по стандартным формулам, связывающим его известные

орбитальные и физические параметры. В этом случае уменьшение видимой звездной величины по сравнению с расчетной также является признаком активности астероида (например, Busarev и др., 2021).

Особенностью нашего подхода в изучении активных астероидов (АА) является применение спектрального метода, который обладает высокой чувствительностью даже при низком спектральном разрешении и позволяет регистрировать основные особенности в спектрах отражения астероидов, которые возникают при наличии ПЭ и не свойственны спектральным характеристикам плотного поверхностного вещества. Такими особенностями являются максимумы около $\sim 0.4\text{--}0.5$ и $0.7\text{--}0.8$ мкм или, при меньшей оптической толщине ПЭ, – изменение положительного градиента спектра в коротковолновой области на отрицательный. Как показывает моделирование, эти особенности являются признаками наличия рассеивающей среды из однородных или агрегатных частиц субмикронных размеров, образующих временную ПЭ (Busarev и др., 2015; 2021; Петрова, Бусарев, 2023).

Как известно, упрощенной разновидностью спектрофотометрического метода изучения астрономических объектов является фотометрическая $UBVR_cI_c$ – система Джонсона–Козинса (Johnson–Cousins) (например, Johnson, 1965; Bessell, 1979; 2005), которая позволяет в первом приближении оценить их спектральные характеристики. С декабря 2022 г. по февраль 2023 г. нами проведена $UBVR_cI_c$ -фотометрия доступных для наблюдений 65 астероидов Главного пояса преимущественно примитивных типов, которые находились вблизи перигелийных расстояний, с целью их оперативного обзора за ограниченное время. Это позволило значительно увеличить число наблюдаемых объектов по сравнению со стандартной спектрофотометрией и, в то же время, повысить точность измерений на эффективных длинах волн фотометрических полос. В табл. 1 перечислены основные физические параметры и таксономические классы этих астероидов из опубликованных источников. Видно, что эффективные значения диаметров рассматриваемых астероидов находятся в пределах $\sim 8 \div 209$ км (но самых крупных – всего несколько). Кроме того, поскольку таксономические (спектральные) классы большинства вошедших в данный обзор астероидов точно не определены (по причине сложности их составов), мы условно разделили

их на две группы – “примитивных типов” (с преимущественно низкотемпературной минерологией и геометрическим альбедо в видимом диапазоне $A_g \leq 0.10$) и “магматических типов” (или высокотемпературного состава) и геометрическим альбедо $A_g > 0.10$) (Tholen, 1989; Bus, Binzel, 2002; Gaffey и др., 1993; 2002).

Наблюдения проводились в Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ на 0.6-метровом полуавтоматическом телескопе RC600. Полное описание используемой нами фотометрической системы, включая телескоп с ПЗС-фотометром и набором $UBVR_cI_c$ -светофильтров, приведено в нашей предшествующей публикации (Бусарев и др., 2023). Эффективные длины волн этой фотометрической системы (с учетом спектрального пропускания светофильтров и входного окна ПЗС-камеры, квантовой эффективности ПЗС-матрицы и модельной медианной спектральной прозрачности атмосферы КГО ГАИШ) составляют 0.366, 0.437, 0.545, 0.654 и 0.797 мкм (Бусарев и др., 2023). $UBVRI$ -наблюдения астероидов и ближайших к ним по координатам (и воздушным массам) непеременных звезд G-класса в качестве солнечных аналогов (с близкими к солнечным показателями цвета $U-B$) и первичная обработка полученных данных осуществлялись по стандартным методикам (Бусарев и др., 2023). Параметры наблюдений объектов с признаками активности представлены в табл. 2, из которой видно, что воздушные массы астероидов не превышали 1.3, а их фазовые углы во время наблюдений не превосходили 22° .

Завершающим этапом обработки данных был расчет отражательной способности каждого астероида в фотометрических $UBVR_cI_c$ -полосах с указанными выше эффективными длинами волн. Этот расчет был выполнен с помощью деления величины интегральной интенсивности света астероида в каждой полосе на ту же величину используемой звезды G-класса (с учетом разности значений воздушных масс и функции спектральной прозрачности земной атмосферы). Важно подчеркнуть, что при таком делении устраняются различия полуширин используемых фотометрических полос. После этого выполнялось построение так называемого “аппроксимированного спектра отражения” астероида на эффективных длинах волн фотометрических полос в диапазоне 0.366–0.797 мкм и его нормировка на значение отражательной способности астероида

на длине волны 0.545 мкм в полосе V после приведения интенсивностей света от объекта во всех светофильтрах к одной экспозиции (Бусарев и др., 2023). Кроме того, специально контролировалась стабильность фотометрических условий во время наблюдений каждого астероида. Для этого использовались непеременные контрольные звезды, близкие к астероидам по координатам и блеску, которые подбирались на общих с астероидами ПЗС-кадрах. Такой контроль осуществлялся по совпадению трех последовательных, нормированных на длине волны 0.545 мкм, спектров контрольной звезды. Совпадение этих спектров (в пределах $\sim 1\%$ в полосе V и до $\sim 5\%$ вблизи границ спектрального диапазона) являлось подтверждением фотометрической стабильности земной атмосферы. При таком условии значительное отклонение от среднего профиля как минимум одного из трех последовательных спектров астероида с видимой звездной величиной не слабее 15-й, полученных на общем интервале времени ~ 30 мин. (при суммарной экспозиции 10–12 мин. во всех светофильтрах при регистрации каждой серии измерений), считалось на качественном уровне признаком наличия ПЭ (состоящей из субмикронной пыли, выбрасываемой газовыми потоками при сублимации водяного льда или в результате действия другого механизма) и ее подвижности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ АА РАЗНЫХ ТАКСОНОМИЧЕСКИХ ТИПОВ

Для интерпретации полученных наблюдательных данных нами было выполнено численное моделирование спектров отражения двух условных АА: таксономического типа С (с низкотемпературной минерологией и геометрическим альбедо на длине волны 0.55 мкм $A_g \approx 0.05$, как и в предшествующих работах (Busarev и др., 2021; Бусарев и др., 2023; 2024; Петрова, Бусарев, 2023), и таксономического типа S (с высокотемпературной минерологией; в качестве прототипа был взят астероид 18 Мельпомена со спектром отражения из базы данных SMASSII (Bus, Binzel, 2003) и $A_g = 0.181$ (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=18)). Процедура, методы и выбор исходных параметров для расчета модельного спектра отражения астероида с экзосферой подробно описаны в наших предыдущих статьях (см. ссылки выше).

В данном случае предполагалось, что экзосфера условного АА может содержать субмикронные частицы следующих пяти соединений, наиболее распространенных в центральной части Солнечной системы (до орбиты Юпитера): лед H_2O (на рис. 1 и рис. 2 модели обозначены как “Ice”, спектральная зависимость показателя преломления принята согласно работе Warren, Brandt, (2008)); астрономические силикаты (“Sil”; Li, Greenberg (1997)); железомагнезиальные силикаты (оливины; “Oli”; Dorschner и др. (1995)); тугоплавкая органика (“OrR”; Li, Greenberg (1997)) и аморфный углерод (“AmC”; Rouleau, Martin (1991)). Что касается морфологии частиц экзосферы, мы рассматривали как однородные, так и фракталоподобные агрегаты различной плотности, аналогичные тем, которые найдены в комах и хвостах комет и в межпланетном пространстве (см., например, Bradley и др., 1988; Mannel и др. 2016; Gütler и др., 2019 и ссылки там).

На рис. 1 и рис. 2 приведены модельные спектры отражения B_{norm} (нормированные на длину волны 0.55 мкм) условных АА С- и S-типа, соответственно. Они рассчитаны для малой оптической толщины ПЭ $\tau = 0.1$ и 0.5 при фазовом угле наблюдений $\alpha = 20^\circ$. Отражение света поверхностью астероида принято изотропным. Параметры частиц экзосферы указаны в подписях к рисункам.

Большинство спектров на этих рисунках представляют модели для однородных субмикронных частиц в экзосфере с достаточно узким распределением по размерам при эффективном радиусе $R_{\text{eff}} = 0.10$ или 0.12 мкм и эффективной вариации 0.02. Форма частиц принята сферической, что при таких размерах относительно длины волны не оказывает заметного влияния на характеристики рассеяния. Эти модели оказались наиболее подходящими для обсуждения результатов последней серии наблюдений (см. ниже). Показанные на рис. 1б модельные спектры для агрегатных частиц в экзосфере рассчитаны для структур с пористостью около 0.54, содержащих 50 мономеров льда радиусом $r = 0.1$ мкм, а также для агрегатов, сформированных из зерен различного размера со случайными отклонениями в интервале ± 10 и $\pm 20\%$ от среднего.

