

## **Наблюдаемые спектральные признаки и вероятные механизмы образования оптически тонкой и толстой пылевой экзосферы активных астероидов**

© 2023 г. В.В. Бусарев<sup>1,2\*</sup>, Е.В. Петрова<sup>3</sup>, В.Б. Пузин<sup>2</sup>, С.И. Барабанов<sup>2</sup>, М.П. Щербина<sup>2,1</sup>,  
С.Ю. Кузнецов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*МГУ им. М.В. Ломоносова, Астрономический ин-т им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Москва, Россия;*

<sup>2</sup>*Институт астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия;*

<sup>3</sup>*Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия;*

<sup>4</sup>*МГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет космических исследований, Москва, Россия*

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

Поступила в редакцию 14.11.2023

Принята в печать 05.12.2023

Обнаружение и изучение спектральных признаков сублимационно-пылевой активности (СПА) двадцати астероидов примитивных типов Главного пояса, наблюдаемых в видимом диапазоне, позволило нам установить ее временный (или периодический) характер. СПА астероидов проявляет себя с относительно низкой интенсивностью преимущественно вблизи их минимальных гелиоцентрических расстояний и, соответственно, при их наиболее высоких подсолнечных температурах (то есть вблизи абсолютного максимума поверхностной температуры астероида в центре его освещенного полушария). С высокой вероятностью основной причиной СПА этих астероидов является наличие льда  $H_2O$  в их недрах, который оказывается вскрытым благодаря недавним ударным событиям. Как следует из численного моделирования спектров отражения рассматриваемых активных астероидов, окружающая эти тела оптически тонкая пылевая экзосфера (ПЭ), обусловленная СПА, состоит из субмикронных однородных частиц разного состава и/или фракталоподобных агрегатов таких частиц. С учетом крайне слабого гравитационного поля астероидов (особенно при их размерах менее  $\sim 10$  км), неспособного удерживать такую оптически-тонкую ПЭ даже непродолжительное время, мы пришли к выводу о том, что ПЭ активных астероидов примитивных типов поддерживается совместной работой двух механизмов: электростатическое поле фотоэмиссионной природы создает плазменно-пылевой слой на подсолнечной стороне астероида (как и всех безатмосферных небесных тел), а СПА обеспечивает дополнительный выброс пылевых частиц с поверхности в этот слой до обнаружимого уровня; при этом собственное вращение тела способствует их распределению вокруг астероида.

Ключевые слова: активность астероидов, спектры отражения, оптически тонкая и толстая пылевая экзосфера, электростатическое поле фотоэмиссионной природы

## ВВЕДЕНИЕ

За последние два десятилетия в Главном поясе астероидов (ГПА) было обнаружено около 30 тел с разными признаками активности (например, Jewitt, Hsieh, 2024, а также указанные в данной работе ссылки). Примерно половина из них – это тела размером  $\sim 1$  км и менее, так называемые кометы Главного пояса (КГП) астероидов, которые были обнаружены благодаря их кометоподобной активности, но в последствии регулярно проявляли только более слабую сублимационно-пылевую активность (СПА) вблизи перигелийного гелиоцентрического расстояния (Hsieh, Jewitt, 2006; Hsieh, Naghypour, 2016; Hsieh и др., 2023). Авторы указанных работ рассматривают КГП как потухшие ядра комет, попавшие в ГПА из семейства комет Юпитера под влиянием гравитационных резонансов. Вероятной причиной возобновления активности КГП считается ускорение их осевого вращения под влиянием эффекта Ярковского–О'Кифа–Радзиевского–Пэддака, в результате которого происходит их частичное разрушение под действием центробежной силы (Jewitt, 2012; Hsieh и др., 2023). Но имеется и другой механизм активации ядер КГП – при столкновениях с заполняющими ГПА телами меньших размеров. Высокая частота ударных событий в ГПА подтверждается данными космического телескопа IRAS, которые позволили обнаружить связанные с ГПА устойчивые пылевые пояса (Sykes и др., 1989; Veeder, Tedesco, 1992). «Ударный» сценарий активации КГП подтверждается и модельными расчетами (напр., Шустов и др., 2022). Кроме того, последовавшее за первоначальной высокой активностью КГП проявление последней у них только вблизи перигелия (Hsieh и др., 2023) является признаком наличия льда  $H_2O$  в составе вещества, что характерно для гипотетических кометных ядер, исчерпавших в основном запас более летучих соединений. Но нехарактерным для КГП является обнаружение космическим телескопом JWST льда  $H_2O$  в составе комы одной из них (238P/Read) при одновременном отсутствии признаков  $CO_2$  (Kelley и др., 2023). Это указывает на то, что КГП, возможно, представляют собой не ядра комет, образовавшиеся на далекой периферии Солнечной системы, а астероиды примитивных типов с низкотемпературной минералогией. Как уже обсуждалось в наших публикациях (Бусарев, 2002, 2010, 2016; Бусарев и др., 2023; Busarev, 2012, 2018, 2021a), такие астероиды могли сформироваться в ранней Солнечной системе вблизи границы конденсации льда  $H_2O$  (а также за ее пределами) и удерживать его в своих недрах до настоящего времени (напр., Schorghofer, 2008, 2016). Предполагаемое происхождение астероидов примитивных типов следует из их абсолютного количественного преобладания над астероидами других типов вместе взятых. Судя по спектральным базам данных, они составляют не менее 75% всех известных астероидов.

