

УДК 523.44

ПОИСК ПРИЗНАКОВ СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВОЙ АКТИВНОСТИ АСТЕРОИДОВ ПРИМИТИВНЫХ ТИПОВ ВБЛИЗИ ПЕРИГЕЛИЯ

© 2023 г. В. В. Бусарев^{a, b, *}, Е. В. Петрова^c, М. П. Щербина^{a, b}, С. Ю. Кузнецов^d, М. А. Бурлак^a, Н. П. Иконникова^a, А. А. Савелова^e, А. А. Белинский^a

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

^bИнститут астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

^cИнститут космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

^dМГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет космических исследований, Москва, Россия

^eМГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

С декабря 2021 г. по февраль 2022 г. в Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ на 0.6-метровом полуавтоматическом телескопе RC600 проведена *UBVRI*-фотометрия доступных для наблюдений 29 астероидов Главного пояса примитивных типов, находившихся вблизи перигелийных расстояний. Наблюдения, обработка и анализ этих данных проводились с целью поиска предполагаемой сублимационно-пылевой активности астероидов при максимальных подсолнечных температурах. В число решаемых задач входило также сравнение физических и динамических параметров активных и неактивных астероидов. Основным результатом является обнаружение значительных спектральных признаков квазисовременной сублимационно-пылевой активности шести астероидов примитивных типов Главного пояса – 145 Адеоны, 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратиславии и 779 Нины (у 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратиславии – впервые), что составляет ~21% от общего числа тел, включенных в данную наблюдательную программу. Вероятные спектральные проявления активности с меньшей интенсивностью были впервые обнаружены еще у пяти астероидов: 424 Грации, 751 Фаины, 762 Пулковой, 778 Теобальды и 859 Бузара. Сублимационно-пылевая активность 145 Адеоны и 779 Нины вблизи перигелия нами зарегистрирована уже в третий раз на протяжении последних 10 лет, что соответствует примерно трем периодам обращения этих астероидов вокруг Солнца. Рассматриваются причины наличия астероидных семейств у пяти из перечисленных астероидов. Обсуждаются общие процессы и условия, которые могли и/или могут влиять на относительное количество объектов с квазисовременной сублимационно-пылевой активностью среди астероидов примитивных типов.

Ключевые слова: астероиды, *UBVRI*-фотометрия, химико-минеральный состав вещества, льды H₂O и CO₂, сублимационно-пылевая активность

DOI: 10.31857/S0320930X23050018, **EDN:** OCGFJC

ВВЕДЕНИЕ

Проблема активности астероидов возникла около 25 лет назад, когда в Главном поясе астероидов (ГПА) были обнаружены несколько небольших объектов, проявивших временную кометоподобную активность. На прямых снимках этих тел были зарегистрированы характерные кометные хвосты, поэтому их назвали “кометами Главного пояса” (Hsieh, Jewitt, 2006; Hsieh, 2009). Тогда предположили, что это, возможно, – потерявшие активность ядра комет из семейства Юпитера, которые попали в ГПА под влиянием гравитационных резонансов (Hsieh, Nighipour, 2016). Но, несмотря на тщательные поиски, общее чис-

ло тел, имевших явные признаки кометной активности в момент обнаружения, пока не превышает десяти, а остальные 2–3 десятка, с более слабыми проявлениями активности, являются известными астероидами Главного пояса (см., например, Chandler и др., 2018; Hsieh и др., 2018; Jewitt, Hsieh, 2022). В связи с этим следует подчеркнуть, что наиболее многочисленная популяция астероидов Главного пояса (составляющая по некоторым оценкам до ~75% ГПА), – это тела примитивных типов с низкотемпературной минералогией, преимущественно входящие в таксономические (спектральные) классы C, B, F, и G, которым, как считается, соответствуют углистые

хондриты, имеющие признаки водных изменений. Анализ спектральных характеристик и оценка минералогии этих астероидов (см., например, Gaffey и др., 1989; 2002), моделирование процессов их формирования (см., например, Zolensky и др., 1989; McSween Jr. и др., 2002), а также изучение углистых хондритов (см., например, Bradley, 2006; Alexander и др., 2018 и ссылки там же), свидетельствуют о формировании их родительских тел в ранней Солнечной системе в окрестности “линии льда H_2O ” или за ее пределами. Поэтому весьма вероятно, что большинство астероидов ГПА перечисленных примитивных типов потенциально может проявлять сублимационно-пылевую активность (СПА) при условии наличия в их недрах ледяных залежей. Остановимся на этом более подробно в разделе “Дискуссия”.

Как показали недавние космические исследования астероидов С-типа 1 Церера на КА Dawn (NASA) и 162173 Рюгу на КА Hayabusa-2 (см., например, Schorghofer, 2016; Sugita и др., 2019), реголит астероидов примитивных типов состоит из очень мелких частиц, имеет высокую пористость и крайне низкую теплопроводность, а его толщина может достигать нескольких метров или даже больше. В таком случае время “выживания” льдов (в основном H_2O по причине более высокой летучести CO_2) (см., например, Fanale, Salvail, 1989; Longhi, 2005) может достигать ~4 млрд лет (Schorghofer, 2008, 2016). Можно также предполагать, что локальные обнажения подповерхностных ледяных залежей или выбросы ледяных материалов регулярно возникают на поверхности таких астероидов в результате ударных событий, происходящих в ГПА с высокой частотой и имеющих широкий спектр энергий. Основным признаком регулярных и массовых ударных событий в ГПА являются связанные с ним устойчивые пылевые пояса, обнаруженные по данным КА IRAS (Sykes и др., 1989; Veeder, Tedesco, 1992). Высокая вероятность ударных событий в ГПА также подтверждается результатами недавних модельными расчетами (Шустов и др., 2022). Еще одним регулярным и массовым фактором воздействия на астероиды являются солнечная вспышечная (в электромагнитном диапазоне, чаще всего в рентгеновском) и эруптивная (выброс вещества в виде плазмы) активность, которые приводят к образованию ударных МГД-волн в солнечном ветре, способных отрывать от поверхности астероидов и приводить в движение мельчайшие наэлектризованные частицы реголита и формировать из них пылевую экзосферу, приобретающую в моменты прохождения ударных волн форму короткого кометного хвоста, вытянутого в антисолнечном направлении (Бусарев, 2018; Busarev и др., 2021). Возможны и другие процессы, которые приводят к пылевой активности астероидов (см., например, Jewitt, 2012 и ссылки там же), но они являются более

экзотическими и/или имеют более низкую вероятность.

Поиски СПА (под этим термином мы понимаем образование газовых потоков при сублимации водяного льда, увлекающих мелкую пыль субмикронных размеров и формирующих разреженную пылевую экзосферу тела, удерживаемую его гравитационным полем) астероидов примитивных типов Главного пояса, связанной с их низкотемпературным происхождением и предполагаемым наличием подповерхностных ледяных слоев, были нами начаты около 10 лет назад (Busarev и др., 2015). Использование спектрофотометрии низкого разрешения позволило обнаружить СПА сразу четырех астероидов: 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры (Busarev и др., 2015; Бусарев и др., 2016). Последующие наблюдения (включая рассматриваемые здесь) дважды подтвердили СПА вблизи перигелия 145 Адеоны и 779 Нины и, повторно, 704 Интерамнии (Busarev и др., 2015; 2018; Бусарев и др., 2019). Таким образом, имеются признаки периодичной у перигелия и/или имеющую большую длительность СПА некоторых астероидов примитивных типов, на поверхности которых могут возникать обнажения ледяных материалов, возможно, по причине их близости к поверхности. Целью данной статьи является представление и обсуждение результатов поиска новых астероидов примитивных типов в Главном поясе с признаками СПА, а также изучение вызывающих ее причин.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Нами выполнены новые *UBVRI*-наблюдения 29 астероидов примитивных типов в Главном поясе, находившихся вблизи перигелия в декабре 2021 г.—феврале 2022 г. Для этого был использован телескоп RC600 (0.6 м) в Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ (высота 2112 м над уровнем моря). Телескоп работает в полуавтоматическом режиме и оснащен фотометром Andor (iKON-L DZ-936N-BV; ПЗС-матрица 2048×2048 элементов; размер пикселя 13.5 мкм) с набором *UBVR_cI_c*-светофильтров системы Джонсона—Козинса и ПЗС-матрицей, охлаждаемой до -60°C . Эффективные длины волн *UBVR_cI_c*-светофильтров — соответственно 355.9, 427.0, 543.9, 656.6 и 804.1 нм — определялись по интегральной формуле для средней взвешенной величины $\lambda_{\text{эф}}$ с учетом функции спектрального пропускания $R(\lambda)$ каждого из них (см., например, Bessell, 2005; Мионов, 2008):

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\int R(\lambda)\lambda d\lambda}{\int R(\lambda)d\lambda}. \quad (1)$$

Таблица 1. Эффективные длины волн $\lambda_{\text{эф}}$ и полуширины $\Delta\lambda$ установленных светофильтров $UBVR_cI_c$ и результирующей фотометрической системы $U'B'V'R'_cI'_c$, а также их относительные различия

Эффективные длины волн и полуширины (нм)	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R_c</i>	<i>I_c</i>
$\lambda_{\text{эф}}$	355.9	427.0	543.9	656.6	804.1
$\Delta\lambda$	61.7	95.8	99.8	155.4	167.8
	<i>U'</i>	<i>B'</i>	<i>V'</i>	<i>R'_c</i>	<i>I'_c</i>
$\lambda'_{\text{эф}}$	366.3	436.5	544.8	653.5	797.1
$ (\lambda'_{\text{эф}} - \lambda_{\text{эф}})/\lambda_{\text{эф}} $	0.029	0.022	0.002	0.005	0.009
$\Delta\lambda'$	42.9	89.3	100.3	153.7	163.4
$ (\Delta\lambda - \Delta\lambda')/\Delta\lambda $	0.305	0.068	0.005	0.011	0.026

В табл. 1 представлены полуширины (FWHM) и эффективные длины волн установленных на телескопе RC600 $UBVR_cI_c$ -светофильтров (рис. 1а) и эти же параметры, рассчитанные для всей фотометрической системы $U'B'V'R'_cI'_c$ (рис. 1в), включая квантовую эффективность (КЭ) ПЗС-матрицы (рис. 1а), прозрачность входного окна камеры (ОК) (рис. 1а) и модельную медианную спектральную прозрачность атмосферы для КГО (СПКГО) ГАИШ (рис. 1б).