Как видно на рис. 1а, влияние рассеяния на частицах ПЭ может значительно изменять форму спектра отражения низкоальбедного АА, особенно в области полосы U , где при преобладании ледяных частиц в ПЭ отклонение может достигать 40% и больше по сравнению со спектром

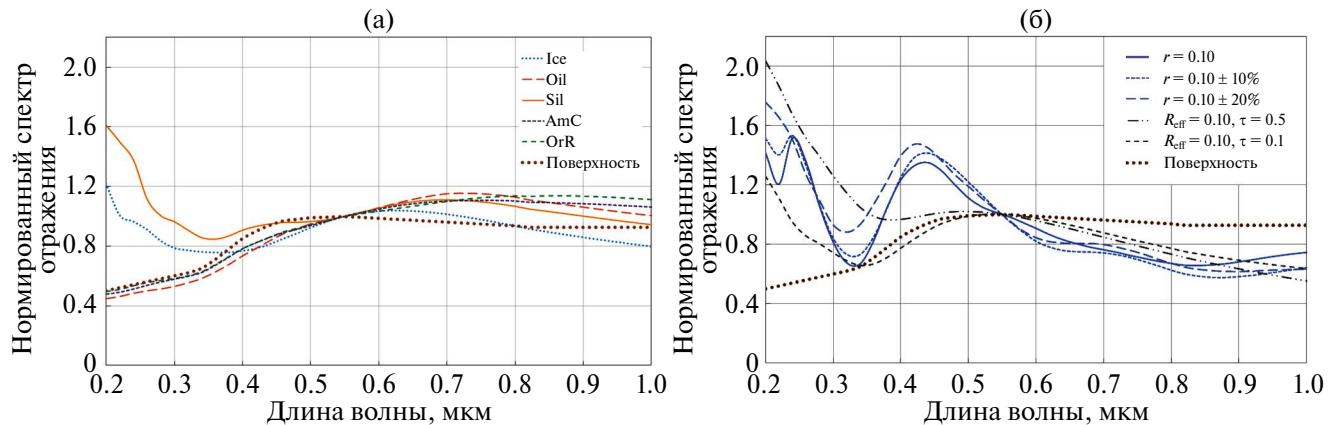


Рис. 1. Нормированные модельные спектры отражения B_0 условного АА С-типа с низкотемпературной минерологией: (а) – модели для однородных частиц экзосфера разного состава с $R_{\text{eff}} = 0.12 \text{ мкм}$, $\tau = 0.1$; (б) – модели для ледяных частиц экзосферы как однородных ($R_{\text{eff}} = 0.1 \text{ мкм}$), так и агрегатных (число мономеров $N = 50$, их радиус $r = 0.1 \text{ мкм}$ или варьирует в пределах $\pm 10\%$ и $\pm 20\%$ от среднего), $\tau = 0.5$, кроме одной модели, указанной в легенде. Размеры частиц даны в микронах. Спектр отражения поверхности астероида без ПЭ показан линией “Поверхность”.

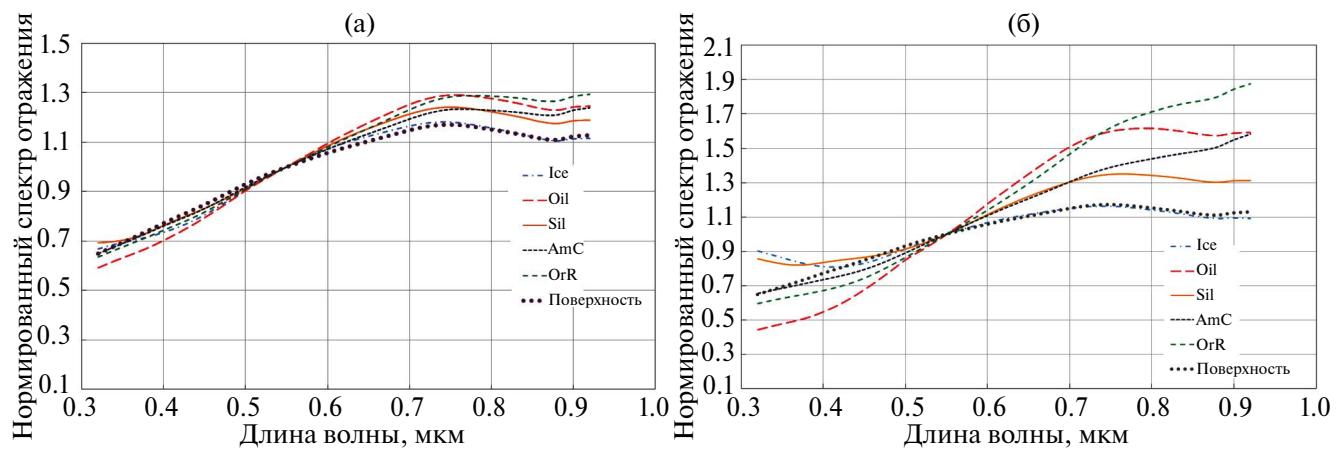


Рис. 2. Нормированные модельные спектры отражения B_0 условного астероида S-типа с высокотемпературной минерологией для разного состава однородных частиц (при $R_{\text{eff}} = 0.12 \text{ мкм}$) в экзосфере оптической толщины $\tau = 0.1$ (а) и $\tau = 0.5$ (б). Спектр отражения поверхности астероида без ПЭ показан линией “Поверхность”.

отражения поверхности астероида. Особенно это относится к рассеянию на частицах сложной структуры, состоящих из субмикронных зерен (см. рис. 1б). В этом случае в спектре отражения АА могут формироваться интерференционные детали, причем положение основных максимумов и минимумов, определяющих общую форму спектра, зависит главным образом не от величины самих пылевых агрегатов, а от размеров их зерен и состава вещества (показателя преломления) (Tishkovets, Petrova, 2020). Небольшие отклонения от монодисперсности составляющих агрегат зерен не оказывают значительного

влияния на положение деталей в модельном спектре. Спектры отражения с подобными характерными деталями были в ряде случаев измерены Бусаревым и его коллегами у некоторых низкоальбедных астероидов (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016) и проанализированы в наших предыдущих работах (Busarev и др., 2021; Петрова, Бусарев, 2023). Было также показано, что интерференционная картина в спектре становится хорошо выраженной при увеличении оптической толщины ПЭ до $\tau \sim 0.5$, а с уменьшением τ до ~ 0.1 указанные максимумы “вырождаются”.

Влияние оптической толщины ПЭ на форму спектра низкоальбедного АА хорошо заметно и для ПЭ, состоящей из однородных слабопоглощающих субмикронных частиц, рассеяние на которых обеспечивает подъем спектра в коротковолновом диапазоне (Петрова, Бусарев, 2023; Busarev и др., 2024; см. рис. 1). Для частиц водяного льда и астрономических силикатов значительный рост отражательной способности (до ~40–100%; рис. 1а) сохраняется в диапазоне ~0.2–0.4 мкм даже при $\tau = 0.1$. Из этого следует, что коротковолновая часть спектров отражения АА является наиболее информативной при поиске таких астероидов. Модельные спектры отражения условного АА С-типа показывают, что с ростом оптической толщины ПЭ, состоящей из субмикронных ледяных частиц (независимо от их структуры), общий градиент спектра отражения такого АА меняется от нейтрального (или даже положительного) до отрицательного (рис. 1а и рис. 1б). Таким образом, полоса U является критической при идентификации выбросов частиц субмикронных размеров, состоящих из льда H_2O , и соответственно – для поиска спектральных признаков ледяных залежей на астероидах примитивных типов.

Что касается спектра отражения условного АА S-типа, влияние ПЭ на его форму менее значительно, чем на спектры отражения астероидов примитивных типов: оно в основном соответствует форме спектра поверхности, при этом общий градиент спектра остается в целом положительным, а различия, связанные с разным составом вещества частиц, происходят во всем спектральном диапазоне. С увеличением оптической толщины ПЭ градиент спектра отражения оливина, органики и аморфного углерода в целом растет, а у слабопоглощающих частиц (лед и астрономические силикаты) в коротковолновом диапазоне может уменьшаться и даже изменяться на положительный (рис. 2а и рис. 2б), но в значительно меньшей степени, чем в случае условного астероида С-типа.

Итак, на основе результатов проведенного моделирования можно утверждать, что активность астероида (как С-, так и S-типа), приводящая к формированию ПЭ с оптической толщиной более 0.1, может быть обнаружена по отклонениям общей формы его спектра отражения от той, что характерна для спектра отражения поверхности, но, как видно на рис. 1 и рис. 2, более уверенно – для астероида С-типа. Как показывают наблюдательные данные,

характерное время таких изменений, связанных, вероятно, с волнами плотности в солнечном ветре или локальнойностью газопылевых выбросов на поверхности АА, может быть значительно меньше периода осевого вращения рассматриваемых астероидов. Вернемся к этому вопросу в разделе Дискуссия.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Рассмотрим более подробно те астероиды, у которых по спектральным признакам нами уверенно обнаружена сублимационно-пылевая активность (СПА), или она предполагалась по наблюдаемым спектральным изменениям, но не подтвердилась. Мы не исключаем из рассмотрения последние астероиды, так как спектральные вариации у них оказались на уровне ошибок измерений. Изучение феномена пылевой активности астероидов показывает, что по причине высокой подвижности их ПЭ в слабом гравитационном поле, незначительное изменение влияния внешних факторов может привести к существенному изменению блеска таких тел.

Мы предлагаем для АА *примитивных типов* количественный и качественный критерии наличия СПА по наблюдательным спектральным данным с учетом изложенных выше результатов численного моделирования.

1. Кратковременные вариации (от 10% и выше) интенсивности светового потока, отраженного от астероида в полосе U (с учетом типичных погрешностей в этой полосе при стандартных фотометрических условиях не более ~5–7%), по сравнению с той же величиной у соответствующей *непеременной контрольной звезды*, наблюданной *одновременно* с астероидом; для количественной оценки величины таких вариаций по наблюдательным данным для каждого АА и контрольной звезды в полосе U были рассчитаны среднеквадратические отклонения (СКО) интенсивности светового потока (по трем сериальным наблюдениям) и найдена разность между ними $[\Delta I_{\text{act}} - \Delta I_{\text{к.зв}}]$, а также вычислены значения отношения “сигнал/шум” (SNR_{act} и $\text{SNR}_{\text{к.зв}}$) и величина средней ошибки (как $1/\text{SNR}_{\text{act}}$), которые приводятся в табл. 2.

2. Совпадение формы наблюдаемого нормированного спектра отражения (НСО) астероида и модельного спектра отражения условного АА с ПЭ соответствующего (или близкого) таксономического типа.