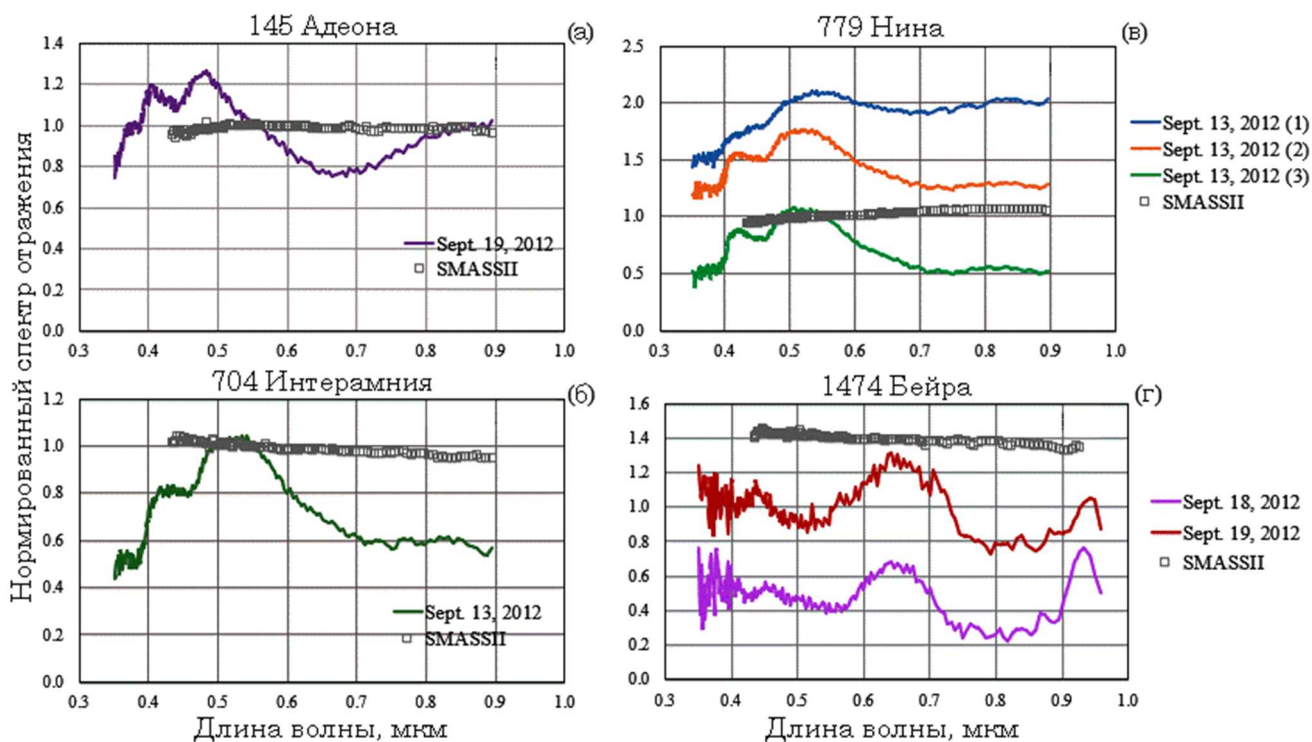
В статье представлены и обсуждаются спектры отражения активных астероидов (АА) примитивных типов с тонкой пылевой экзосферой (ПЭ), состоящей из субмикронных однородных частиц разного состава и их агрегатов разной структуры, которые могут образоваться в процессе СПА. Существование такой ПЭ у АА подтверждается хорошим согласием наблюдательных и модельных спектров отражения АА, полученных с помощью расчетов характеристик рассеяния указанных частиц и переноса излучения в экзосфере, содержащей такие частицы. Приводится обоснование механизма и условий удержания оптически тонкой ( $\tau \leq 0.5$ ) экзосферы активным астероидом, обладающим слабым гравитационным полем, а также рассматривается возможность возникновения временной оптически толстой ПЭ (до  $\tau = 6.0$ ) условного АА.