СПКГО была рассчитана (Kornilov и др., 2016) с помощью пакета программ для численного моделирования переноса излучения в земной атмосфере в зависимости от высоты обсерватории над уровнем моря, сезонного содержания в атмосфере водяного пара и ряда других параметров (Emde и др., 2016). Как видно (рис. 1б и 1в), на фотометрические полосы R_c и I_c оказывают влияние сильные теллурические полосы O_2 (A-band) и H_2O (Kucisz, 2005).

Как следует из табл. 1, относительные различия эффективных длин волн $UBVR_cI_c$ и $U'B'V'R'_cI'_c$ составляют соответственно 0.029, 0.022, 0.002, 0.005 и 0.009, а относительные отличия полуширин полос (FWHM) – соответственно 0.305, 0.068, 0.005, 0.011 и 0.026. Поскольку последние больше по величине, их можно принять за предельные погрешности измеряемых интенсивностей света от объектов при их пересчете во внеатмосферную систему.

Табл. 2 и 3 содержат перечень рассматриваемых 29 астероидов и их основные физические, динамические и наблюдательные параметры. В табл. 3 также приведены сведения о звездах солнечного типа, использованных при обработке данных.

Методика обработки данных

Для обнаружения пылевой активности астероидов нами применялась методика, основанная на дифференциальной $UBVR_cI_c$ -фотометрии этих тел и непременных стандартных звезд солнечного типа с целью определения отражательной способности астероидов на эффективных длинах волн светофильтров. Общепринятый в спектрофотометрии метод расчета отражательной способности астероида (или спектра отражения) как безатмосферного небесного тела выражается следующей формулой (см., например, Бусарев, 1999):

$$\rho(\alpha, \lambda) = k I_a(\alpha, \lambda) p(\lambda)^{-\delta M} / I_3(\lambda), \quad (2)$$

где $I_a(\lambda)$ и $I_3(\lambda)$ – монохроматические интенсивности света, регистрируемого на приемнике, от астероида и непременной звезды – солнечного аналога (заменяющей в первом приближении Солнце), из которых исключен фон неба; α – фазовый угол астероида, $p(\lambda)$ – функция спектральной прозрачности земной атмосферы, рассчитанная для данной наблюдательной ночи; $\delta M = M_a - M_3$ – разность воздушных масс, соответствующих астероиду и стандартной звезде; k – некоторый постоянный коэффициент.

В отличие от спектрофотометрии, при $UBVRI$ -фотометрии в формуле (2) использовались не монохроматические, а интегральные интенсивности света от объектов в фотометрических полосах. Кроме того, как уже отмечалось, несколько менялись полуширины самих фотометрических полос и значения $\lambda_{\text{эф}}$ (см. табл. 1) под влиянием спектральной чувствительности ПЗС-матрицы и функции спектральной прозрачности земной атмосферы (включая эффекты от теллурических полос). Но, с учетом деления интенсивности света от астероида на аналогичную величину от звезды солнечного типа (для определения отражательной способности астероида), такие изменения в

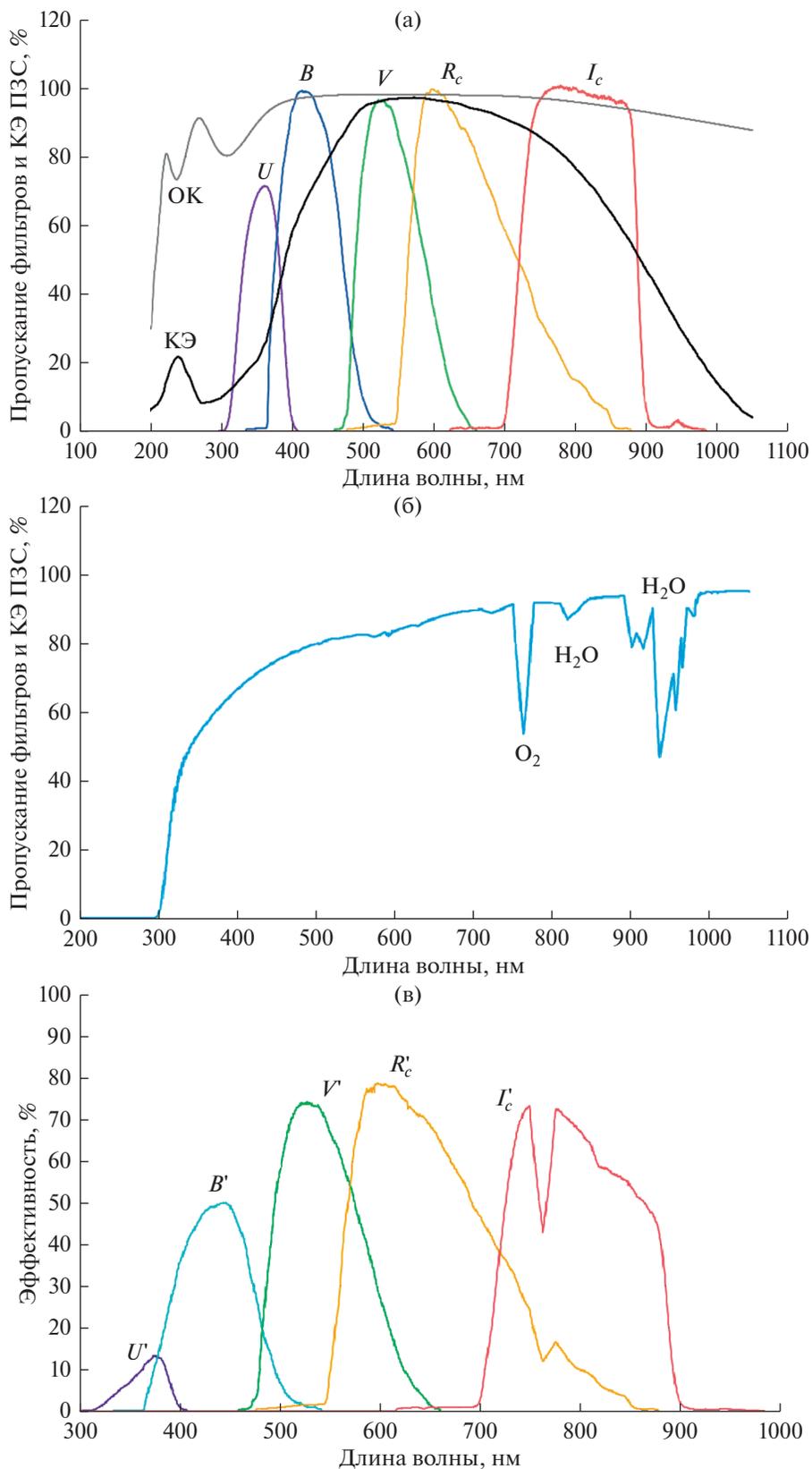


Рис. 1. Спектральные характеристики фотометра телескопа RC600, модельной спектральной прозрачности земной атмосферы для КГО (СПКГО) и всей фотометрической системы: (а) – спектральные характеристики используемых $UBVR_cI_c$ -светофильтров, квантовая эффективность (КЭ) ПЗС-матрицы и прозрачность входного окна камеры (ОК); (б) – модельная медианная СПКГО; (в) – результирующие спектральные характеристики используемой фотометрической системы $U'B'V'R'_cI'_c$.

Таблица 2. Физические и динамические параметры астероидов

Номер	Название	Спектр. класс Толена	Спектр. класс SMASSII	Геометр. альbedo	Диаметр (км)	Большая полуось орбиты (а. е.)	Эксцентриситет орбиты	Перигелийное расстояние (а. е.)	Наличие семейства, (название и число членов)
91	Эгана	CP	Ch	0.048	103.402	2.590	0.107121	2.313	–
98	Ианта	CG	Ch	0.029	132.788	2.688	0.187465	2.184	–
106	Диона	G	Cgh	0.044	207.869	3.180	0.159383	2.674	–
145	<u>АДЕОНА</u>	C	Ch	0.061	127.783	2.671	0.146710	2.280	Adeona (6279)
212	Медея	DCX	–	0.0465	136.12	3.116	0.102909	2.796	–
257	Силезия	SCTU	Ch	0.0545	72.66	3.118	0.112244	2.769	–
302	<u>КЛАРИССА</u>	F	–	0.0524	38.53	2.406	0.110197	2.141	Clarissa (664)
322	<u>ФЕО</u>	X	X	0.089	69.855	2.782	0.244701	2.101	Phaео (335)
398	Адмета	–	C	0.054	49.771	2.738	0.223934	2.125	–
424	ГРАЦИЯ	C	–	0.027	102.565	2.774	0.109163	2.472	–
435	<u>ЭЛЛА</u>	DCX	–	0.118	34.792	2.449	0.154892	2.070	–
521	Бриксия	C	Ch	0.073	107.227	2.743	0.278496	1.980	–
626	Нотбурга	CX	Xc	0.032	73.236	2.574	0.241884	1.952	–
659	Нестор	XC	–	0.035	112.320	5.166	0.116690	4.563	–
690	<u>ВРАТИСЛАВИЯ</u>	CPF	–	0.0604	134.65	3.149	0.176809	2.592	–
705	Эрминия	X	C	0.031	132.261	2.924	0.051088	2.775	–
751	ФАИНА	C	Ch	0.027	113.699	2.551	0.151115	2.166	–
762	ПУЛКОВА	F	–	0.040	147.343	3.154	0.106967	2.818	–
778	ТЕОБАЛЬДА	F	–	0.079	55.317	3.179	0.256195	2.366	Theobalda (3185)
779	<u>НИНА</u>	–	X	0.157	80.572	2.664	0.227025	2.059	–
859	БУЗАРЕА	C	–	0.031	65.417	3.226	0.110093	2.872	–
916	Америка	C	–	0.0530	33.23	2.365	0.236585	1.805	–
934	Тюрингия	–	Ch	0.047	53.714	2.749	0.215947	2.156	–
1001	Гауссия	PC	–	0.041	72.711	3.209	0.122298	2.818	–
1115	Сабауда	C	–	0.044	75.907	3.099	0.173958	2.561	–
1189	Теренция	–	Ch	0.042	59.246	2.931	0.111807	2.604	Terentia (421)
1235	Шоррия	CX	–	–	–	1.910	0.154585	1.615	–
1295	Дефлотта	c	–	0.046	47.407	3.390	0.124333	2.970	–
1448	Линдбладия	CX	–	0.0378	20.65	2.373	0.185703	1.932	–

Примечания: названия астероидов с обнаруженной СПА выделены заглавными буквами и подчеркнуты; названия астероидов, подозреваемых в активности, выделены заглавными буквами без подчеркивания; данные, приведенные в столбцах 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9, взяты с сайта <https://ssd.jpl.nasa.gov/>, а в столбце 10 – согласно Novaković и др., 2022 (<http://asteroids.matf.bg.ac.rs/fam/families/afp.fam.summary>).