Что касается астероидов высокотемпературных типов, для них может быть применим только второй (качественный) критерий наличия активности по изменениям общей формы спектра отражения, а количественный критерий в видимом диапазоне пока не найден. Как видно на рис. 2 с модельными НСО и на рис. 3 с наблюдаемыми НСО таких астероидов (на примере 1121 Наташи и 1687 Глароны), кратковременные вариации их спектров, вызванные, вероятно, слабой пылевой активностью, происходят во всем спектральном диапазоне (причем, это возможно при разных механизмах пылевой активности).

При обсуждении полученных результатов спектральные (или таксономические) типы астероидов (если они установлены), приводятся в скобках после названия астероида для удобства читателя. По три последовательных аппроксимированных НСО этих астероидов вместе с нормированными спектрами контрольных звезд (на вставках) изображены разными цветами на рис. За–Зи. Чтобы не загромождать рисунки, ошибки измерений приводятся в тексте и в табл. 2. На графиках для сравнения приводятся полученные ранее НСО (обозначенные черным цветом) этих же астероидов из базы данных SMASSII (при их наличии) (Bus, Binzel, 2003), когда астероиды были в неактивном состоянии.

164 Ева (СХ, X): признаки СПА

Обнаруженные спектральные изменения на трех НСО 164 Евы (рис. За) составили ~6% вблизи коротковолновой границы при точности ~5% на тех же длинах волн, и ~2% – в остальной части рабочего диапазона (по НС контрольной звезды). Полученные спектры астероида имеют небольшой отрицательный градиент, в отличие от слегка положительного у его спектра из базы SMASSII (Bus, Binzel, 2003) и поэтому согласуются по форме с модельным спектром АА (рис. 1а). Заметное преобладание СКО интенсивности светового потока от 164 Евы в полосе U по сравнению с контрольной звездой при близких значениях SNR и ошибках (табл. 2) является признаком наличия у астероида ПЭ и ее подвижности. Поэтому сделан вывод о СПА 164 Евы.

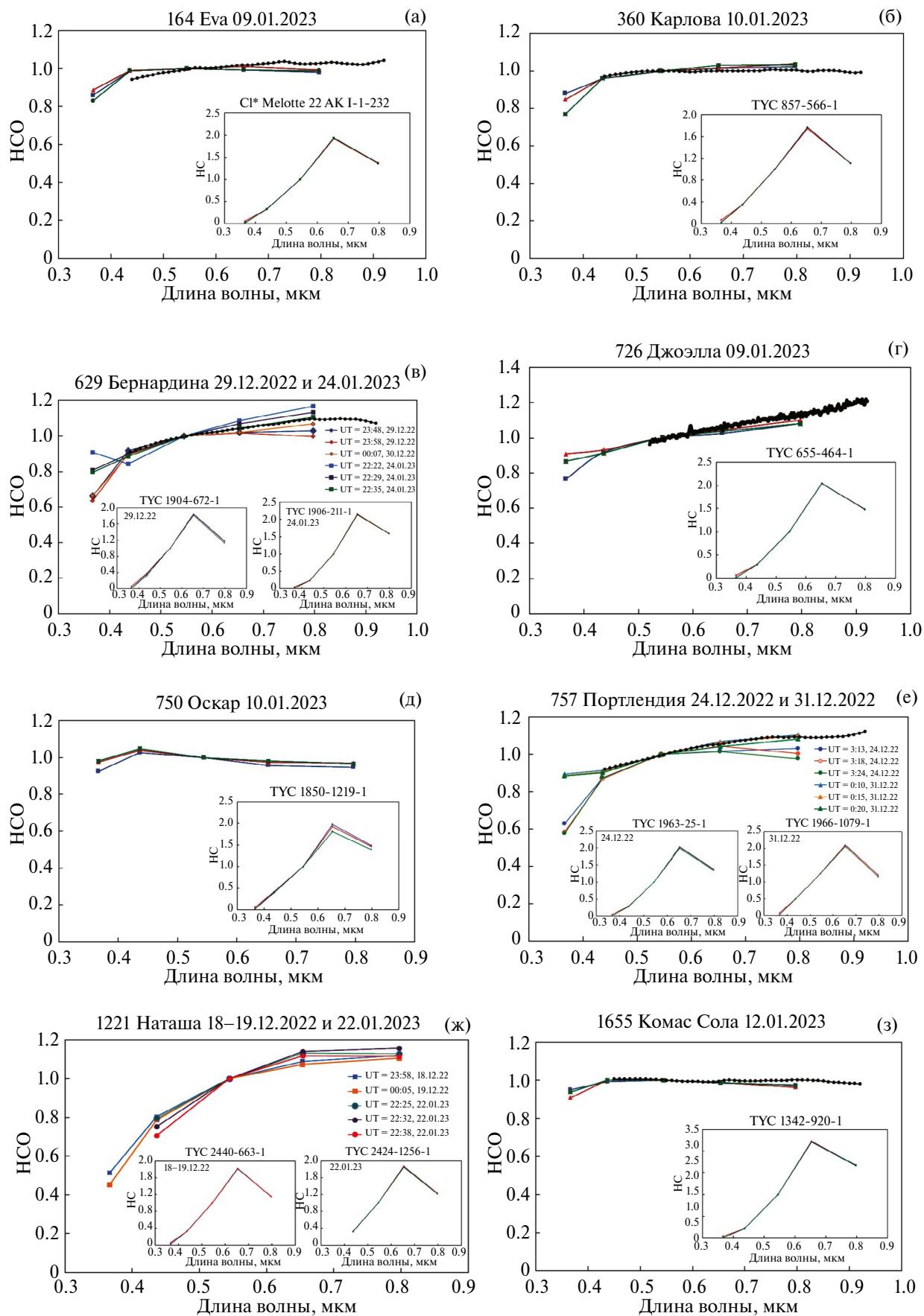
360 Карлова (С, С): признаки СПА

На всех трех НСО 360 Карловы зарегистрированы изменения до ~5–14% вблизи коротковолновой границы (при точности не хуже ~3%

в остальной части рабочего диапазона по НС контрольной звезды) (рис. 3б). Наблюдаемые НСО Карловы в видимом диапазоне хорошо совпали с ее спектром из базы данных SMASSII (Bus, Binzel, 2003). Хотя во время наблюдений была некоторая нестабильность (до ~4%) в диапазоне полосы U , судя по нормированному спектру контрольной звезды, ее величина была примерно в три раза меньше, чем максимальное изменение на НСО Карловы на тех же длинах волн. Значительно большее значение СКО интенсивности светового потока Карловы в полосе U по сравнению с контрольной звездой при сопоставимых ошибках (табл. 2) является подтверждением активности астероида, наличия у него тонкой ПЭ (рис. 1а) и ее подвижности.

629 Бернандина (Х): признаки активности астероида высокотемпературного типа

На НСО астероида Х-типа 629 Бернандины (рис. 3в) нами обнаружены спектральные признаки пылевой активности во время наблюдений 29.12.2022 и 24.01.2023 при достаточно хороших фотометрических условиях (по НС контрольных звезд – не хуже ~2–3%) в форме значительных вариаций отражательной способности (до ~11–30%) в диапазоне полосы U и до ~20% в длинноволновом диапазоне, что соответствует изменениям модельных спектров АА высокотемпературного типа с временной ПЭ (рис. 2б). Полученные 29.12.2022 и 24.01.2023 НСО 629 Бернандины в видимом диапазоне в среднем совпадают со спектром этого астероида из базы данных SMASSII. Повышенное значение геометрического альбедо (0.14, табл. 1) этого астероида по сравнению с альбедо астероидов примитивных типов указывает, возможно, на частично высокотемпературный состав его поверхностного вещества (или смесь высоко- и низкотемпературных соединений, включая лед H_2O), как, вероятно, и на астероиде Х-типа 779 Нина (с геометрическим альбедо 0.16), у которой нами была обнаружена СПА вблизи перигелия (Busarev и др., 2015) и подтверждена при последующих наблюдениях (Бусарев и др., 2019). Можно предполагать, что механизмом активности Бернандины является не только ее СПА 24.01.2023, вызванная наличием локальных подповерхностных залежей льда H_2O , но, вероятно, также комбинированное воздействие солнечного давления излучения и электростатического поля



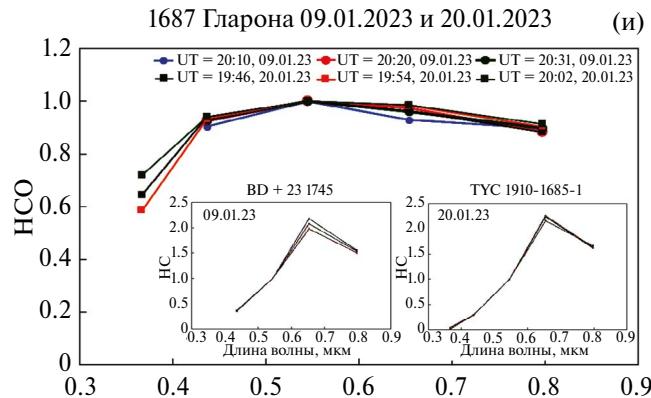


Рис. 3. Представлены по три последовательные НСО (нормированные на длине волны 0.55 мкм), обозначенные разными цветами, активных астероидов и некоторых других, активность которых не подтвердилась, по сравнению с нормированными спектрами (НС) непеременных контрольных звезд (на вставках), наблюдавшихся одновременно с астероидами: (а) – НСО 164 Евы и спектра отражения этого астероида из базы данных SMASSII (при наличии), обозначенного здесь и далее черным цветом; (б) – НСО 360 Карловы; (в) – НСО 629 Бернандины; (г) – НСО 726 Джоэллы; (д) – НСО 750 Оскара; (е) – НСО 757 Портлендии; (ж) – НСО 1121 Наташи; (з) – НСО 1655 Комас Солы; (и) – НСО 1687 Глароны.

фотоэмиссионной природы. Подтверждением этого является разная форма НСО этого астероида 29–30.12.2022 (в соответствии со вторым упомянутым механизмом) и 24.01.2023. Сделан вывод об активности 629 Бернандины 24.01.2023.