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ С СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВОЙ АКТИВНОСТЬЮ: РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

### *Результаты Наблюдений*

Наши наблюдательные программы были направлены на изучение астероидов примитивных типов с целью обнаружения у них вблизи перигелийных расстояний признаков СПА, связанной с наличием в составе их вещества водяного льда. Спектрофотометрия низкого разрешения ( $R \sim 100$ ) и/или UVVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub>-фотометрия были основными методами измерений (напр., Бусарев, 1999; Бусарев и др., 2023); они сопровождалась расчетом спектров отражения астероидов (или их аппроксимированных спектров отражения) по их наблюдательным данным, а также по данным непременных звезд солнечного типа в качестве аналогов Солнца. Спектральные наблюдения астероидов примитивных типов были начаты в сентябре 2012 г. Они позволили к настоящему моменту обнаружить признаки СПА, в большинстве своем слабые, у 20 астероидов Главного пояса и одного Марс-кроссера вблизи перигелия (Бусарев и др., 2016, 2019, 2022, 2023; Busarev и др., 2015, 2018, 2020, 2021a). В число этих астероидов вошли: 1 Церера, 19 Фортуна, 24 Фемида, 51 Немауза, 52 Европа, 65 Кибела, 102 Мириам, 145 Адеона, 177 Ирма, 203 Помпея, 266 Алина, 302 Кларисса, 322 Фео, 379 Гуенна, 383 Янина, 435 Элла, 449 Гамбурга, 690 Вратиславия, 704 Интерамния, 779 Нина и 1474 Бейра с таксономическими типами С, В, F, G и X. Несколько подробнее следует охарактеризовать активность 1 Цереры, обнаруженной нами на основе многолетних спектрофотометрических наблюдений (Busarev и др., 2020). Изучение этих данных показало, что вариации спектров отражения Цереры, связанные, вероятно, как и у вышеперечисленных астероидов, с процессом СПА, коррелируют с солнечной активностью, что с учетом предельно малых значений эксцентриситета ее орбиты и наклона оси вращения к плоскости орбиты (Schorghofer, и др. 2016), позволяет рассматривать последний фактор в активности этого астероида как основной (Busarev и др., 2020).

В качестве примеров на Рис. 1 (а–г) приведены нормированные спектры отражения АА Главного пояса 145 Адеоны (С или Ch), 704 Интерамнии (F или B), 779 Нины (X) и Марс-кроссера 1474 Бейры (FX или B) (в скобках указана спектральная классификация Толена (Tholen, 1989) или SMASSII, или только Толена), полученные в сентябре 2012 г., во время максимума солнечной активности, когда астероиды находились вблизи перигелийных расстояний. Для сравнения черным цветом показаны спектры отражения из базы данных SMASSII, полученные ранее для тех же астероидов, но в спокойном состоянии.