основном компенсируются благодаря их мультипликативному характеру. Также важно подчеркнуть, что при проведении наблюдений воздушные массы абсолютного большинства объектов не превышали 1.3, за исключением нескольких, с воздушными массами до 1.5 (см. табл. 3). Кроме того, все обсуждаемые наблюдения выполнены в зимний период, при наиболее высокой прозрачности земной атмосферы вблизи КГО ГАИШ.

Как видно из табл. 3, фазовые углы астероидов в моменты наблюдений были не более 20° и, как следует из результатов лабораторных модельных измерений (см., например, Sanchez и др., 2012), не могли заметно повлиять на форму аппроксимированных спектров отражения. Поэтому для упрощения расчетов по формуле (2) предпола-

лось, что в указанном диапазоне фазовых углов $I_a(\alpha, \lambda) \approx I_a(\lambda)$.

Итак, нами соблюдалась следующая последовательность операций: (а) коррекция равномерности чувствительности (плоского поля) регистрирующей ПЗС-матрицы, а также учет темновых токов и шумов считывания сигнала; (б) последовательная регистрация во всех светофильтрах интенсивностей света от астероида и ближайшей к нему по координатам звезды G-типа как солнечного аналога (отсутствие переменности такой звезды контролировалось по базам данных); (в) определение значений функции спектральной прозрачности земной атмосферы $p(\lambda)$ на эффективных длинах волн светофильтров путем сравнения интенсивностей света от стандартной звезды ($I_1(\lambda)$ и $I_2(\lambda)$) на двух разных воздушных массах ($M1$ и $M2$):

Таблица 3. Наблюдательные параметры астероидов и звезд

Дата	УТ сред. (час:мин:с)	Геоцентр. расстояние (а. е.)	Гелиоцентр. расстояние (а. е.)	Наклонение орбиты (град)	Фазовый угол (град)	Звезд. величина (V^m)	Воздушн. масса астероида	Стандарт, звезда G-типа	Воздушн. масса звезды
91 ЭГИНА									
2022 01 05	01:58:58	1.5880	2.3905	2.103	16.7797	12.691	1.245	HD 107515	1.191
2022 02 12	23:04:30	1.4389	2.4255		1.0997	11.788	1.216	HD 107515	1.209
98 ИАНТА									
	23:34:58	1.2201	2.1846	15.576	7.8358	11.585	1.283		
2022 02 25	23:37:17	1.2201	2.1846		7.8363	11.585	1.289	HD 107515	1.188
	23:41:53	1.2201	2.1846		7.8375	11.585	1.306		
106 ДЮНА									
2021 12 16	22:39:07	1.8086	2.7732	4.576	4.9734	11.531	1.259	Wolf 1059	1.052
145 АДЕОНА									
2021 12 10	20:28:32	1.5092	2.4338	12.62	10.1364	11.698	1.195	Cl Melotte 201100	1.021
212 МЕДЕЯ									
2022 01 09	18:10:24	19886	2.8200	4.278	12.7261	12.886	1.047	HD 287324	1.217
257 СИЛЕЗИЯ									
2021 12 12	0:05:33	1.8166	2.7883	3.613	4.0649	13.362	1.171	Wolf 1059	1.038
302 КЛАРИССА									
	17:28:18	1.3144	2.1586	3.413	17.2185	14.314	1.060		
2022 01 09	17:35:01	1.3145	2.1586		17.2204	14.314	1.055	HD 287324	1.262
	17:45:18	1.3145	2.1586		17.2232	14.314	1.050		
322 ФЕО									
2021 12 11	18:47:19	1.3911	2.3491	8.045	7.2219	12.210	1109	Cl Melotte 201100	1.010
398 АДМЕТА									
2021 12 11	01:22:37	1.4185	2.1760	9.553	20.6427	13.897	1.154	Wolf 1059	1.095
2022 02 12	22:21:47	1.3427	2.2726		10.8845	13.535	1.465	HD 107515	1.289
424 ГРАЦИЯ									
2022 01 06	02:33:23	1.8216	2.6087	8.221	15.5486	13.837	1.252	HD 107515	1.183
2022 02 12	23:48:46	1.6688	2.6480		3.4263	13.159	1.216	HD 107515	1.187
435 ЭЛЛА									
	20:53:15	1.3146	2.2377	1.816	11.5058	13.469	1.193		
2021 12 07	20:57:42	1.3146	2.2377		11.5071	13.469	1.200	HIP 14697	1.056
	21:04:17	1.3146	2.2377		11.5093	13.469	1.215		

Таблица 3. Продолжение

Дата	UT сред. (час:мин:с)	Геоцентр. расстояние (а. е.)	Гелиоцентр. расстояние (а. е.)	Наклонение орбиты (град)	Фазовый угол (град)	Звезд. величина (V^m)	Воздушн. масса астероида	Стандарт, звезда G-типа	Воздушн. масса звезды
521 Бриксия									
2021 12 11	19:46:32	1.0598	2.0243	10.582	7.7593	10.899	1.142	HD 285598	1.140
	19:47:59	1.0598	2.0243		7.7600	10.899	1.141		
	19:50:11	1.0598	2.0243		7.7607	10.899	1.141		
2021 12 16	20:18:38	1.0834	2.0311		10.2520	11.093	1.146	HD 287324	1.204
626 Ногбурга									
2021 12 07	18:58:39	1.2555	2.0434	25.378	21.2777	12.326	1.052	BD + 40349	1.031
659 Нестор									
2021 12 07	19:46:47	4.0861	4.9341	4.522	6.3949	15.713	1.133	BD + 23331	1.102
690 ВРАТИСЛАВИЯ									
2021 12 10	20:03:14	18441	2.7692	11.244	8.5592	12.188	1.094	CI Melotte 201100	1.009
705 Эрминия									
2022 01 09	03:00:46	1.9850	2.7850	25.018	13.9748	13.000	1.143	HD 107515	1.200
51 ФАИНА									
2021 12 08	00:25:54	1.6802	2.4585	15.596	17.0965	12.840	1.031	Wolf 1059	1.039
	23:09:01	1.7505	2.5730		14.8028	12.942	1.467		
2022 02 15	23:12:34	1.7505	2.5730		14.8034	12.942	1.481	HD 107515	1.194
	23:17:48	1.7506	2.5730		14.8044	12.942	1.506		
762 ПУЛКОВА									
2021 12 13	02:49:26	1.9890	2.8579	13.097	11.1502	12.536	1.338	Wolf 1059	1.301
	21:27:58	2.1322	2.8272		16.5050	12.856	1.521		
2022 02 25	21:32:25	2.1327	2.8272		16.5056	12.856	1.544	HD 107515	1.276
	21:39:00	2.1323	2.8272		16.5067	12.856	1.585		
778 ТЕОБАЛЬДА									
2021 12 07	23:51:43	1.5708	2.3682	13.711	17.2617	13.553	1.024	Wolf 1059	1.038
	21:45:15	1.5671	2.4176		14.8203	13.510	1.259		
2022 02 15	21:49:07	1.5671	2.4176		14.8213	13.510	1.271	HD 107515	1.334
	21:54:52	1.5672	2.4177		14.8227	13.510	1.291		
779 НИНА									
2021 12 11	20:24:41	1.6369	2.5728	14.574	8.5445	11.729	1.032	CI Melotte 201100	1.021
	20:27:00	1.6369	2.5728		8.5452	11.729	1.034		
	20:30:35	1.6369	2.5728		8.5459	11.729	1.036		

Таблица 3. Продолжение

Дата	УТ сред. (час:мин:с)	Геоцентр. расстояние (а. е.)	Гелиоцентр. расстояние (а. е.)	Наклонение орбиты (град)	Фазовый угол (град)	Звезд. величина (V^m)	Воздушн. масса астероида	Стандарт, звезда G-типа	Воздушн. масса звезды
859 БУЗАРЕА									
2021 12 29	23:41:04	2.2239	3 0467	13.503	11.8857	14.655	1.017	Wolf 1059	1.064
	22:57:29	2.2636	3.1045		11.3062	14.713	1.286		
2022 02 25	23:02:06	2.2636	3.1045		11.3070	14.713	1.303	HD 107515	1.183
	23:09:05	2.2637	3.1045		11.3082	14.713	1.327		
916 Америка									
2021 12 16	00:45:59	1.2611	2.1835	11.095	11.8812	14.440	1.079	Wolf 1059	1.074
934 Тюрингия									
2021 12 11	23:28:54	1.3752	2.3172	14.081	9.2141	13.241	1.081	Wolf 1059	1.042
1001 Гауссия									
	18:44:11	2.0539	2 8823	9.315	12.4951	14.365	1 084		
2022 01 09	18:51:01	2.0539	2.8823		12.4966	14.365	1.086	HD 287324	1.205
	19:01:16	2.0540	2.8823		12.4987	14.365	1.091		
1115 Сабауда									
2021 12 13	02:17:01	1.7179	2.6029	15.285	11.7168	13.716	1.221	Wolf 1059	1.205
1189 Теренция									
2021 12 16	21:53:01	1.8022	2.7495	9.863	6.8655	13.998	1171	Wolf 1059	1.103
1235 Шоррия									
	00:36:26	1.0017	1.7849	25.002	26.0165	15.646	1.365		
2022 02 16	00:43:56	1.0018	1.7849		26.0170	15.646	1.383	HD 107515	1.215
	00:54:59	1.0018	1.7849		26.0178	15.646	1.416		
1295 Дефлогга									
	20:13:07	2.0848	3 0410	2.886	5.6825	15.196	1.150		
2022 02 18	20:19:43	2.0848	3.0410		5.6840	15.196	1.151	Wolf 1059	1.066
	20:32:19	2 0848	3 0410		5.6873	15.196	1.154		
1448 Лндлбладня									
	22:23:03	1.0636	1.9350	5.813	18.6507	15.414	1.328		
2022 02 15	22:30:52	1.0636	1.9350		18.6527	15.414	1.354	HD 107515	1.246
	22:42:27	1.0636	1 9350		18.6563	15.414	1.403		

Примечания: названия астероидов с обнатуренной СПА выделены заглавными буквами и подчеркнуты, названия астероидов, ползреваемых в активности, выделены заглавными буквами без подчеркивания.

$$p(\lambda) = [I_2(\lambda)/I_1(\lambda)]^{1/(M1-M2)}; \quad (3)$$

(г) расчет отражательной способности астероида на пяти эффективных длинах волн светофильтров в соответствии со стандартной формулой (2) (следует подчеркнуть, что при такой методике величина отражательной способности астероида освобождается от влияния земной атмосферы); (д) нормировка отражательной способности астероида, рассчитанной во всех светофильтрах, на значение этого параметра в фильтре V ; и, наконец, (е) построение по этим данным кривой, являющейся нормированным аппроксимированным спектром отражения астероида (далее, условно, — “нормированный спектр отражения” или НСО).