726 Джоэлла (таксономический тип не установлен) – СПА не подтверждена

Таксономический тип 726 Джоэллы пока неизвестен, хотя очень низкое геометрическое альбедо астероида (0.05, табл. 1) соответствует низкотемпературной минералогии. На НСО Джоэллы (рис. 3г) во время наблюдений при хороших фотометрических условиях нами обнаружены значительные, до ~5–11%, вариации в диапазоне полосы U (с точностью не хуже ~3%, судя по НС контрольной звезды), что соответствует модельным спектрам АА с ПЭ. Общий положительный градиент НСО Джоэллы в видимом диапазоне оказался несколько меньше, чем у спектра этого астероида из базы данных SMASSII. Но при положительном знаке разности СКО интенсивности светового потока астероида и контрольной звезды в полосе U у Джоэллы оказалось очень низкое SNR и, соответственно, – значительная ошибка интенсивности светового потока (табл. 2), которая не позволяет утверждать об активности астероида.

750 Оскар (F): признаки СПА астероида

В полосе U наклон одного из трех НСО 750 Оскара отличается от наклона двух других (рис. 3д) на ~7% при точности не хуже ~2% в этой части диапазона (судя по НС контрольной звезды), но при спектральной нестабильности земной атмосферы в длинноволновой части рабочего диапазона до ~15%. Форма всех трех НСО Оскара согласуется с формой спектров модельного АА низкотемпературного типа с ПЭ (рис. 1а), а положительный знак и значительная величина разности СКО интенсивности светового потока астероида и контрольной звезды в полосе U (табл. 2) подтверждает активность этого астероида.

757 Портлендия (XF, Xk): регулярная активность астероида не установлена

По НСО 757 Портлендии, имеющей повышенное геометрическое альбедо (0.22) и эффективный диаметр около 33 км (табл. 1), при хороших фотометрических условиях 24.12.2022 и 31.12.2022 обнаружены спектральные изменения в виде резких, до ~30%, вариаций в полосе U , а также несколько меньших изменений в остальной части рабочего диапазона (рис. 2б). В полосе U установлено хорошее согласие НСО Портлендии, полученных 31.12.2022, со спектром этого астероида из базы данных SMASSII

(рис. 3е), но у НСО от 24.12.2024 оказалась существенно другая форма. Можно предполагать, что спектральные изменения у Портлендии вызваны нерегулярным выносом субмикронной пыли давлением излучения или волнами плотности в “набегающем” солнечном ветре. На этом основании сделан вывод об отсутствии признаков активности астероида.

1121 Natasha (S): активность астероида не подтверждена

Достаточно высокое геометрическое альбедо (0.29) астероида 1121 Наташа указывает на высокотемпературный состав его поверхностного вещества, а на НСО астероида, полученных 18–19.12.2022 и 22.01.2023 при хороших фотометрических условиях, зарегистрированы кратковременные вариации, до ~7–10%, во всем спектральном диапазоне (рис. 3ж). Как и в случае 757 Портлендии, можно предполагать, что спектральные вариации астероида Наташа были вызваны солнечными вспышечными явлениями и давлением излучения, которые привели к выбросу пылевых частиц субмикронного размера с подсолнечной поверхности астероида, наряду с действием на них электростатического поля фотоэмиссионной природы. Исходя из этого, нами сделан вывод об отсутствии заметной активности астероида с преобладанием какого-то одного механизма.

1655 Комас Сола (XFU, B): СПА астероида не подтверждена

НСО астероида 1655 Комас Сола (с очень низким геометрическим альбедо 0.05 и предполагаемой низкотемпературной минерологией, табл. 1), полученные при хороших фотометрических условиях с точностью не хуже ~2%, имеют слегка отрицательный градиент на длинах волн более 0.45 мкм, в отличие от нейтрально-го градиента спектра из базы данных SMASSII (рис. 3з). В диапазоне 0.366–0.437 мкм кратковременная вариация на одном из спектров составила ~6%. Хотя форма измеренных НСО Комас Солы согласуется с формой модельного спектра АА примитивного типа с разреженной экзосферой (рис. 1а), но предельно малое превышение СКО интенсивности светового потока астероида и над СКО контрольной звезды в полосе *U* (табл. 2) не позволяет утверждать об активности астероида.

*1687 Гларона (спектральный тип неизвестен):
устойчивая активность отсутствует*

Таксономический тип астероида 1687 Гларона неизвестен, а его повышенное геометрическое альбедо (0.14, табл. 1), вероятно, указывает на частично высокотемпературную минералогию (или смеси примитивных и/или метаморфизованных соединений). Зарегистрированные 09.01.2023 и 20.01.2023 НСО астероида (рис. 3и) демонстрируют кратковременные вариации – до ~7–9% во всем диапазоне, как и у астероида 1121 Наташа. На качественном уровне форма НСО Глароны 20.01.2023 в целом согласуется с формой модельного спектра АА высокотемпературного типа (рис. 2а), но никаких спектральных признаков появления ПЭ под влиянием какого-либо механизма активности из числа возможных (СПА, давление излучения, действие электростатического поля фотоэмиссионной природы) нами не обнаружено. Поэтому сделан вывод об отсутствии у астероида спектральных признаков устойчивой пылевой активности.

ДИСКУССИЯ

Как отмечалось в недавних публикациях (например, Busarev и др., 2021; Бусарев и др., 2022; 2023; Busarev и др., 2024), объяснение причины сублимационно-пылевой активности значительного количества астероидов примитивных типов ГП, – это наличие водяного льда в недрах, унаследованного от их родительских тел, которые могли образоваться вблизи границы конденсации льда в Солнечной системе. Возможен также вариант более низкой светимости раннего Солнца, что могло привести к смещению границы льда H_2O на меньшее гелиоцентрическое расстояние по сравнению с современным (например, Ezer, Cameron, 1962; Willson, Hudson, 1991). Одним из основных подтверждений наличия реликтового водяного льда в недрах астероидов примитивных типов является полученный с помощью моделирования вывод, что водяной лед может сохраняться миллиарды лет в их недрах благодаря высокой пористости и низкой теплопроводности поверхностных слоев таких астероидов (Schorghofer, 2008; 2016). Как следует из наблюдательных данных (Rivkin и др., 1995; 2000; Busarev, 1998; Бусарев, 2002; 2010; 2016) и исследований астероида 4 Веста с КА Dawn (NASA) (De Sanctis и др., 2012; McCord

и др., 2012), астероиды с высокотемпературным составом вещества (или их родительские тела), сформировавшиеся на меньших гелиоцентрических расстояниях, также могут иметь ледяную компоненту в составе вещества, если за время своего существования они испытали низкоскоростные столкновения с каменно-ледяными телами.

Обнаружение устойчивых пылевых поясов, связанных с ГП астероидов (Veeder, Tedesco, 1992), которые являются проявлением частых столкновений этих тел, а также результаты модельной оценки высокой вероятности их взаимных сближений (Шустов и др., 2022), позволяют утверждать, что водяной лед может выбрасываться при ударных событиях из астероидов примитивного состава в любой точке орбиты. Результатом этого может быть кратковременная кометоподобная активность астероидов километрового и меньшего размера или относительно слабая СПА более крупных тел, возобновляющаяся чаще всего вблизи перигелия под влиянием наиболее высоких подсолнечных температур. Но пылевая активность астероидов малых размеров может возникать и при отсутствии водяного льда в составе их вещества, в частности при фрагментированной внутренней структуре, называемой “грудой булыжников”. Тогда основной причиной слабой (но, возможно, продолжительной) пылевой активности астероида километрового и меньшего размера может быть ускорение осевого вращения под влиянием YORP-эффекта (Bottke Jr и др., 2006) и центробежный сброс пылевых и более крупных частиц из его экваториальной зоны (например, Jewitt, 2012; Devogèle и др., 2021).

Наряду с ударными событиями еще одним массовым механизмом выброса мельчайшей пыли с поверхности астероидов (также и при отсутствии в составе вещества летучих соединений) является действие электростатических и радиационных эффектов (например, Nitter, Havnes, 1992; Lee, 1996; Jewitt, 2012), которые усиливаются вспышечными и эруптивными событиями на Солнце. Однако из-за вышеупомянутой недостаточной силы гравитационного поля астероидов, особенно малых размеров, пыль субмикронного размера ими быстро теряется (например, Nitter, Havnes, 1992; Hartzell, 2019; Onyeagusi и др., 2023), и образование ПЭ, как устойчивого пылевого слоя экзосфера, у них не происходит.

В то же время наши спектральные наблюдения и численное моделирование спектров

отражения астероидов (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016; Busarev и др., 2021; Петрова, Бусарев, 2023; Бусарев и др., 2023; Busarev и др., 2024 и эта статья) показывают, что у астероидов примитивных типов с достаточно большими размерами (влиянием гравитационного поля которых уже нельзя пренебрегать) может на некоторое время, возможно даже значительное (от нескольких месяцев до нескольких лет), формироваться ПЭ, состоящая из агрегатных или однородных частиц субмикронных размеров. Это подтверждается обнаруженной нами длительной СПА астероидов 145 Адеоны, 779 Нины и 704 Интерамнии (Бусарев и др., 2023 и ссылки там). В нашей предыдущей работе (Busarev и др., 2024) сделано предположение, что феномен продолжительного существования ПЭ на астероидах примитивного состава может быть связан с комбинированным эффектом: 1) электростатического поля фотоэмиссионной природы, которое может превосходить силу гравитации малых тел и приводить в левитирующее состояние заряженные пылевые частицы субмикронных и микронных размеров (например, Criswell, 1972; Berg и др., 1976; Lee, 1996) и 2) СПА, обусловленной сублимацией льда H_2O , выброшенного на поверхность или вскрытого при недавнем ударном событии. Несмотря на возможную противоположную направленность этих процессов в плазменно-пылевом слое вблизи поверхности примитивного астероида (электростатическое поле вместе с давлением излучения со стороны Солнца могут ускорять и выбрасывать субмикронные пылевые частицы из этого слоя (например, Nitter, Havnes, 1992; Hartzell, 2019; Yeo и др., 2021), а низкоскоростные газовые потоки при СПА, напротив, пополнять его), последний может преобладать над первым в случае образования достаточно большого ледяного обнажения.