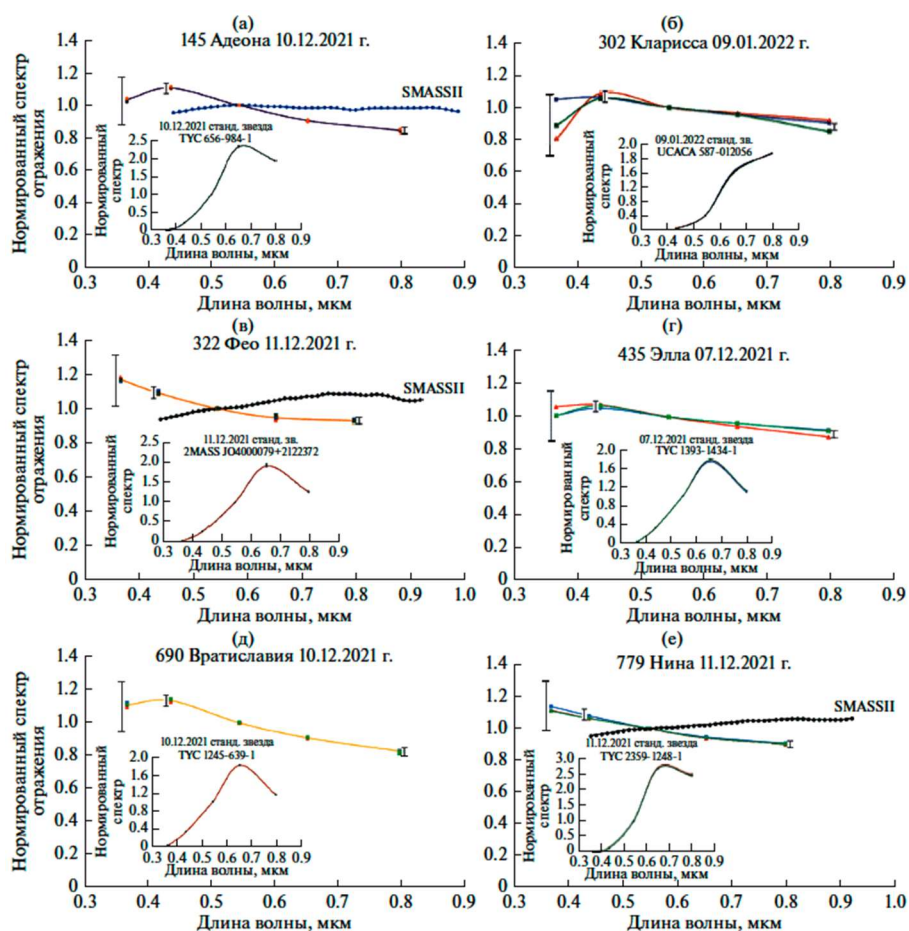


**Рис. 1.** Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения (а) 145 Адеоны (С или Ch) , (б) 704 Интерамнии (F или B), (в) 779 Нины (X) и (г) 1474 Бейры (FX или B), полученные в 2012 г. при активном состоянии астероидов (разноцветные кривые) и спектры этих астероидов в неактивном состоянии (кривые черного цвета). В скобках указана спектральная классификация Толена или SMASSII (Tholen, 1989; [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html)). Относительные погрешности спектров отражения в центре видимого диапазона составляют 1-2% и возрастают вблизи его границ до 5–7% (Бусарев и др., 2016). Приведенные спектры астероидов измерены нами в диапазоне фазовых углов 13.9°–24.0°.

Как видно из рисунка 1, наиболее характерными деталями на спектрах отражения АА 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры, полученных в 2012 г., являются необычные максимумы вблизи ~0.4–0.5 и 0.6–0.7 мкм по сравнению с гладкими или почти прямолинейными спектрами отражения этих же астероидов в неактивном состоянии. В нашей работе (Бусарев и др., 2016) было впервые сделано предположение, что эти максимумы образуются в спектрах АА примитивных типов при рассеянии света субмикронными пылевыми частицами разного размера,

состава и структуры, вынесенными с поверхности газовыми потоками при СПА. Можно предполагать, что в период максимума солнечной активности указанные максимумы имели наиболее выраженную форму благодаря тому, что более сильная электризация пылевых частиц приводила к более интенсивному их выносу и увеличивала их число в ПЭ АА. Вернемся к этому вопросу в разделе о механизме формирования оптически тонкой ПЭ АА.

Другие астероиды из вышеприведенного списка продемонстрировали вблизи перигелийных расстояний похожие, хотя в большинстве случаев более слабые спектральные особенности, на основании чего были также включены в список АА. В качестве примеров, на рисунке 2 приводятся спектры отражения шести таких астероидов, у которых была обнаружена СПА с помощью UBVR<sub>c</sub>-наблюдений (полиномиальная аппроксимация спектров астероидов выполнена по их отражательной способности на эффективных длинах используемых фотометрических полос) (Бусарев и др., 2023).



**Рис. 2.** Нормированные (на длине волны 0.55 мкм) аппроксимированные спектры отражения астероидов 145 Адеона (а), 302 Кларисса (б), 322 Фео (в), 435 Элла (г), 690 Вратиславия (д) и 779 Нина (е) (три последовательных спектра отражения каждого астероида изображены разными цветами). Для контроля стабильности фотометрических наблюдательных условий на вставках на каждом графике также показаны по три последовательных (практически совпадающих!) нормированных (на длине волны 0.55 мкм) спектра неперемещенных контрольных звезд с тех же ПЗС-кадров, на которых регистрировались интенсивности астероидов. Расчетные погрешности

измерений (в виде баров ошибок) показаны только на эффективных длинах волн используемой фотометрической системы  $U'$ ,  $B'$ , и  $I'$ . В полосах  $V$  и  $R'$  они составляют менее 1% и поэтому не показаны (Бусарев и др., 2023). Из рисунка видно, что отклонения у коротковолновых и длинноволновых границ спектров отражения AA 145, 322 и 779 от их канонических спектров из базы SMASSII, когда астероиды были в неактивном состоянии, в 2–3 раза больше приведенных ошибок. Фазовые углы рассматриваемых астероидов в период наблюдений были в пределах  $7.2^\circ$ – $17.2^\circ$  (Бусарев и др., 2023).