Таким образом, средние *UBVRI*-значения спектральной прозрачности атмосферы определялись нами по формуле (3) для каждой наблюдательной ночи при наблюдениях стандартных звезд солнечного типа. Контроль кратковременной фотометрической стабильности (экстинкции) атмосферы в моменты наблюдений астероидов осуществлялся по ближайшим к ним непременным звездам (на общих ПЗС-кадрах) с помощью расчета и сравнения между собой трех последовательных аппроксимированных спектров каждой такой звезды (см. вставки на рис. 2 и 3). По совпадению этих спектров видно, что такие погрешности пренебрежимо малы.

Еще одним важным вопросом является точность совпадения распределений энергии в спектре Солнца и звезд G-типа, использованных в работе для расчета спектров отражения астероидов. Учитывая наибольшую информативность коротковолновой части спектра для поиска признаков активности астероидов, мы оценили эту точность по относительным отклонениям показателей цвета $B-V$ приведенных в табл. 3 звезд (по данным из базы Simbad, <http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fbasic>) от показателя цвета Солнца (0.65). Проведенные расчеты показали, что указанные погрешности расчета НСО астероидов с явной активностью и подозреваемых в активности не выходят за пределы диапазона ошибок 1–3%.

Результаты наблюдений и их интерпретация

Основные физические и динамические параметры астероидов приведены в табл. 2, а наблюдательные параметры всех объектов — в табл. 3.

Нормированные аппроксимированные спектры отражения (НСО) астероидов 145 Адеоны, 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратиславии и 779 Нины, имеющих явные признаки активности, представлены на рис. 2, а НСО астероидов 424 Грации, 751 Фаины, 762 Пулковой, 778 Теобальды и 859 Бузара, подозреваемых в ак-

тивности или с более слабыми проявлениями активности, — на рис. 3.

С целью выбора (в дальнейшем) более предпочтительного из двух возможных вариантов измерений (серийных или несерийных), освещенность от астероида, регистрируемая на приемнике, в нашей работе измерялась одним из двух способов: (1) по данным, полученным в трех последовательных сериях, в каждой из которых измерения во всех светофильтрах осуществлялись последовательно по одному разу, а полученные при этом данные не усреднялись; либо (2) — по трем измерениям в каждом фильтре последовательно во всех светофильтрах, и в этом случае данные в каждом фильтре усреднялись. Различия в порядке измерений привели к несколько разным представлениям полученных результатов на графиках (см. рис. 2 и 3). В первом случае серийные данные, отмеченные точками одного цвета на графиках, использовались для построения трех отдельных НСО. Во втором случае три измерения в каждом светофильтре усреднялись, и по найденным средним значениям строился только один НСО. Таким образом, для каждого астероида на соответствующую дату на графике изображены либо три последовательных аппроксимированных спектра (при серийных измерениях), либо один усредненный НСО (при несерийных измерениях). На основе сравнения двух вариантов расчета и представления данных наблюдений во многих полосах мы пришли к выводу, что метод серийных измерений является более предпочтительным, так как при его использовании на результирующих графиках передается больше информации не только о форме, но и о динамике спектральных особенностей у активных астероидов. Как было показано в предшествующих публикациях (см., например, Busarev и др., 2021; Бусарев и др., 2022), подобные спектральные детали характеризуют состав и структуру пылевых частиц в экзосферах активных астероидов.

На вставках на каждом графике (см. рис. 2 и 3) также приведено по три нормированных аппроксимированных спектра одной или двух (при повторных наблюдениях некоторых астероидов) непременных стандартных звезд, которые использовались для контроля устойчивости спектральной прозрачности земной атмосферы. Но можно видеть, что в большинстве случаев спектры каждой такой звезды, выделенные разными цветами, сливаются в один спектр как признак хороших наблюдательных условий. Близкое совпадение аппроксимированных спектров стандартных звезд характеризует высокую точность измерений и расчета НСО рассматриваемых астероидов в целом.

Как следует из рис. 2, у астероидов 145 Адеоны, 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратисла-

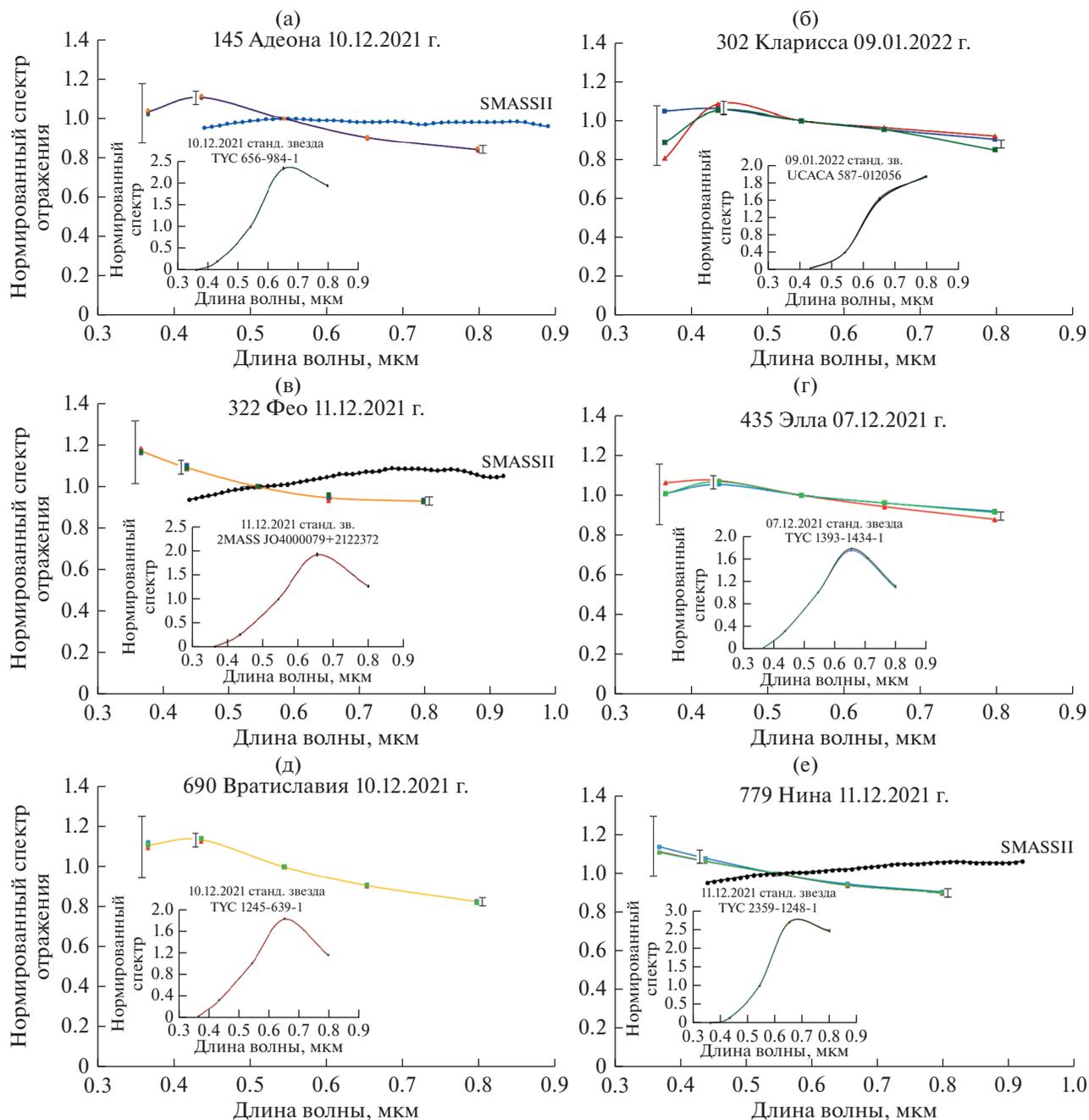


Рис. 2. Нормированные аппроксимированные спектры отражения астероидов с явными признаками активности: (а) – 145 Адеона, (б) – 302 Кларисса, (в) – 322 Фео, (г) – 435 Элла, (д) – 690 Вратиславия и (е) – 779 Нина. Даты наблюдений астероидов указаны на соответствующих рисунках. На графиках 145 Адеоны, 322 Фео и 779 Нины для сравнения приведены нормированные спектры отражения этих астероидов из базы данных SMASSII (<https://sb-napps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/results.action#Asteroid%20145%20AdeonaEAR-A-10028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0>), полученные в стандартных условиях (при отсутствии активности астероидов). На вставках графиков приведены спектры непременных стандартных звезд, которые использовались для контроля стабильности спектральной прозрачности земной атмосферы и оценки общей точности измерений. Предельные погрешности измерений (полученные при расчете FWHM полос фотометрической системы $U'V'R'_cI'_c$) приведены для фотометрических полос U' и R'_c . Для полос V' и I'_c они составляют менее 1% и поэтому не показаны.