Следует подчеркнуть, что все рассматриваемые в нашей работе астероиды примитивных типов имеют достаточно крупные размеры, медленное осевое вращение и низкое геометрическое альбедо (см. табл. 1). При таких параметрах объектов практически исключены резкие изменения их последовательных нормированных спектров отражения, полученных с малым интервалом времени. В то же время, как показывает моделирование спектров отражения АА (см. выше), если в видимом спектре астероида любого таксономического типа такие изменения наблюдаются, они служат индикаторами

его пылевой активности и наличия ПЭ, состоящей из частиц, размеры которых сравнимы с длинами световых волн (Busarev и др., 2021; Петрова, Бусарев, 2023; Busarev и др., 2024). Более того, находясь под влиянием значительного электростатического поля фотоэмиссионной природы на подсолнечной стороне астероида (например, Lee, 1996), мельчайшие пылевые частицы (независимо от механизма их выброса с поверхности) приобретают электрический заряд (Busarev и др., 2024 и ссылки там) и подвергаются влиянию частых и нерегулярных волн плотности в солнечном ветре (например, Zank, Matthaeus, 1992; Kellogg, Horbury, 2005; Malaspina и др., 2010). С другой стороны, у астероидов примитивных типов сама ПЭ может быть неоднородной, поскольку формируется, как правило, из газопылевого потока, выходящего из локального обнажения водяного льда, которое возникает при метеороидном ударе. В то же время осевое вращение АА должно постепенно приводить к более равномерному распределению ПЭ вдоль его поверхности, особенно при отсутствии значительных ударных волн в солнечном ветре.

ВЫВОДЫ

По результатам обзорных *UBVRI*-наблюдений 65 астероидов ГП в декабре 2022 – феврале 2023 гг. нами обнаружена СПА трех низкоальбедных астероидов примитивных типов, 164 Евы, 360 Карловы и 750 Оскара, вызываемая наличием водяного льда. Аналогичные спектральные признаки зарегистрированы в одну из ночей у 629 Бернандины, имеющей более высокое альbedo и значительную неоднородность поверхностного вещества, включая, вероятно, водяной лед. У трех астероидов более высокотемпературных типов – 757 Портлендии, 1121 Наташи и 1687 Глароны – зарегистрированы спектральные изменения, вызванные, вероятно, эпизодическим выбросом с их поверхности субмикронной пыли под влиянием электростатического поля, давления излучения и/или ударными волнами в солнечном ветре, но ни о каких признаках образования у них разреженной ПЭ (как признака активности) говорить не приходится.

UBVRI-наблюдения астероидов в декабре 2022 г. – феврале 2023 г. проводились в период относительно невысокой частоты событий солнечной активности, и обнаруженные спектральные признаки наличия ПЭ оказались

довольно слабыми. Аналогичные обзорные наблюдения астероидов примитивных типов ГП в декабре 2021 г. – феврале 2022 г. при более высокой частоте таких событий (Бусарев и др., 2023) позволили обнаружить более значительные проявления СПА примерно у четверти наблюдавшихся объектов примитивных типов. Анализ солнечной активности примерно за месяц до начала и во время наблюдений астероидов (как в декабре 2021 г. – феврале 2022 г., так и в декабре 2022 г. – феврале 2023 г.), а также результатов наших наблюдений во время предыдущего максимума солнечной активности, привел нас к выводу, что повышение частоты и силы солнечных вспышек в рентгеновском диапазоне и связанных с ними наиболее мощных корональных выбросов массы (СМЕ) типа “гало” вызывает общее усиление спектральных признаков активности астероидов и рост оптической толщины и концентрации частиц в их пылевых экзосферах, если они образуются.

Интересно отметить, что астероиды 164 Ева, 360 Карлова и 750 Оскар с наиболее значительными проявлениями активности наблюдались практически одновременно – в течение двух соседних ночей (2023.01.09 – 2023.01.10). Такая одновременность СПА астероидов примитивных типов вблизи перигелийных расстояний отмечалась нами уже неоднократно, впервые – в сентябре 2012 г. (Бусарев и др., 2016). С одной стороны, это может быть указанием на масштабность данного процесса на астероидах примитивных типов (связанную с их общим происхождением (см., например, Busarev, 2012)), а с другой стороны, – возможное следствие наличия у таких астероидов некоторого общего свойства, как ранее уже подчеркивалось (Busarev и др., 2024), которым, по нашему мнению, является содержание водяного льда.

Следует также отметить, что в списке объектов нашего последнего обзора 2022–2023 гг. (по сравнению с предыдущим в 2021–2022 гг.) оказалось значительно больше низкоальбедных астероидов комбинированных таксономических типов с недостаточно однородным составом вещества, возможно, по причине их сравнительно небольших размеров. Это может также быть признаком более низкого содержания водяного льда в недрах таких тел или указанием на его полное отсутствие.

Авторы (Бусарев В.В., Щербина М.П. и Максимова М.В.) выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку работы (грант РНФ 22-12-00115).

Таблица 1. Таксономический (спектральный) класс и основные физические параметры астероидов

Номер и название	Диаметр, км	Класс ^a	Геометр. альбено	Период вращения ^a , ч	e^a	a^a , а. е.	Наклонение орбиты ^a , град	Семейство ^b
53 Калипсо	97.26 ^a 114.97 ^b	ХС ¹	0.03 ^a 0.05 ^b	9.04	0.20	2.62	5.18	—
59 Элпипда	165.12 ^a	СР ¹ , В ²	0.04 ^a	13.67	0.12	2.71	8.65	—
84 Клио	79.16	G ¹ , Ch ²	0.05 ^a	23.56	0.24	2.36	9.32	Клио
111 Ата	126.34 ^a 134.28 ^b	C ¹ , Ch ²	0.06 ^a 0.05 ^b	22.07	0.10	2.59	4.93	—
112 Ифигения	69.82 ^a	DCX ¹ , Ch ²	0.04	31.47	0.13	2.43	2.60	—
117 Ломия	208.97 ^a 148.71 ^b	ХС ¹ , X ²	0.03 ^a 0.05 ^b	9.13	0.02	2.99	14.93	—
121 Гермиона	209.00 ^a 206.16 ^b	C ¹ , Ch ²	0.05 ^a	5.55	0.13	3.45	7.57	—
155 Сцилла	39.605 ^a	XFC ¹	0.03 ^a	7.96	0.27	2.76	11.36	—
164 ЕВА	100.25 ^a 73.03 ^b	CX ¹ , X ²	0.03 ^a 0.10 ^b	13.66	0.35	2.63	24.48	—
166 Родопа	52.39 ^a 54.56 ^b	GC ¹ , Xe ²	0.05 ^a 0.07 ^b	4.72	0.21	2.69	12.02	Адеона
211 Изольда	141.13 ^a	C ¹ , Ch ²	0.06 ^a	18.37	0.16	3.05	3.87	—
223 Роза	79.81 ^a 87.51 ^b	X ¹	0.02 ^a 0.03 ^b	20.28	0.12	3.09	1.92	Фемида
229 Аделинда	105.91 ^a	BCU ¹	0.04 ^a	6.60	0.14	3.42	2.08	Кибела
260 Губерта	101.54 ^a	CX ¹	0.04 ^a	8.29	0.11	3.45	6.42	Кибела или даже собственное Губерта
261 Примно	50.01 ^a	B ¹ , X ²	0.11 ^a	8.00	0.09	2.33	3.63	—
316 Гоберта	56.07 ^a 47.70 ^b	—	0.06 ^a 0.07 ^b	8.61	0.13	3.18	2.35	Фемида
325 Хайдельберга	75.72 ^a	M ¹	0.11 ^a	6.74	0.15	3.22	8.58	—
349 Дембовска	139.77 ^a	R ¹ , R ²	0.38 ^a	4.70	0.09	2.92	8.25	—
359 Георгия	43.89 ^a 43.06 ^b	CX ¹ , X ²	0.26 ^a 0.17 ^b	5.54	0.16	2.73	6.77	—
360 КАРЛОВА	129.13 ^a 115.62 ^b	C ¹ , C ²	0.04 ^a 0.05 ^b	6.18	0.17	3.01	11.74	—
454 Матезида	81.74 ^a	CB ¹	0.06 ^a	8.38	0.11	2.63	6.29	—