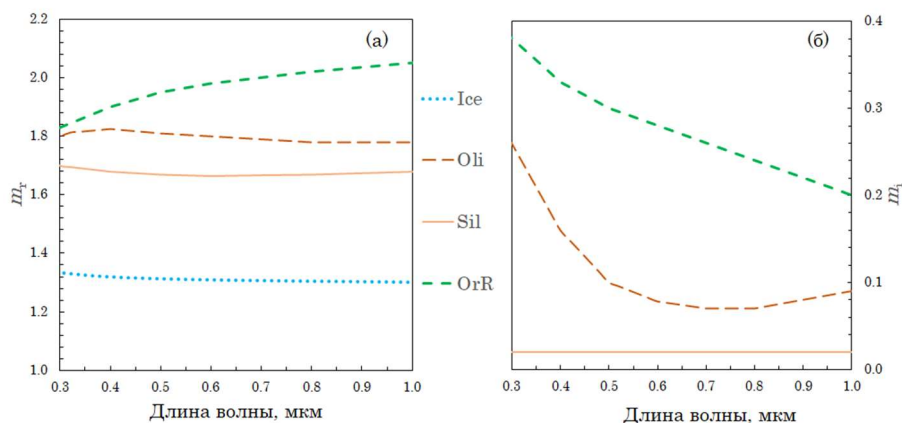
Только у трех из этих астероидов (145, 322 и 779) в базе данных SMSSII имелись ранее полученные спектры отражения, когда астероиды были неактивны (изображенные на рис. 2), которые мы использовали для сравнения со спектрами астероидов активном состоянии и оценки величин их максимальных отклонений у коротковолновой и длинноволновой границ спектрального диапазона. Для трех других астероидов (302, 435 и 690) для указанного сравнения в качестве «канонических» использовались усредненные спектры отражения их таксономических (спектральных) типов (Tholen, Varucci, 1989). Важно отметить, что сериальные измерения трех последовательных спектров AA 302 Кларисса (с диаметром 38.5 км) на общем интервале времени около 30 минут (рис. 2б) (три последовательных измерения по одному разу во всех светофильтрах) позволили обнаружить изменения нормированной отражательной способности этого астероида у коротковолновой и длинноволновой границ спектрального диапазона, превышающие ошибки измерений. Этот результат можно рассматривать как дополнительное подтверждение СПА и подвижности ПЭ 302 Клариссы (с диаметром 38.5 км) (Бусарев и др., 2023), поскольку изменения блеска астероидов достаточно крупных размеров, связанные с вариациями альбедо их поверхности, происходят значительно медленнее. Как показывают статистические исследования, периоды вращения астероидов Главного пояса ~30-100-км размеров не выходят за пределы диапазона ~5-15<sup>h</sup> (Pravec и др., 2002). Следует также отметить, что активность 145 Адеоны и 779 Нины была нами подтверждена вблизи перигелия в третий раз за 10 лет (с 2012 по 2022 гг.), что сопоставимо с тремя периодами их обращения вокруг Солнца и позволяет оценить длительность процесса СПА каждого астероида вблизи перигелия на уровне нескольких месяцев.

### *Результаты Моделирования*

Для подтверждения наших предположений о спектральных признаках и физическом механизме СПА астероидов с низкотемпературной минералогией было выполнено численное моделирование спектров отражения условного астероида С-типа (сферической формы для простоты расчетов) с геометрическим альбедо 0.07 на длине волны 0.55 мкм. Эти расчеты основаны на теории переноса излучения в экзосфере, состоящей из субмикронных однородных частиц и/или фракталоподобных агрегатов таких частиц (так называемых мономеров). Предварительно были

вычислены характеристики рассеяния однородных и агрегатных частиц разного состава и морфологии. Подробное описание вычислительных методов, а также выбора параметров частиц можно найти в наших предыдущих работах (Busarev и др., 2021a; Петрова, Бусарев, 2023). Здесь лишь отметим, что агрегатные структуры, размеры мономеров в агрегатах и их состав были выбраны на основе результатов исследований частиц межпланетной и кометной пыли, а также результатов анализа поляриметрии комет.