вии и 779 Нины в течение одной ночи наблюдались отклонения НСО до $\sim 30\%$ в полосе U и до $\sim 20\%$ в полосе V по сравнению с их стандартными

спектральными характеристиками, в качестве которых использовались их спектры из базы данных SMASSII (в случае их наличия). Хотя погрешности

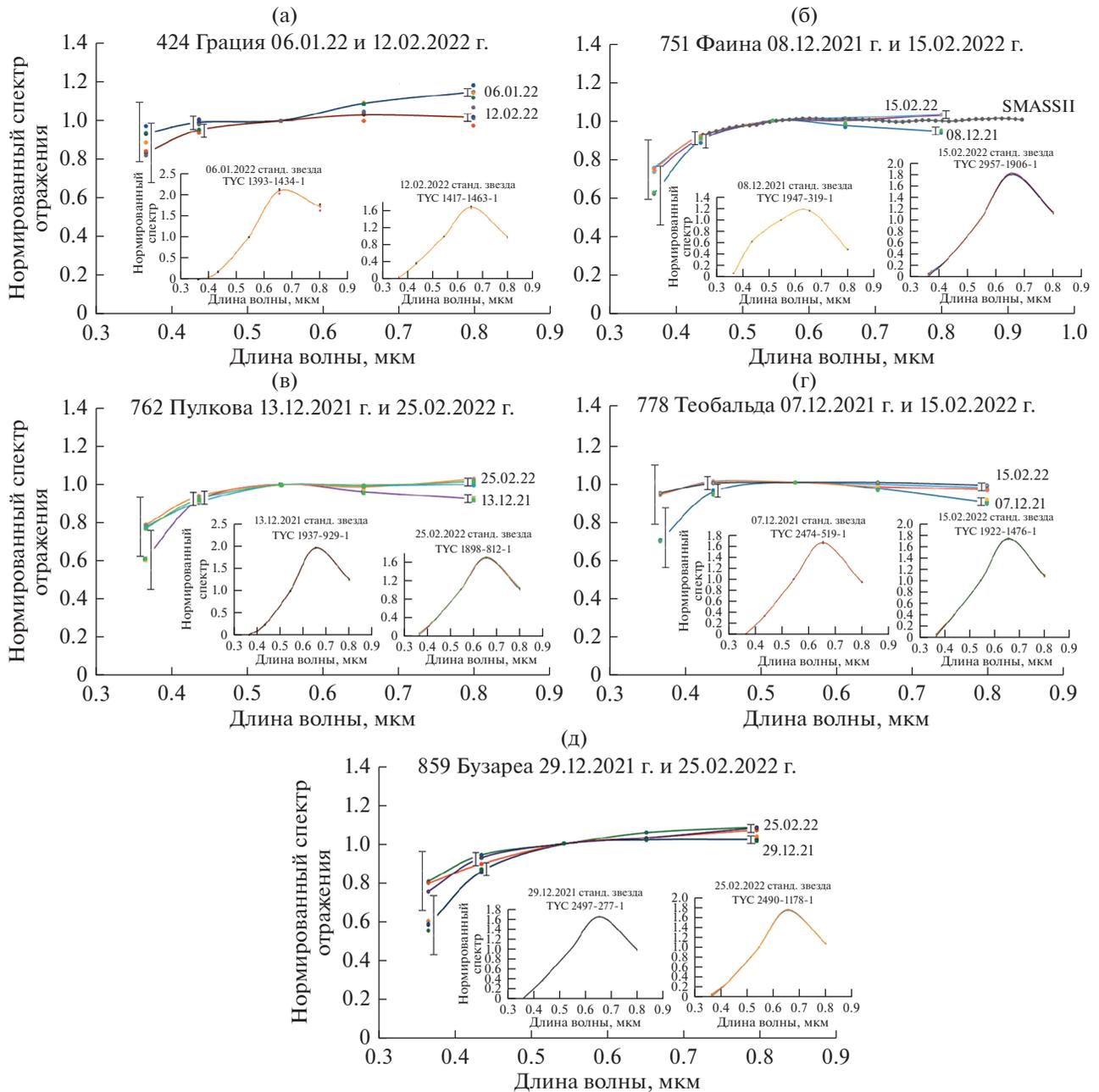


Рис. 3. Нормированные аппроксимированные спектры отражения астероидов с вероятными (более слабыми) признаками активности: (а) – 424 Грация, (б) – 751 Фаина, (в) – 762 Пулкова, (г) – 778 Теобальда, (д) – 859 Бузареа. Даты наблюдений астероидов указаны на соответствующих рисунках. На графике 751 Фаины для сравнения приведен нормированный спектр отражения этого астероида из базы данных SMASSII (<https://sbnapps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/results.action#Asteroid%20145%20AdeonaEAR-A-I0028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0>), полученный при отсутствии активности астероида. На вставках графиков изображены спектры непременных стандартных звезд, которые наблюдались одновременно с астероидами и использовались для контроля стабильности спектральной прозрачности земной атмосферы и оценки общей точности измерений. Предельные погрешности измерений приведены для фотометрических полос UB' и I_c' . Для полос V и R_c' они составляют менее 1% и поэтому не показаны.

получения SMASSII-данных не приводятся (как и фазовые углы) (<https://sbnapps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/results.action#Asteroid%20145%20AdeonaEAR-A-I0028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0>), но согласно их оригинальным публикациям (см.,

например, Bus, Binzel, 2002) общепринятой относительной точностью таких ПЗС-данных считаются ~1–2% в видимом диапазоне спектра и до ~3–4% вблизи коротковолновой и длинноволновой границ, а фазовые углы не превышают 20°–30°.

К сожалению, коротковолновая граница имеющихся SMASSII-данных находится вблизи ~ 0.44 мкм. Мы можем утверждать, что у полученных нами данных в полосах V' , R'_c и I'_c , достигается аналогичная или даже более высокая точность (см. табл. 1). В то же время рассматриваемые отклонения в спектрах активных астероидов в полосе B' на порядок превосходят, а в полосе U' сопоставимы с максимальными погрешностями, рассчитанными по вероятным изменениям полуширин этих полос. Предельные погрешности измерений (полученные при расчете FWHM полос фотометрической системы $U'B'VR'_cI'_c$) приведены на рис. 2 и 3 для фотометрических полос U' (31%), B' (7%) и I'_c (3%). Для полос V' и R'_c они составляют менее 1% и поэтому не показаны.

Для астероидов 302 Клариссы, 435 Эллы и 690 Вратиславии SMASSII-данные отсутствуют, но отрицательные градиенты их НСО близки к тем, которые наблюдались у астероидов 145, 322 и 779. Мы интерпретируем перечисленные особенности как явные признаки СПА и наличия пылевой экзосферы у всех шести астероидов. Общей спектральной деталью в НСО 145 Адеоны, 302 Клариссы, 435 Эллы и 690 Вратиславии является максимум рассеяния света с центральной длиной волны у 0.44–0.46 мкм (рис. 2).

У астероидов с менее выраженными признаками активности, или пока подозреваемых в активности, различия НСО (при сравнении данных для двух произвольных ночей) достигали ~ 15 –20%, причем более значительные в коротковолновой части спектра (рис. 3). Поскольку в данной группе астероидов SMASSII-данные имеются только для 751 Фаины (см. рис. 3б), то в качестве стандартных мы использовали усредненные нормированные спектры, которые характеризуют таксономические классы этих астероидов (Tholen, Vacuzzi, 1989) согласно классификации Толена (Tholen, 1989) (табл. 2). В рассматриваемой группе объектов следует выделить повышенную СПА астероида 424 Грация, о чем можно судить по общему разбросу точек на его НСО и одновременном отсутствии такого эффекта на спектрах контрольных звезд на вставках (рис. 3а). Кроме того, на НСО Грации, полученном 06.01.2022 г., найдены дополнительные подтверждения у астероида разреженной пылевой экзосферы в виде двух слабых максимумов рассеяния света у 0.44 и 0.64 мкм (рис. 3а), сходных по положению с более выраженными спектральными деталями, обнаруженными ранее в НСО других активных астероидов (Бусарев и др., 2016; 2019; Busarev и др., 2021). Как показывает численное моделирование рассеяния света на частицах сложной структуры, эти детали могут быть обусловлены интерференцией света при рассеянии на субмикронных составляющих

таких частиц в экзосфере (Busarev и др., 2021; Петрова, Бусарев, 2023). В то же время естественно ожидать, что в первую очередь в экзосферу выносятся очень мелкие частицы, меньше длины волны света. Их вклад в интенсивность рассеянного света должен существенно расти с уменьшением длины волны (так же, как и вклад газовой составляющей, но последний относительно невелик (Vokselée-Morvan и др., 2016)), что может изменить типичный для НСО рассматриваемых астероидов положительный градиент на отрицательный. Именно такие изменения мы и наблюдаем в спектрах на рис. 2 и 3.

На рис. 4 приведены примеры модельных спектров отражения B_{norm} (нормированных на длину волны 0.55 мкм) условного низкоальбедного астероида С-типа, окруженного пылевой экзосферой оптической толщины τ , состоящей из однородных полидисперсных субмикронных частиц эффективного радиуса R_{eff} при вариации v_{eff} . Представлены три варианта вещества частиц — лед H_2O , так называемые астрономические силикаты (их оптические характеристики были получены на основе синтеза результатов лабораторного и теоретического анализа деталей в ИК-спектре для того, чтобы обеспечить согласие с данными ряда астрономических наблюдений), и Mg–Fe силикаты (оливины) (обозначены как “ice”, “sil” и “oli”, соответственно). Значения их показателей преломления изменяются вдоль спектра согласно Warren, Brandt (2008), Li, Greenberg (1997) и Dorschner и др. (1995), соответственно. Подробности моделирования спектров отражения активных астероидов можно найти в статье Петровой и Бусарева (2023).