Таблица 1. Продолжение

Номер и название	Диаметр, км	Класс ^a	Геометр. альбедо	Период вращения ^a , ч	e^a	a^a , а. е.	Наклонение орбиты ^a , град	Семейство ^b
461 Саксия	43.60 ^a 40.27 ^b	FCX ¹	0.06 ^a 0.07 ^b	7.35	0.15	3.12	1.47	Фемида
464 Мегера	77.06 ^a	FXU ¹ , C ²	0.05 ^a	12.88	0.20	2.80	10.16	Церера ^b
505 Кава	115 ^a 104.96 ^b	FC ¹	0.04 ^a 0.06 ^b	8.18	0.24	2.69	9.82	—
524 Фиделио	65.53 ^a 71.67 ^b	XC ¹	0.05 ^a 0.04 ^b	14.20	0.13	2.64	8.22	—
546 Геродиада	65.95 ^a 65.96 ^b	TDG ¹	0.05 ^a	10.77	0.12	2.60	14.87	Эвномия ^b
588 Ахиллес	130.10 ^a	DU ¹	0.04	7.31	0.15	5.21	10.32	—
604 Текмесса	64.54 ^a 64.88 ^b	Xc ²	0.09 ^a 0.07 ^b	5.56	0.19	3.15	4.42	—
608 Адольфина	20.37 ^a 25.36 ^b	—	0.25 ^a 0.12 ^b	8.35	0.12	3.02	9.37	Эос
621 Верданди	29.73 ^a 26.80 ^b	FCX ¹	0.13 ^a 0.09 ^b	11.78	0.14	3.12	2.30	Фемида
629 Бернардина	35.09 ^a 29.97 ^b	X ²	0.14 ^a 0.19 ^b	3.76	0.16	3.13	9.24	—
647 Адельгунда	9.73 ^a 16.94 ^b	X ¹ , S* ^b	0.51 ^a 0.20 ^b	32.20	0.19	2.44	7.32	—
648 Пиппа	68.27 ^a	XC ¹	0.05 ^a	9.26	0.20	3.19	9.87	—
654 Зелинда	160.74 ^a 127.17 ^b	C ¹ , Ch ²	0.03 ^a 0.04 ^b	31.74	0.23	2.30	18.09	—
689 Зита	15.62 ^a	CX ¹	0.10 ^a	6.43	0.23	2.32	5.74	—
726 Джоэлла	44.02 ^a	—	0.05 ^a	13.04	0.29	2.57	15.44	—
727 Ниппония	32.17 ^a	DT ¹	0.24 ^a	5.07	0.10	2.57	15.06	Мария
750 OCKAP	22.53 ^a 20.54 ^b	F ¹	0.06 ^a 0.05 ^b	6.26	0.13	2.44	3.95	Ниса–Пулана
757 Портлендия	32.89 ^a	XF ¹ , Xk ²	0.22 ^a 0.16 ^b	6.58	0.11	2.37	8.17	Атхор*
764 Гедания	58.28 ^a 58.05 ^b	C ¹	0.08 ^a 0.07 ^b	24.97	0.09	3.19	10.00	—
814 Таврида	102.23 ^a 109.48 ^b	C ¹ , C ²	0.05 ^a 0.04 ^b	36.08	0.31	3.16	21.79	—
868 Лова	50.69 ^a 52.43 ^b	C ¹ , Ch ²	0.06 ^a 0.05 ^b	41.12	0.15	2.70	5.84	—
907 Рода	82.66 ^a 62.73 ^b	C ¹ , Xk ²	0.03 ^a 0.06 ^b	22.44	0.16	2.80	19.53	—

Таблица 1. Окончание

Номер и название	Диаметр, км	Класс ^a	Геометр. альбето	Период вращения ^a , ч	e^a	a^a , а. е.	Наклонение орбиты ^a , град	Семейство ^b
917 Лика	34.88 ^a 27.85 ^b	—	0.06 ^a 0.05 ^b	7.87	0.20	2.38	5.13	—
1021 Фламмарион	100.77 ^a	F ¹ , B ²	0.05 ^a	12.16	0.28	2.74	15.86	—
1116 Катриона	38.74 ^a 38.96 ^b	C ^{*6} ?	0.16 ^a 0.13 ^b	8.83	0.22	2.93	16.55	—
1121 Наташа	12.86 ^a 12.41 ^b	S ⁶	0.29 ^a 0.27 ^b	13.20	0.16	2.55	6.17	Астрея
1239 Кетелета	18.68 ^a 13.54 ^b	C ^{*6}	0.05 ^a 0.10 ^b	10.28	0.23	2.66	1.66	—
1282 Утопия	57.70 ^a 52.88 ^b	C ^{*6}	0.05 ^a	13.62	0.12	3.12	18.03	—
1326 Лосака	26.34 ^a 22.42 ^b	CSU ¹	0.09 ^a 0.14 ^b	6.90	0.22	2.67	15.98	—
1467 Машона	89.16 ^a 99.45 ^b	GC ¹	0.08 ^a 0.06 ^b	9.76	0.13	3.39	21.90	Кибела
1475 Ялта	7.89 ^b	S ^{*6}	0.20 ^b	70.77	0.17	2.35	4.51	—
1544 Винтерхансения	24.56 ^a	S ^{*6?}	0.06	13.54	0.10	2.37	3.33	—
1655 Комас Сола	35.94 ^a 30.53 ^b	XFU ¹ , B ²	0.05 ^a 0.07 ^b	20.46	0.23	2.78	9.58	—
1687 Гларона	37.85 ^a 33.66 ^b	—	0.14 ^a 0.08 ^b	6.50	0.17	3.16	2.63	Фемида
1771 Маковер	46.89 ^a 56.53 ^b	C ^{*6}	0.07 ^a 0.04 ^b	11.26	0.17	3.13	11.22	—

Примечания: только у трех астероидов спектральные типы неизвестны (316 Гоберта, 608 Адольфина и 726 Джоэлла), но примерно у половины остальных астероидов спектральные типы определены неточно. Названия астероидов, имеющих спектральные признаки активности, выделены прописными буквами. Астероиды, у которых номера выделены полужирным шрифтом, имеют повышенное геометрическое альбето (>0.10), что характеризует их как преимущественно высокотемпературные.

Условные обозначения: Источник информации отмечен надстрочными буквами:

^a <https://ssd.jpl.nasa.gov/>

^b <https://www.minorplanet.info/>

^c <https://sbnarchive.psi.edu/>

В случае совпадения данных их источник не указывается. По умолчанию в качестве основного источника берутся значения с сайта JPLNASA.

Классификация отмечена надстрочными цифрами: ¹ согласно классификации Толена (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>);

² согласно классификации SMASSII (Bus, Binzel, 2002; <https://ssd.jpl.nasa.gov/>).

Надстрочный знак * у спектрального класса означает, что оценка класса проводилась на основе орбитального местоположения с использованием оскулирующих элементов (предполагаемой орбитальной группировкой (<https://www.minorplanet.info/php/lcdb.php>)).

Диапазон эффективных диаметров рассматриваемых астероидов $\sim 8 \div 209$ км.

Таблица 2. Наблюдательные параметры активных и подозреваемых в активности астероидов

Дата	UT сред., час, мин, с	Прямое восхожд., час, мин, с	Склонен., град, мин, с	Геоц. расст., а. е.	Гелиоц. расст., а. е.	Элонг., град	Фазов. угол, град	164 ЕВА					Звезда-аналог Солнца	Возд. масса звезд
								[$\Delta I_{\text{act}} - I_{\text{K.3B}}$]/SNR _{act} /SNR _{K.3B} в полосе U	Средняя ошибка (1/SNR)аст	Возд.масса	Звезда- велич, V^m	Высота над гориз. (град.) (град.)		
2023.01.09	17:53:21	03 49 47.78	+22 24 23.6	1.3989	2.1765	131.2344	19.8596	12.223	68.7	22/58/50	0.02	1.073	HD 283755	1.064
	17:57:11	03 49 47.75	+22 24 25.4	1.3989	2.1765	131.2315	19.8605	12.223	68.6			1.074		
	18:00:51	03 49 47.72	+22 24 27.2	1.3989	2.1765	131.2287	19.8613	12.223	68.5			1.075		
360 КАРЛОВА														
2023.01.10	02:20:37	11 43 25.35	+08 08 35.9	2.3791	2.9477	116.1305	17.4336	13.716	53.0	38/18/144	0.06	1.251	HD 107515	1.182
	02:26:14	11 43 25.39	+08 08 36.6	2.3791	2.9477	116.1340	17.4330	13.716	52.7			1.257		
	02:31:52	11 43 25.44	+08 08 37.5	2.3790	2.9477	116.1381	17.4324	13.716	52.3			1.263		
629 БЕРНАРДИНА														
2022.12.29 2022.12.30	23:47:31 23:57:48	07 14 16.45 07 14 16.07	+26 41 30.9 +26 41 33.1	1.6788 1.6788	2.6535 2.6535	170.3281 170.3357	3.5747 3.5720	13.605 13.605	60.9	-492/111/996	0.01	1.143	Wolf 1059	1.080
	00:07:10	07 14 15.72	+26 41 35.1	1.6788	2.6535	170.3424	3.5695	13.605	57.8			1.162		
2023.01.24	22:21:46	06 51 12.06	+28 38 28.6	1.7099	2.6410	156.2768	8.6204	13.884	55.5	10/47/150	0.02	1.212	Wolf 1059	1.095
	22:28:36	06 51 11.83	+28 38 29.6	1.7099	2.6410	156.2711	8.6224	13.884	54.3			1.230		
	22:35:26	06 51 11.64	+28 38 30.3	1.7099	2.6410	156.2662	8.6241	13.884	53.2			1.249		
726 Джеопла														
2023.01.09	16:33:20	03 18 29.56	+13 47 18.2	1.5430	2.2257	121.9634	22.0105	14.422	58.9	24/8/65	0.13	1.167	HD 283755	1.150
	16:40:47	03 18 29.69	+13 47 17.1	1.5430	2.2257	121.9582	22.0117	14.422	59.3			1.162		
	16:48:14	03 18 29.82	+13 47 16.1	1.5430	2.2257	121.9537	22.0127	14.422	59.6			1.158		