При вычислении модельных спектров мы рассматривали как плотно упакованные, так и разреженные агрегатные структуры, а для радиуса мономеров в агрегатах были выбраны четыре значения:  $r = 0.08, 0.10, 0.12$  и  $0.15$  мкм. Форма мономеров была принята сферической, что существенно облегчает расчеты и, в то же время, не оказывает заметного влияния на результаты моделирования из-за малого размера частиц относительно длины волны в рассматриваемом спектральном диапазоне. Что касается однородных частиц, их форма тоже была принята сферической из-за относительной малости размеров (эффективный радиус распределения по размерам  $R_{\text{eff}} = 0.1$  мкм при эффективной вариации  $v_{\text{eff}} = 0.1$ ).



**Рис. 3.** Спектральные зависимости действительной  $m_r$  и мнимой  $m_i$  части показателя преломления льда  $\text{H}_2\text{O}$  (Ice), астрономических силикатов (Sil), оливинов (Oli), и тугоплавкой органики (OrR). Для льда значения  $m_i$  близки к нулю в данном спектральном диапазоне. Ссылки приведены в тексте.

В качестве материала частиц для модельных расчетов характеристик рассеяния мы рассматривали восемь веществ: льды  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , железомagneзиальные силикаты (оливины), так называемые астрономические силикаты (их оптические характеристики были получены на основе синтеза результатов лабораторных измерений и теоретического моделирования деталей в ИК спектре для того, чтобы обеспечить согласие с данными ряда астрономических наблюдений), аморфный углерод; тугоплавкую органику и смеси органических веществ, известные как толины Титана и Плутона. Однако, поскольку часть этих материалов имеет близкие по спектральному поведению показатели преломления в рассматриваемом диапазоне, спектры интенсивности излучения, рассеянного частицами этих материалов, также близки. Поэтому ниже представлены

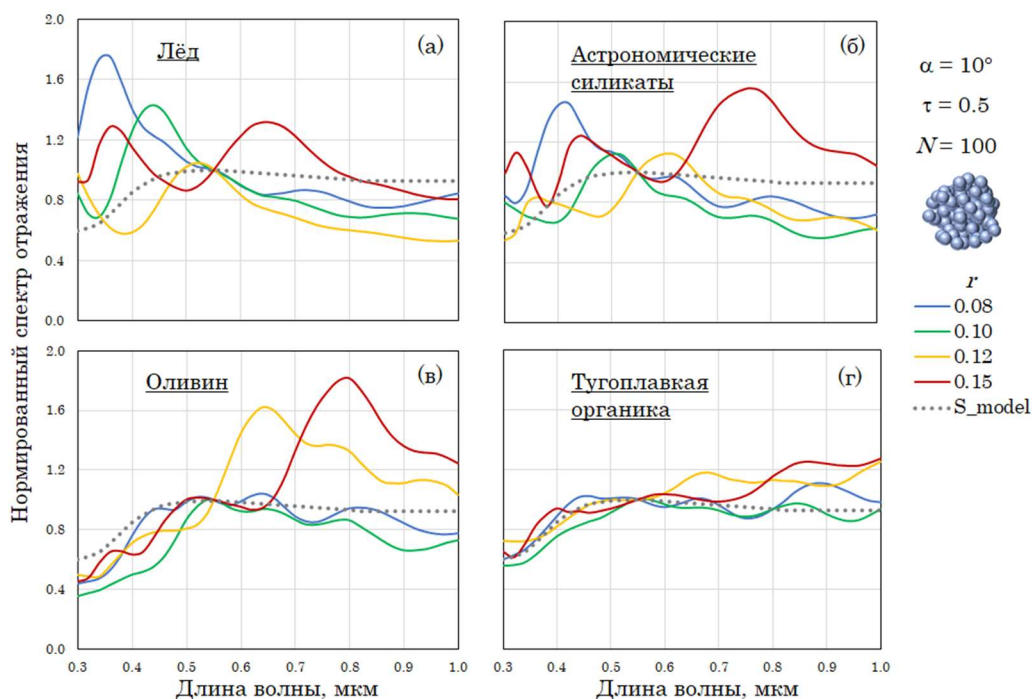
модельные спектры отражения АА с экзосферой, содержащей агрегатные частицы, только для показателей преломления четырех материалов: льда  $H_2O$  (Warren, Brandt, 2008), астрономических силикатов (Li, Greenberg, 1997), оливинов (Dorschner и др. 1995), и тугоплавкой органики (Li, Greenberg, 1997). Действительная  $m_r$  и мнимая  $m_i$  части показателей преломления этих веществ представлены на Рис. 3.