На рис. 4а видно, что модели для непоглощающего льда и слабопоглощающих астрономических силикатов отличаются слабо, а подъем коротковолновой части спектра естественно увеличивается с ростом τ , т.е. числа частиц. В отличие от этих веществ, у оливинов поглощение значительно растет на длинах волн короче 0.4 мкм, что приводит к подавлению яркости в УФ-диапазоне спектра экзосферы, содержащей такие частицы (рис. 4б). Широкое распределение частиц по размерам ожидаемо сглаживает детали спектра, обусловленные интерференцией при рассеянии на частицах близких размеров. Показана также модель для смеси лед + оливин (50% на 50% по числу частиц). Варьируя порцию поглощающих частиц, можно добиться наклона спектра, близкого к наблюдаемому у конкретного астероида, но однозначности в оценке этой порции нет, так как градиент зависит и от количества непоглощающих частиц (рис. 4а). Тем не менее сравнение этих модельных спектров со спектрами, измеренными у ряда астероидов, ясно свидетельствует о том, что они окружены рассеивающей экзосферой, где

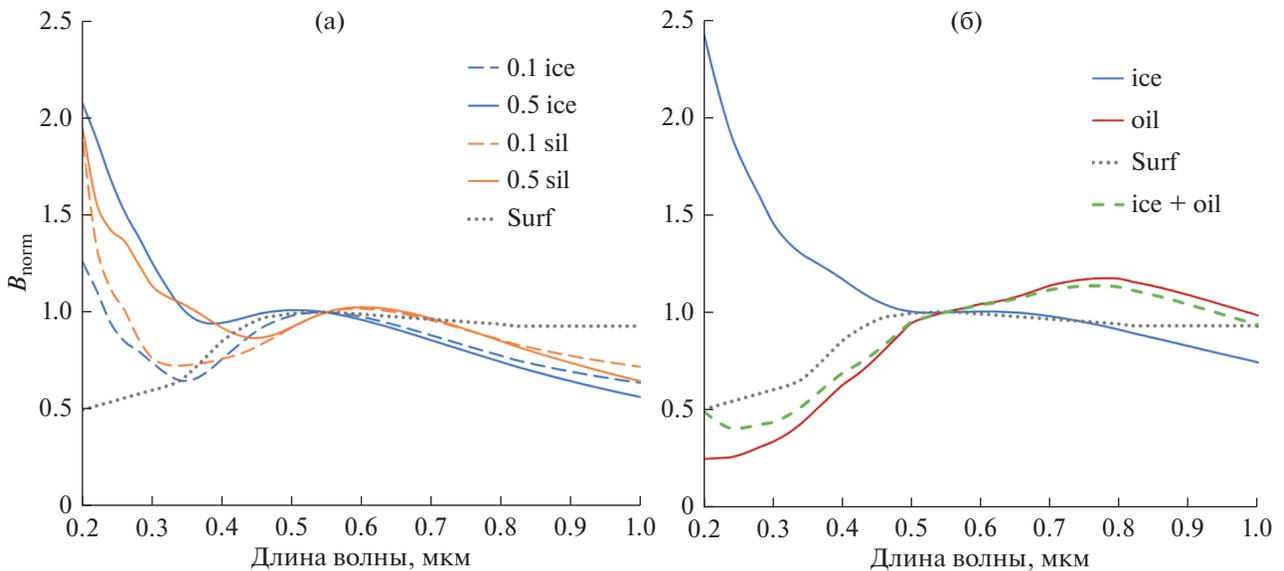


Рис. 4. Спектры яркости $V_{\text{погнм}}$ условного низкоальбедного (0.07) астероида С-типа, окруженного пылевой экзосферой, на фазовом угле наблюдений 10° . Экзосфера состоит из сферических частиц указанного состава размером $R_{\text{eff}} = 0.1$ мкм при $v_{\text{eff}} = 0.02$ и $\tau = 0.1$ или 0.5 (а) и при $v_{\text{eff}} = 0.10$ и $\tau = 0.5$ (б). Принятый спектр поверхности астероида показан кривой “Surf”. Спектральный диапазон моделирования увеличен по сравнению с диапазоном наблюдательных данных, что позволяет расширить наши представления о рассматриваемом явлении.

присутствуют не (или слабо) поглощающие частицы с размерами меньше длины волны света.

Сравнение физических и динамических параметров активных и неактивных астероидов примитивных типов

Нами было проведено сравнение основных физических и динамических параметров активных и неактивных астероидов примитивных типов Главного пояса, включенных в данную наблюдательную программу, с целью поиска каких-либо общих различий, но они не были найдены. Возможны два варианта объяснения полученного результата: (1) заметных различий вообще нет, так как все рассматриваемые тела имеют примерно одинаковое происхождение; (2) различия есть, но для их обнаружения нужна более значимая статистическая выборка объектов. Для проверки второго предположения нами было проведено сравнение распределений параметров (большой полуоси орбиты, эксцентриситета, наклона орбиты и геометрического альbedo) астероидов, входящих в два крупных астероидных семейства, возглавляемых 24 Фемидой (12288 членов) и 145 Адеоной (6279 членов) (Nesvorný и др., 2015; Novaković и др., 2022), и самых крупных известных астероидов с номерами от 1 до 300. Учитывая, что нами была обнаружена СПА Адеоны (C(Ch)-типа) и Фемиды (C(B)-типа) (Busarev и др., 2015; 2021), можно предполагать, что если не все, то преобладающее число астероидов в обоих семей-

ствах относятся к близким примитивным типам и имеют низкотемпературную минералогию, а также потенциально могут содержать в недрах ледяные запасы H_2O и CO_2 . На основе такого сравнения оказалось, что астероиды семейств Адеоны и Фемиды заметно отклоняются по средним значениям перечисленных параметров от средних значений тех же параметров самых крупных астероидов, распределенных по всей зоне ГПА (рис. 5). Узкие диапазоны распределений перечисленных параметров семейств Фемиды и Адеоны характеризуют тесную динамическую связь астероидов в каждом из этих семейств, а близкие значения их геометрического альbedo (рис. 5г), вероятно, — сходство физико-минералогических свойств и, соответственно, P - T условий формирования их родительских тел. Это подтверждается очень близкими величинами альbedo самых крупных тел рассматриваемых семейств, которые у Адеоны и Фемиды равны соответственно 0.061 и 0.067 (табл. 2; https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=24). Но в то же время у этих семейств имеются значительные различия между средними значениями большой полуоси орбиты, наклона орбиты и диапазона распределения эксцентриситета (рис. 5).

Исходя из проведенного сравнения распределений основных динамических параметров и геометрического альbedo семейств Фемиды (4782 членов семейства) и Адеоны (2236 членов семейства) (<https://doi.org/10.26033/6cg5-pt13>), можно

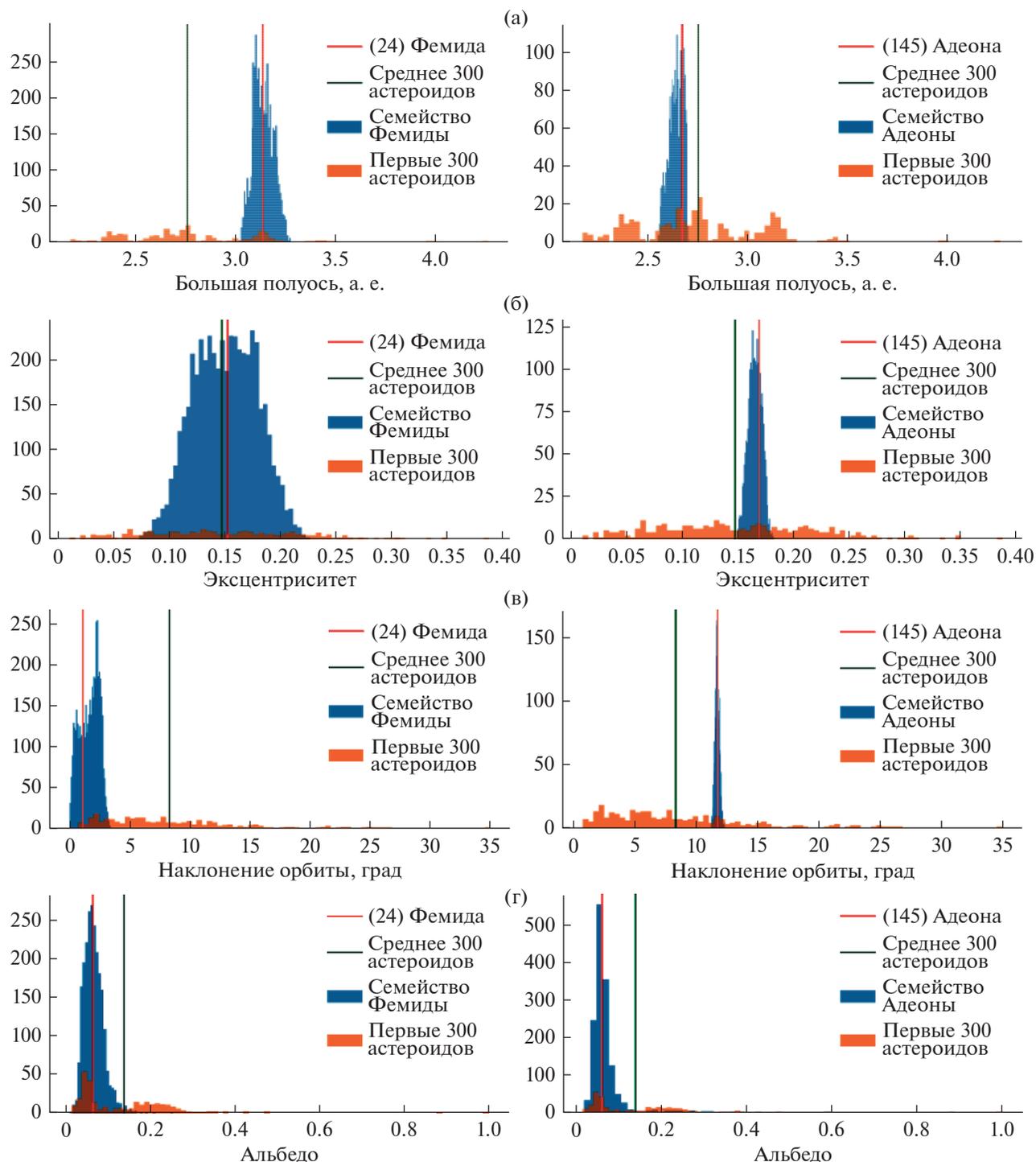


Рис. 5. На рисунке представлены построенные нами (согласно данным <https://doi.org/10.26033/6cg5-pt13>) для сравнения распределения основных динамических параметров и геометрического альbedo у астероидов семейств Фемиды (левая колонка графиков) и Адеоны (правая колонка графиков), а также аналогичных параметров у самых крупных 300 астероидов Главного пояса: (а) – большой полуоси орбиты, (б) – эксцентриситета, (в) – наклоны орбиты и (г) – геометрического альbedo.

заклучить, что, несмотря на близость значений геометрического альbedo астероидов примитивных типов, входящих в эти семейства, динамиче-

ские различия между ними достаточно велики и характеризуют, вероятно, их специфическую динамическую историю.