Таблица 2. Продолжение

Дата	UT сред., час, мин, с	Прямое восхожд., час, мин, с	Склонен., град, мин, с	Геоц. расст., а. е.	Гелиоц. расст., а. е.	Элонг., град	Фазов. угол, град	Звезд. велич, V^m	Высота над гориз. (град.) (град.)	[$\Delta I_{act} - I_{K.3B}$]/ $SNR_{act}/SNR_{K.3B}$ в полосе U	Средняя ошибка (1/SNR)act	Возд. масса	Звезда-аналог Солнца	Возд. масса звезд	750 ОСКАР					
															757 Портлендия	757 Наташа	757 Портлендия	757 Наташа	757 Портлендия	757 Наташа
2023 01 10	19:07:01	05 10 55.57	+25 31 17.8	1.3227	2.2236	148.8987	13.2019	15.492	71.8	97/27/381	0.04	1.053	HD 283755	1.080						
	19:18:49	05 10 55.20	+25 31 18.0	1.3228	2.2235	148.8888	13.2059	15.492	71.5			1.055								
	19:30:37	05 10 54.84	+25 31 18.3	1.3228	2.2235	148.8789	13.2098	15.493	70.8			1.058								
750 ОСКАР																				
2022 12 24	03:12:40	09 43 23.85	+27 02 38.6	1.4234	2.2033	131.6259	19.4999	13.566	55.6	-68/82/296	0.01	1.210	HD 105633	1.145						
	03:18:25	09 43 23.83	+27 02 39.5	1.4234	2.2033	131.6294	19.4987	13.565	54.7			1.225								
	03:24:11	09 43 23.80	+27 02 40.6	1.4234	2.2033	131.6336	19.4973	13.565	53.7			1.241								
2022 12 31	00:09:38	09 42 01.29	+27 36 31.2	1.3742	2.2100	138.6371	17.1048	13.417	73.7	-96/71/190	0.01	1.041	Wolf 1059	1.102						
	00:14:47	09 42 01.22	+27 36 32.3	1.3742	2.2100	138.6408	17.1035	13.417	73.8			1.042								
	00:19:58	09 42 01.14	+27 36 33.4	1.3741	2.2100	138.6445	17.1022	13.417	73.7			1.042								
757 Портлендия																				
2022 12 18	23:58:25	06 46 37.52	+33 48 29.8	1.2813	2.2411	163.0833	7.3438	14.355	66.4	-1096/32/607	0.03	1.092	Wolf 1059	1.049						
2022 12 19		06 46 37.19	+33 48 30.3	1.2813	2.2411	163.0880	7.3418	14.354	65.1			1.102								
	00:05:10	06 46 37.05	+33 49 50.5	1.3903	2.2880	148.5041	12.9831	14.805	51.6	-	-	1.275	Wolf 1059	1.089						
2023 01 22	22:24:49	06 10 22.74	+33 09 49.4	1.3904	2.2880	148.4988	12.9850	14.805	50.3			1.298								
	22:31:41	06 10 22.54	+33 09 48.3	1.3904	2.2880	148.4935	12.9870	14.805	49.0			1.322								
	22:38:35	06 10 22.35	+33 09 48.3	1.3904	2.2880	148.4935	12.9870	14.805	49.0											
757 Наташа																				
2022 12 18	23:58:25	06 46 37.52	+33 48 29.8	1.2813	2.2411	163.0833	7.3438	14.355	66.4	-1096/32/607	0.03	1.092	Wolf 1059	1.049						
2022 12 19		06 46 37.19	+33 48 30.3	1.2813	2.2411	163.0880	7.3418	14.354	65.1			1.102								
	00:05:10	06 46 37.05	+33 09 49.4	1.3904	2.2880	148.5041	12.9831	14.805	51.6	-	-	1.275	Wolf 1059	1.089						
2023 01 22	22:24:49	06 10 22.74	+33 09 48.3	1.3904	2.2880	148.4988	12.9850	14.805	50.3			1.298								
	22:31:41	06 10 22.54	+33 09 48.3	1.3904	2.2880	148.4935	12.9870	14.805	49.0			1.322								
	22:38:35	06 10 22.35	+33 09 48.3	1.3904	2.2880	148.4935	12.9870	14.805	49.0											
1121 Наташа																				
2022 12 18	23:58:25	06 46 37.52	+33 48 29.8	1.2813	2.2411	163.0833	7.3438	14.355	66.4	-1096/32/607	0.03	1.092	Wolf 1059	1.049						
2022 12 19		06 46 37.19	+33 48 30.3	1.2813	2.2411	163.0880	7.3418	14.354	65.1			1.102								
	00:05:10	06 46 37.05	+33 09 49.4	1.3904	2.2880	148.5041	12.9831	14.805	51.6	-	-	1.275	Wolf 1059	1.089						
2023 01 22	22:24:49	06 10 22.74	+33 09 48.3	1.3904	2.2880	148.4988	12.9850	14.805	50.3			1.298								
	22:31:41	06 10 22.54	+33 09 48.3	1.3904	2.2880	148.4935	12.9870	14.805	49.0			1.322								
	22:38:35	06 10 22.35	+33 09 48.3	1.3904	2.2880	148.4935	12.9870	14.805	49.0											

Окончание	Дата	Склонен., град, мин, с	Геоц. расст., а. е.	Гелиоц. расст., а. е.	Элонг., град	Фазов. угол, град	Звезд. велич, V^m	Высота над гориз. (град.) (град.)	$[\Delta I_{\text{act}} - I_{\text{K.3B}}]/$ $\text{SNR}_{\text{act}}/\text{SNR}_{\text{K.3B}}$ в полосе U	1655 Комассола														
										1687 Гларона														
										2023 01 09	20:10:22	07 33 13.25	+22 54 36.6	1.8534	2.8362	177.3133	0.9361	14.441	63.7	—	—	1.114	Wolf 1059	1.097
										19:42:46	06 47 21.96	+21 25 57.5	1.2269	2.2002	168.9117	4.9271	13.723	65.0	1/98/226	0.01	1.103	HD 283755	1.106	
										19:49:20	06 47 21.73	+21 25 59.3	1.2269	2.2002	168.9007	4.9320	13.724	66.1	—	1.098	—	—	—	—
										20:20:30	07 33 12.82	+22 54 37.9	1.8534	2.8362	177.3218	0.9332	14.441	65.0	—	—	1.103	—	—	—
										20:30:38	07 33 12.44	+22 54 39.1	1.8535	2.8362	177.3295	0.9305	14.440	66.1	—	—	1.094	—	—	—
										2023 01 20	19:45:56	07 23 28.47	+23 23 43.1	1.8802	2.8521	168.8577	3.8180	14.693	67.3	-61/50/372	0.02	1.084	Wolf 1059	1.077
										19:54:12	07 23 28.18	+23 23 43.9	1.8802	2.8521	168.8509	3.8203	14.693	68.0	—	—	1.078	—	—	—
										20:02:28	07 23 27.88	+23 23 44.7	1.8803	2.8521	168.8441	3.8226	14.693	68.5	—	—	1.074	—	—	—

Примечания: названия активных астероидов выделены прописными буквами; $[\Delta I_{\text{act}} - I_{\text{K.3B}}]$ – разность средне-квадратических отклонений величины светового потока астероида и контрольной звезды в полосе U ; SNR_{act} и $\text{SNR}_{\text{K.3B}}$ – средние значения отношения “сигнал/шум” (SNR) астероида и контрольной звезды в полосе U , соответственно; средняя ошибка интенсивности светового потока в полосе U не приведена для контрольных звезд, так как во всех случаях она не превышала 0.02.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.*)
2. Бусарев В.В. Спектральные исследования астероидов 21 Лютеция и 4 Веста как объектов космических миссий // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. № 6. С. 539–551. (*Busarev V.V. Spectral investigations of asteroids 21 Lutetia and 4 Vesta as objects of space missions // Sol. Syst. Res. 2010. V. 44. № 6. P. 507–519.*)
3. 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.*)
4. 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 VB. 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.*)
5. Бусарев В.В., Щербина М.П., Барабанов С.И., Ирсмамбетова Т.Р., Кохирова 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 Цибеллы // Астрон. вестн. 2019. Т. 53 (4). С. 273–290 (*Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I., Irsmambetova T.R., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh., Khamitov I.M., Bikmaev I.F., Gumarov 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 Nemauza and 65 Cybele // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53 (4). P. 261–277.*)
6. Бусарев В.В., Савелова А.А., Щербина М.П., Барабанов С.И. Спектральные признаки одновременной сублимационной активности и появления пылевой экзосферы у 8 астероидов Главного пояса вблизи перигелия // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 2. С. 92–108. (*Busarev V.V., Savelova A.A., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Spectral signs of simultaneous sublimation activity and the appearance of a dust exosphere on eight asteroids of the Main belt near perihelion // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 2. P. 84–99.*)
7. Бусарев В.В., Петрова Е.В., Щербина М.П., Кузнецов С.Ю., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Савелова А.А., Белинский А.А. Поиск признаков сублимационно-пылевой активности астероидов примитивных типов вблизи перигелия // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 5. С. 439–457. (*Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Kuznetsov S.Yu., Burlak M.A., Ikonnikova N.P., Savelova A.A., Belinskii A.A. Search for signs of sublimation-driven dust activity of primitive-type asteroids near perihelion // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. № 5. P. 449–466.*)
8. Петрова Е.В., Бусарев В.В. О возможностях оценки свойств частиц в экзосфере активного астероида по деталям в УФ- и видимом диапазонах спектров отражения // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 2. С. 166–180. (*Petrova E.V., Busarev V.V. On the prospects for estimating the properties of particles in an active asteroid exosphere by features in the UV and visible reflectance spectra // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. № 2. P. 161–174.*)
9. Шустов Б.М., Золотарёв Р.В., Бусарев В.В., Щербина М.П. Ударные события как возможный механизм активации сублимационно-пылевой активности астероидов Главного пояса // Астрон. журн. 2022. Т. 99. С. 1058–1071.
10. Berg O.E., Wolf H., Rhee J. Lunar Soil Movement Registered by the Apollo 17 Cosmic Dust Experiment // Int. Astron. Union Colloq. Cambridge Univ. Press, 1976. V. 31. P. 233–237.
11. Bessell M.S. UVRI photometry II: The Cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry // Publ. Astron. Soc. Pacif. 1979. V. 91. P. 589–607.
12. Bessell M.S. Standard photometric systems // Annu. Rev. Astron. and Astrophys. 2005. V. 43. P. 293–336.
13. Bottke Jr W.F., Vokrouhlický D., Rubincam D.P., Nesvorný D. The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics // Annu. Rev. Earth and Planet. Sci. 2006. V. 34. 157–191.
14. Bradley J.P., Sandford S.A., Walker R.M. Interplanetary dust particles // Meteorites and the early Solar system / Eds: Kerridge J.F., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 861–895.

15. Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey. A feature-based taxonomy // Icarus. 2002. V. 158. P. 146–177.
16. Bus S., Binzel R.P. Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey, Phase II. EAR-A-I0028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0. NASA Planetary Data System, 2003.
17. Busarev V.V. Spectral features of M-asteroids: 75 Eurydike and 201 Penelope // Icarus. 1998. V. 131. P. 32–40.
18. Busarev V.V. A hypothesis on the origin of C-type asteroids and carbonaceous chondrites // Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2012. Proc. Conf. May 16–20. 2012. Niigata, Japan. LPI Contrib. № 1667. Id. 6017. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1211/1211.3042.pdf>.
19. 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.
20. Busarev V.V., Petrova E.V., Irsambetova 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. Id. 114634 (18 p.).
21. Busarev V.V., Petrova E.V., Puzin V.B., Barabanov S.I., Shcherbina M.P., Kuznetsov S.Yu. An optically thin and thick dust exosphere of active asteroids: Spectral signs and possible formation mechanisms // Sol. Syst. Res. 2024. V. 58. No. 3. P. 315–325.
22. Chandler C.O., Kueny J.K., Trujillo C.A., Trilling D.E., Oldroyd W.J. Cometary activity discovered on a distant Centaur: A nonaqueous sublimation mechanism // Astrophys. J. Lett. 2020. V. 892. Id. L38 (13 p.).
23. Chandler C.O., Trujillo C.A., Hsieh H.H. Recurrent activity from active asteroid (248370) 2005 QN173: A Main-belt comet // Astrophys. J. Lett. 2021. V. 922. Id. L8 (10 p.).
24. Chandler C.O., Trujillo C.A., Oldroyd W.J., J. Kueny K., Burris W.A., Hsieh H.H., DeSpain J.A., Sedaghat N., Sheppard S.S., Farrell K.A. and 16 co-authors. The Active Asteroids Citizen Science Program: Overview and first results // Astron. J. 2024. V. 167. Id. 156 (24 p.).
25. Criswell D.R. Lunar dust motion // Proc. 3rd Lunar Sci. Conf. (Suppl. 3, Geochim. et Cosmochim. Acta). 1972. V. 3. P. 2671–2680.
26. Cunningham L.E. Periodic comet Wilson-Harrington (1949g) // IAU Circular. 1950. V. 1250. P. 3.
27. De Sanctis M.C., Combe J.-Ph., Ammannito E., Palomba E., Longobardo A., McCord T. B., Marchi S., Capaccioni F., Capria M.T., Mittlefehldt D.W., and 11 coauthors. Detection of widespread hydrated materials on Vesta by the VIR imaging spectrometer on board the Dawn mission // Astrophys. J. Lett. 2012. V. 758. Id. L36 (5 p.).
28. Devogèle M., Ferrais M., Jehin E., Moskovitz N., Skiff B.A., Levine S.E., Gustafsson A., Farnocchia D., Micheli M., C. Snodgrass, and 15 co-authors. (6478) Gault: Physical characterization of an active Main-belt asteroid // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2021. V. 505. P. 245–258.
29. Dorschner J., Begemann B., Henning T., Jaeger C., Mutschke H. Steps toward interstellar silicate mineralogy. II. Study of Mg-Fe-silicate glasses of variable composition // Astron. and Astrophys. 1995. V. 300. P. 503–520.
30. Ezer D., Cameron G.W. The early evolution of the Sun // Icarus. 1962. V. 1. P. 422–441.
31. Gaffey M.J., Bell J.F., Brown R.H., Burbine T.H., Piatek J.L., Reed K.L., Chaky D.A. Mineralogical variations within the S-type asteroid class // Icarus. 1993. V. 106. P. 573–602.
32. Gaffey M.J., Cloutis E.A., Kelley M.S., Reed K.L. Mineralogy of asteroids // Asteroids III / Eds: Bottke W. et al.) Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 183–204.
33. Gustafson B.A.S., Kolokolova L. A systematic study of light scattering by aggregate particles using the microwave analog technique: Angular and wavelength dependence of intensity and polarization // J. Geophys. Res. 1999. V. 104 (D24). P. 31711–31720.
34. Güttler C., Mannel T., Rotundi A., Merouane S., Fulle M., Bockelée-Morvan D., Lasue J., Levasseur-Regourd A.C., Blum J., Naletto G., and 21 co-authors. Synthesis of the morphological description of cometary dust at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Astron. and Astrophys. 2019. V. 630. Id. A24.
35. Hartzell C.M. Dynamics of 2D electrostatic dust levitation at asteroids // Icarus. 2019. V. 333. P. 234–242.
36. Hsieh H.H., Jewitt D.A., Fernández Y.R. The strange case of 133P/Elst-Pizarro: A comet among the asteroids // Astron. J. 2004. V. 127. P. 2997–3017.
37. Hsieh H.H., Jewitt D.A. Population of comets in the Main asteroid belt // Science. 2006. V. 312. P. 561–563.
38. Hsieh H.H., Haghighipour N. Potential Jupiter-Family comet contamination of the Main asteroid belt // Icarus. 2016. V. 277. P. 19–38.
39. Jewitt D. The active asteroids // Astron. J. 2012. V. 143. Id. 66 (14 p.).
40. Jewitt D., Hsieh H.H. The asteroid-comet continuum // arXiv preprint arXiv:2203.01397. – 2022.

- Chapter in press for the book Comets III / Eds: Meech K., Combi M. Univ. of Arizona Press (35 p.).
41. Johnson H.L. Infrared photometry of M-dwarf stars // *Astrophys. J.* 1965. V. 141. P. 170–176.
 42. Kellogg P.J., Horbury T.S. Rapid density fluctuations in the solar wind // *Ann. Geophys.* 2005. V. 23. P. 3765–3773.
 43. Kelley M.S., Hsieh H.H., Bodewits D., Saki M., Vilanueva G.L., Milam S.N., Hammel H.B. Spectroscopic identification of water emission from a Main-belt comet // *Nature*. 2023. V. 619. P. 720–723.
 44. Lee P. Dust levitation on asteroids // *Icarus*. 1996. V. 124. P. 181–194.
 45. Li A., Greenberg J.M. A unified model of interstellar dust // *Astron. and Astrophys.* 1997. V. 232. P. 566–584.
 46. Malaspina D.M., Kellogg P.J., Bale S.D., Ergun R.E. Measurements of rapid density fluctuations in the solar wind // *Astrophys. J.* 2010. V. 711. P. 322–327.
 47. Mannel T., Bentley M.S., Schmied R., Jeszenszky H., Levasseur-Regourd A.C., Romstedt J., Torkar K. Fractal cometary dust – a window into the early Solar system // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. S304–S311. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2898>.
 48. McCord T.B., Li J.-Y., Combe J.-P., McSween H.Y., Jaumann R., Reddy V., Tosi F., Williams D.A., Blewett D.T., Turrini D., and 19 coauthors. Dark material on Vesta from the infall of carbonaceous volatile-rich material // *Nature*. 2012. V. 491. P. 83–86.
 49. Nitter T., Havnes O. Dynamics of dust in a plasma sheath and injection of dust into the plasma sheath above Moon and asteroidal surfaces // *Earth, Moon, and Planets*. 1992. V. 56. P. 7–34.
 50. Onyeagusi F.C., Jungmann F., Teiser J., Wurm G. Electrostatic Repulsion of Dust from Planetary Surfaces // *Planet. Sci. J.* 2023. V. 4(1). Id. 13 (7p.).
 51. Rivkin A.S., Howell E.S., Britt D.T., Lebofsky L.A., Nolan M.C., Branston D.D. 3-μm spectrophotometric survey of M- and E-class asteroids // *Icarus*. 1995. V. 117. P. 90–100.
 52. Rivkin A.S., Howell E.S., Lebofsky L.A., Clark B.E., Britt D.T. The nature of M-class asteroids from 3-μm observations // *Icarus*. 2000. V. 145. P. 351–368.
 53. Rouleau F., Martin P.G. Shape and clustering effects on the optical properties of amorphous carbon // *Astrophys. J.* 1991. V. 377. P. 526–540.
 54. Schorghofer N. The lifetime of ice on Main belt asteroids // *Astrophys. J.* 2008. V. 682. P. 697–705.
 55. Schorghofer N. Predictions of depth-to-ice on asteroids based on an asynchronous model of temperature, impact stirring, and ice loss // *Icarus*. 2016. V. 276. P. 88–95.
 56. 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.
 57. Tishkovets V.P., Petrova E.V. Spectra of light reflected by aggregate structures of submicron particles // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2020. V. 252. Id. 107116.
 58. Veeder G.J., Tedesco E.F. Results from the IRAS Minor Planet Survey // *IRAS Minor Planet Survey. Final Report PL-TR-92-2049* / Eds: Tedesco E.F., et al. Massachusetts: Phillips Laboratory, 1992. P. 107–126.
 59. Warren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. Id. D14220.
 60. Willson R.C., Hudson H.S. The Sun's luminosity over a complete solar cycle // *Nature*. 1991. V. 351. P. 42–44.
 61. Yeo L.H., Wang X., Deca J., Hsu H.W., Horányi M. Dynamics of electrostatically lofted dust on airless planetary bodies // *Icarus*. 2021. V. 366. Id. 114519.
 62. Zank G.P., Matthaeus W.H. Waves and turbulence in the solar wind // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 17.189–17.194.