Как было показано в наших предыдущих работах (Busarev и др., 2021; Петрова, Бусарев, 2023, а также указанные в данных работах ссылки), рассеяние на частицах сложной структуры, состоящих из мономеров радиусом около 0.1 мкм, может вызывать появление необычных деталей, наблюдаемых в ряде случаев в спектрах отражения АА в ближнем УФ и видимом диапазонах (см. Рис. 1). В частности, экстремумы в коротковолновой части спектров таких агрегатов обусловлены интерференцией электромагнитных волн, рассеянных на отдельных мономерах в составе агрегата, в то время как интерференция волн, рассеянных группами мономеров, ответственна за детали на более длинных волнах. Более того, положение интерференционных деталей в спектре определяется размерами этих мономеров (но не самих агрегатов) и действительной частью их показателя преломления и слабо зависит от структуры агрегатов и количества мономеров.

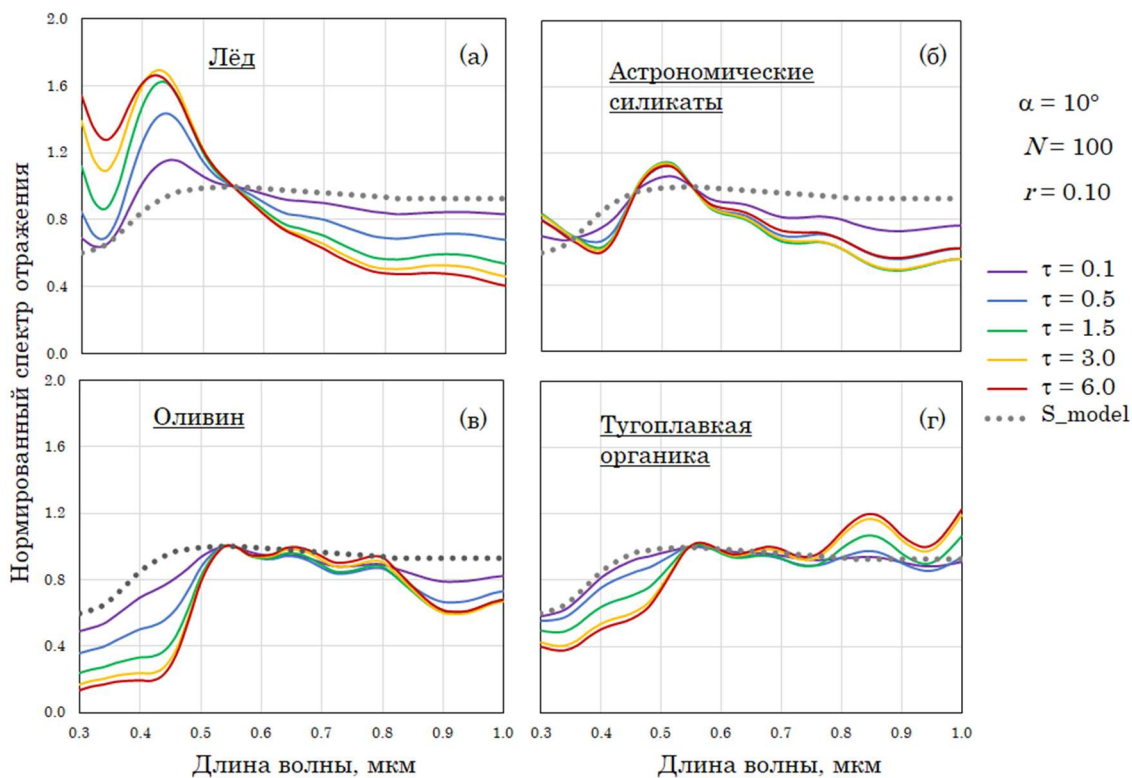
Последнее обстоятельство дает возможность ограничиться в модельных расчетах относительно небольшими ансамблями частиц; в показанных ниже примерах (Рис. 4 и 5) экзосфера состоит из агрегатов с плотно упакованной структурой (пористость около 0.55), содержащих 100 мономеров. Из модельных спектров на Рис. 4 видно, что при увеличении размеров мономеров в агрегатах интерференционная картина сдвигается в «красную» сторону спектра. Такой же эффект производит увеличение действительной части показателя преломления, а рост поглощения подавляет интерференционные детали в коротковолновом диапазоне.