*Анализ солнечной активности
в период наблюдений астероидов*

Нами также были изучены данные о солнечных корональных выбросах вещества (СМЕ) в период выполнения обсуждаемой наблюдательной программы, полученные на космической обсерватории SOHO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/catalog_description.htm). С декабря 2021 г. до конца февраля 2022 г. общий уровень солнечной активности в основном был относительно низким, но имели место отдельные вспышки в рентгеновском диапазоне и связанные с ними СМЕ. В декабре 2021 г. (17.12.2021 г.) произошел только один корональный выброс типа “гало”, охватывающий полный азимутальный угол (до $\sim 360^\circ$), но с низкой суммарной кинетической энергией (СКЭ). В ожидаемое время прохождения ударной волны, вызванной этим СМЕ (на гелиоцентрических расстояниях астероидов в пределах 2–3 а. е., т.е. примерно через 10–12 дней после вспышки с учетом распространения ударной волны в плазме солнечного ветра со средней скоростью ~ 550 км/с (см., например, Vorovsky, 2020)), наблюдался только астероид 859 Бузареа (29.12.2021 г., рис. 3д), что могло вызвать заметное возрастание его НСО в коротковолновой части спектра. В январе 2022 г. произошли четыре корональных выброса типа “гало” (09.01.2022 г. – с низкой СКЭ, 12.01.2022 г. – с низкой СКЭ, 14.01.2022 г. – с СКЭ между низким и средним уровнями и 29.01.2022 г. – с СКЭ, превышающей средний уровень). Но в январский период в ожидаемые моменты прохождения в зоне ГПА ударных волн в солнечном ветре не наблюдался ни один астероид (табл. 3). В феврале, после ожидаемого прохождения в ГПА ударной волны, вызванной СМЕ от 29.01.2022 г., наблюдались астероиды 424 Грация (12.02.2022 г., рис. 3а), 751 Фаина (15.02.2022 г., рис. 3б) и 778 Теобальда (15.02.2022 г., рис. 3г), что, вероятно, вызвало повышение и заметные колебания в коротковолновой и длинноволновой частях НСО этих астероидов, которые видны на соответствующих графиках. Интересно отметить, что никаких изменений не было замечено в НСО других астероидов, наблюдавшихся в те же ночи: 398 Адметы, 1235 Шоррии, 1295 Дефлотты и 1448 Линдбладии, у которых не были обнаружены спектральные признаки СПА (табл. 3). Наконец, в феврале произошли два СМЕ на Солнце типа “гало” (11.02.2022 г. – с низкой СКЭ и 15.02.2022 г. – со средней СКЭ). Ударные волны от этих корональных выбросов (низкоскоростные от первого и более высокоскоростные от второго), возможно, привели к выбросу дополнительного количества пыли с поверхности в экзосферу у 762 Пулковой (25.02.2022 г., рис. 3в) и 859 Бузареа (25.02.2022 г., рис. 3д), что вызвало повышение их отражательной способности в коротковолновой и длинноволновой частях спектра. В то же время не были обнаружены никакие

изменения в НСО 98 Ианты, наблюдавшейся в ту же ночь, у которой отсутствовали также и признаки СПА (табл. 3).

Таким образом, на основе изучения наблюдательных результатов можно заключить, что на астероидах со значительными проявлениями активности (145, 302, 322, 435, 690 и 779) и с ее более слабыми проявлениями (424, 751, 762, 778 и 859) СПА была основным процессом, на который накладывались и усиливали его дополнительные эффекты от проходящих ударных волн, вызванных СМЕ. Поскольку азимутальный охват этих ударных волн был максимальным, можно предполагать, что они достигали всех рассматриваемых астероидов.

ДИСКУССИЯ

Еще раз отметим, что критериями для включения астероидов Главного пояса в общую наблюдательную программу были их низкотемпературные типы, значительные эксцентриситеты орбит (не менее 0.1) и близость к перигелийным расстояниям на интервале времени до трех месяцев. Целью программы было осуществление поиска объектов, проявляющих СПА при повышенных подсолнечных температурах. По нашим расчетам перепад подсолнечных температур между афелием и перигелием у астероидов примитивных типов ГПА с эксцентриситетами в интервале ~ 0.1 – 0.3 составляет от нескольких десятков до сотни градусов в зависимости от конкретных значений эксцентриситета и геометрического альбеда (Busarev и др., 2018). Очевидно, что основным условием для возникновения СПА таких астероидов являются ледяные залежи H_2O и с меньшей вероятностью CO_2 , которые должны быть достаточно близко к поверхности или даже находиться на самой поверхности (в случае их недавней экскавации или отсутствия верхнего слоя реголита, удаленного при ударном событии). Но некоторые специалисты не допускают даже самой возможности наличия ледяных слоев в недрах астероидов примитивных типов по причине отсутствия прямых подтверждений этого. Очевидно, что такие данные могут быть получены только с помощью зондирования недр астероидов космическими методами.

С помощью аналитических расчетов нами было показано (Busarev и др., 2003), что концентрация короткоживущего изотопа ^{26}Al (с периодом полураспада 0.72 млн лет) в Са-Al-включениях в силикатном веществе ранней Солнечной системы $^{26}Al/^{27}Al \sim 5 \times 10^{-5}$ (Wasserburg, Papanastassiou, 1982), соответствующая аналогичной величине в плоскости нашей Галактики, $^{26}Al/^{27}Al \sim 10^{-5}$ (Mahoney и др., 1984) была достаточной для накопления внутренней тепловой энергии, полного плав-

ления льда и образования внутреннего водного океана на каменно-ледяных телах с размерами более 200 км, сформировавшихся за границей образования льда H_2O . Водный океан с температурой $\sim 5^\circ C$ мог сохраняться на рассматриваемых телах под 10-километровой корой около нескольких миллионов лет до полного замерзания (Busarev и др., 2003). Эти результаты согласуются с публикациями других авторов (например, Prialnik, Bar-Nun, 1990). Наличие менее обильных короткоживущих изотопов, таких как ^{60}Fe , ^{41}Ca , ^{10}Be и др. (см., например, Goswami, 2004), а также сильные ударные события на некоторых каменно-ледяных телах могли привести к повышению их внутренней тепловой энергии и продлить время существования океана. Важно, что с учетом темпов физических и геохимических процессов в водной среде (см., например, Веселовский, 1955), периода времени в несколько миллионов лет достаточно для дифференциации (седиментации) вещества, образования слоев гидратированных силикатов и сложной органики.

С другой стороны, в соответствии с универсальным механизмом гравитационной “очистки” зон формирования больших планет от малых тел при достижении ими массы, равной нескольким массам Земли (например, Сафронов, 1969), весьма вероятно, что такие каменно-ледяные тела разбрасывались во всех направлениях Юпитером и другими планетами-гигантами, в том числе в ГПА (Busarev, 2022). Подобные тела, вероятно, стали родительскими телами астероидов примитивных типов и могли обеспечить доставку льдов и сложной органики не только в ГПА, но и на планеты земной группы, включая Землю (Busarev, 2012; Raymond, Izidoro, 2017; Takir и др., 2023).

Подтверждением перечисленных процессов в ранней Солнечной системе являются также наши наблюдательные результаты. Спектрофотометрическим и *UBVRI*-методами нами были обнаружены признаки СПА 21 астероида (1, 19, 24, 51, 52, 65, 102, 145, 177, 203, 266, 302, 322, 379, 383, 435, 449, 690, 704, 779, 1474) С, В, F, G и X-типов (Busarev и др., 2015; 2020; 2021; 2022; Бусарев и др., 2016; 2019; 2022; данная статья), с которыми согласуются результаты численного моделирования спектров отражения условного астероида примитивного типа (с геометрическим альбедо 0.07), окруженного разреженной экзосферой (с оптической плотностью < 0.5), состоящей из агрегатов пылевых субмикронных частиц разного состава (водяной лед, оливин и толины) (Busarev и др., 2021).

Важно также отметить, что у 145 Адеоны, 302 Клариссы и 322 Фео, входящих в число астероидов с явными признаками активности, а также у подозреваемой в активности 778 Теобальды

обнаружены динамические астероидные семейства (табл. 2, Novaković и др., 2022). Это можно интерпретировать как следствие в среднем более высокой хрупкости вещества астероидов примитивных типов, включающего льды, проявляющейся при ударах метеороидных тел, и, значит, — как косвенное подтверждение широкой распространенности ледяных залежей или слоев на рассматриваемых астероидах. С другой стороны, очевидно, что взаимные столкновения астероидов в ГПА и сильные метеороидные удары, вызывающие раскалывание крупных тел примитивного состава и образование у них семейств, приводят к худшей защищенности от космических факторов ледяных запасов на меньших телах и их быстрой потере.

ВЫВОДЫ

Осуществление *UBVRI*-фотометрии (с декабря 2021 г. по февраль 2022 г.) доступных для наблюдений 29 астероидов примитивных типов Главного пояса, находившихся вблизи перигелийных расстояний, позволило обнаружить спектральные признаки квазисовременной СПА шести астероидов примитивных типов Главного пояса — 145 Адеоны, 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы, 690 Вратиславии и 779 Нины (у 302 Клариссы, 322 Фео, 435 Эллы и 690 Вратиславии — впервые), что составляет $\sim 21\%$ (или даже $\sim 40\%$, если учесть тела с более слабой СПА) от общего числа тел, включенных в данную программу. Активность 145 Адеоны и 779 Нины вблизи перигелия (и на значительном удалении от него (Busarev и др., 2015)) нами обнаружена уже в третий раз на протяжении последних 10 лет, что соответствует примерно трем периодам обращения этих астероидов вокруг Солнца. Для тел сходного происхождения (с учетом их таксономических типов), изучение которых выполнено в аналогичных наблюдательных условиях, — это значительные показатели. Полученные результаты можно рассматривать как указание на значительную распространенность льда H_2O на астероидах примитивных типов Главного пояса в виде подповерхностных залежей. Если это будет подтверждено на большем наблюдательном материале, то позволит с более высокой вероятностью утверждать об образовании большинства астероидов примитивных типов (или их родительских тел) за границей льда H_2O в ранней Солнечной системе.

Наиболее значительными и массовыми физическими факторами активации и поддержания процесса сублимации ледяных материалов на астероидах примитивных типов являются, вероятно, высокая частота ударных событий в ГПА (включая микрометеоритную переработку вещества), солнечная вспышечная и эруптивная активность, а также рост подсолнечной температуры

астероидов вблизи перигелия, способствующий удалению органических изолирующих покрытий, сформировавшихся при сублимации льдов, и возобновлению последнего процесса.

Можно предполагать, что семейства астероидов с большим количеством членов возглавляются телами примитивного состава, включающими ледяные слои, с пониженной прочностью и/или хрупкостью вещества. Это может быть одной из основных причин дробления родительских тел семейств при ударных событиях на большое количество фрагментов. В то же время меньшие тела в таких семействах должны быстрее терять ледяную компоненту вследствие ее худшей защищенности и теплоизоляции.

Авторы (Бусарев В.В., Петрова Е.В., Щербина М.П., Кузнецов С.Ю. и А.А. Савелова) выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку работы (грант РНФ 22-12-00115).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бусарев В.В.* Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. С. 140–150. (*Busarev V.V.* Spectrophotometry of atmosphereless celestial bodies of the Solar system // *Sol. Syst. Res.* 1999. V. 33. P. 120–129.)
- 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.* Обнаружение влияния активности Солнца на сублимационную активность примитивных астероидов // *Сообщ. конф. “Астрономия-2018”*. Т. 2 / Ред. Обридо В.Н. М.: Изд. “Тривант”, 2018. С. 47–50.
- Бусарев В.В., Щербина М.П., Барабанов С.И., Ирсамбетова 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 Цибелы // *Астрон. вестн.* 2019. Т. 53. № 4. С. 273–290. (*Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I., Irsambetova 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. 261–77.)
- 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.)
- Веселовский В.С.* Химическая природа горючих ископаемых. М.: Ин-т горного дела. Изд. Акад. наук СССР, 1955. 424 с.
- Миронов А.В.* Основы астрофотометрии. Практические основы высокоточной фотометрии и спектрофотометрии звезд. М.: Физматлит, 2008. 260 с.
- 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. <https://doi.org/10.31857/S0320930X23020068>
- Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с. [NASA TTF-667 (Engl. transl.), 1972].
- 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. № 11. С. 1058–1071.
- Alexander C.M.O'D., McKeegan K.D., Altwegg K.* Water reservoirs in small planetary bodies: Meteorites, asteroids, and comets // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 36 (47 p.)
- Bessell M.S.* Standard photometric systems // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* 2005. V. 43. P. 293–336.
- Bockelée-Morvan D., Crovisier J., Erard S., Capaccioni F., Leyrat C., Filacchione G., Drossart P., Encrenaz T., Biver N., de Sanctis M.-C., Schmitt B., Kührt E., Capria M.-T., Combes M., Combi M., Fougere N., Arnold G., Fink U., Ip W., Migliorini A., Piccioni G., Tozzi G.* Evolution of CO₂, CH₄, and OCS abundances relative to H₂O in the coma of comet 67P around perihelion from Rosetta/VIRTIS-H observations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462 (Suppl. 1). P. S170–S183. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2428>
- Borovsky J.E.* What magnetospheric and ionospheric researchers should know about the solar wind // *J. Atmosph. Sol.-Terr. Phys.* 2020. V. 204. id. 105271 (16 p.)
- Bradley A.J.* The action of water // *Meteorites and the early Solar system II* / Eds: Lauretta D.S., McSween H.Y., Jr. Tucson: Univ. Arizona Press, 2006. P. 584–624.
- Bus S.J., Binzel R.P.* Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. The observations // *Icarus.* 2002. V. 158. P. 106–145.
- Busarev V.V., Dorofeeva V.A., Makalkin A.B.* Hydrated silicates on Edgeworth-Kuiper objects – probable ways of formation // *Earth, Moon and Planets.* 2003. V. 92. P. 345–357.
- 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>
- 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., Scherbina M.P.* New candidates for active asteroids: Main-belt (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (1474) Beira, and near-Earth (162173) Ryugu // *Icarus*. 2018. V. 304. P. 83–94.
- Busarev V.V., Golubeva L.F., Petrova E.V., Shestopalov D.I.* Variability of the reflectance spectra of (1) Ceres and solar activity // The Eleventh Moscow Solar System Symposium (11MS3) 5–9 October 2020, Space Research Inst., Abstract № 11MS3-SB-09. P. 255–258.
- Busarev V.V., Petrova E.V., Irmambetova 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.)
- Busarev V.V.* Active asteroids of the Main Belt as probable relics of the formation processes of giant planets // Proc. VAK-2021 Conf. “Astronomy at the epoch of multimessenger studies”, SAI MSU, INASAN, Moscow, 2022. P. 215–219.
- Busarev V.V., Shcherbina M.P., Kuznetsov S.Yu., Ikonnikova N.P., Burlak M.A.* Only a quarter of newly observed primitive asteroids are active // The Thirteenth Moscow Solar System Symposium (13MS3), 2022, Space Research Inst., Abstract # 13MS3-SB-01. p. 244–246.
- 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. id. 114502 (16 p.)
- 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.
- Emde C., Buras-Schnell R., Kylling A., Mayer B., Gasteiger J., Hamann U., Kylling J., Richter B., Pause Ch., Dowling T., Bugliaro L.* The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1) // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 1647–1672.
- Fanale F.P., Salvail J.R.* The water regime of asteroid (1) Ceres // *Icarus*. 1989. V. 82. P. 97–110.
- 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: W.F. Bottke Jr., Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 183–204.
- Goswami J.N.* Short-lived nuclides in the early Solar system: the stellar connection // *New Astron. Rev.* 2004. V. 48. P. 125–132.
- Hsieh H.H., Jewitt D.A.* Population of comets in the Main asteroid belt // *Science*. 2006. V. 312. P. 561–563.
- Hsieh H.H.* The Hawaii trails project: Comet-hunting in the Main asteroid belt // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 505. P. 1297–1310.
- Hsieh H.H., Haghighipour N.* Potential Jupiter-family comet contamination of the Main asteroid belt // *Icarus*. 2016. V. 277. P. 19–38.
- Hsieh H.H., Novaković B., Kim Y., Brassier R.* Asteroid family associations of active asteroids // *Astron. J.* 2018. V. 155. id. 96 (22 p.)
- Jewitt D.* The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. id. 66 (14 p.)
- Jewitt D., Hsieh H.H.* The Asteroid-Comet Continuum // Chapter for the book *Comets III*, edited by K. Meech and M. Combi, University of Arizona Press. arXiv preprint arXiv:2203.01397, 2022 [astro-ph.EP]
- Kornilov V., Kornilov M., Vozjakova O., Shatsky N., Safonov B., Gorbunov I., Potanin S., Cheryasov D., Senik V.* Night-sky brightness and extinction at Mt Shatdzhatmaz // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. P. 4464–4472.
- Kurucz R.L.* New atlases for solar flux, irradiance, central intensity, and limb intensity // *Mem. Soc. Astron. Italiana Suppl.* 2005. V. 8. P. 189–191.
- Li A., Greenberg J.M.* A unified model of interstellar dust // *Astron. and Astrophys.* 1997. V. 232. P. 566–584.
- Longhi J.* Phase equilibria in the system CO₂–H₂O I: New equilibrium relations at low temperatures // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2005. V. 69. P. 529–539.
- Mahoney W.A., Ling J.C., Wheaton Wm.A., Jacobson A.S.* Discovery of ²⁶Al in the interstellar medium // *Astrophys. J.* 1984. V. 286. P. 578–585.
- McSween Jr H.Y., Ghosh A., Grimm R.E., Wilson L., Young E.D.* Thermal evolution models of asteroids // *Asteroids III* / Eds: W.F. Bottke Jr. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 559–571.
- Nesvorný D., Brož M., Carruba V.* Identification and dynamical properties of asteroid families // *Asteroids IV* / Eds: Bottke W.F., DeMeo F.E., Michel P. Univ. Arizona Press, 2015. V. 29. P. 297–321.
- Novaković B., Vokrouhlický D., Spoto F., Nesvorný D.* Asteroid families: properties, recent advances, and future opportunities // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2022. V. 134 (4). id. 34 (60 p.)
<http://asteroids.matf.bg.ac.rs/fam/familymembers.php>.
- Prialnik D., Bar-Nun A.* Heating and melting of small icy satellites by the decay of ²⁶Al // *Astrophys. J.* 1990. V. 355. P. 281–286.
- Raymond S.N., Izidoro A.* Origin of water in the inner Solar System: Planetesimals scattered inward during Jupiter and Saturn’s rapid gas accretion // *Icarus*. 2017. V. 297. P. 134–148.
- Sanchez J.A., Reddy V., Nathues A., Cloutis E.A., Mann P., Hiesinger H.* Phase reddening on near-Earth asteroids: Implications for mineralogical analysis, space weathering and taxonomic classification // *Icarus*. 2012. V. 220. P. 36–50.
- Sykes M.V., Greenberg R., Dermott S.F., Nicholson P.D., Burns J.A.* Dust bands in the asteroid belt // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 336–367.
- Schorghofer N.* The lifetime of ice on main belt asteroids // *Astrophys. J.* 2008. V. 682. P. 697–705.
- 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.

- Sugita S., Honda R., Morota T., Kameda S., Sawada H., Tatsu-
sumi E. and 117 co-authors.* The geomorphology, color,
and thermal properties of Ryugu: Implications for par-
ent-body processes // *Science*. 2019. V. 364. id.
eaaw0422 (11 p.)
- Takir D., Neumann W., Raymond S.N., Emery J.P., Tieloff M.*
Late accretion of Ceres-like asteroids and their implan-
tation into the outer Main belt // *Nature Astron.* 2023.
<https://doi.org/10.1038/s41550-023-01898-x>
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomic classifications // *Asteroids
II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tuc-
son: 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. Tuc-
son: Univ. Arizona Press, 1989. P. 298–315.
- Veeder G.J., Tedesco E.F.* Results from the IRAS Minor
Planet Survey // *The IRAS Minor Planet Survey. Final
Report PL-TR-92-2049* / Eds: *Tedesco E.F.* Massachu-
setts: Phillips Laboratory, 1992. P. 107–126.
- 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.
<https://doi.org/10.1029/2007JD009744>
- Wasserburg G.J., Papanastassiou D.A.* Some short-lived nu-
clides in the early Solar system – a connection with the
placental ISM // *Essays in Nuclear Astrophysics* / Eds:
Barnes C.A., Clayton D.D., Schramm D.N. Cam-
bridge Univ. Press, 1982. P. 77–140.
- Zolensky M.E., Bourcier W.L., Gooding J.L.* Aqueous alter-
ation on the hydrous asteroids: Results of EQ3/6 com-
puter simulations // *Icarus*. 1989. V. 78. P. 411–425.