Примеры модельных спектров на Рис. 4 рассчитаны для оптической толщины экзосферы  $\tau = 0.5$ . При этом значении  $\tau$  детали спектра, обусловленные рассеянием на агрегатных частицах становятся хорошо заметными. Изменение формы нормированного спектра отражения АА с изменением оптической толщины экзосферы показано на Рис. 5. При  $\tau = 0.1$  присутствие экзосферы слабо заметно в спектрах, но оно существенно растет с увеличением  $\tau$  до некоторого значения, обусловленного влиянием многократного рассеяния и зависящего от свойств частиц. Ниже мы обсудим эти эффекты подробнее.



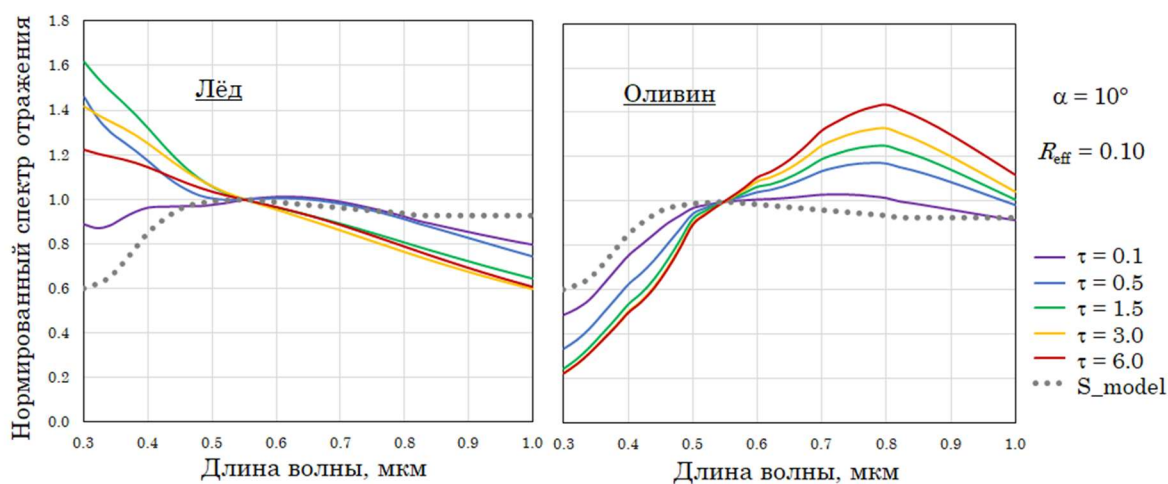


**Рис. 4.** Модельные нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения условного астероида С-типа при фазовом угле  $\alpha = 10^\circ$  (спектр отражения астероида без экзосферы показан точечной линией “S\_model”). Экзосфера содержит плотно упакованные агрегатные частицы (структура показана справа), состоящие из 100 мономеров указанных радиусов  $r$  (в микронах) и указанного состава. Оптическая толщина экзосферы  $\tau = 0.5$ .



**Рис. 5.** То же, что на Рис. 4, но для экзосферы разной оптической толщины (от 0.1 до 6.0), содержащей агрегатные частицы, состоящие из 100 мономеров радиусом 0.1 мкм.

Влияние оптической толщины экзосферы на нормированный спектр отражения АА хорошо видно из Рис. 6, где показаны модельные спектры для случая однородных субмикронных частиц льда и оливина в экзосфере. Очевидно, что присутствие частиц непоглощающего льда существенно поднимает коротковолновую часть спектра (аналогичное влияние оказывает присутствие слабопоглощающих астрономических силикатов), и с ростом оптической толщины до некоторого значения, обусловленного влиянием многократного рассеяния, этот эффект усиливается. Присутствие в экзосфере частиц, поглощающих в коротковолновом диапазоне, подавляет яркость в этом диапазоне и увеличивает положительный градиент спектра тем сильнее, чем больше  $\tau$ .



**Рис. 6.** То же, что на Рис. 4, но для экзосферы, содержащей субмикронные однородные частицы указанного состава с эффективным радиусом  $R_{\text{eff}} = 0.1$  мкм (при  $v_{\text{eff}} = 0.1$ ). Оптическая толщина экзосферы  $\tau$  изменяется 0.1 до 6.0.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Сходные тенденции поведения и детали в наблюдаемых (Рис. 1 и 2) и модельных (Рис. 4–6) нормированных спектрах отражения АА примитивных типов свидетельствует о правильности наших представлений о причинах СПА и физических механизмах формирования спектральных особенностей АА. Как следует из полученных нами результатов, слабая СПА и образование связанной с ней оптически тонкой ПЭ у астероидов ГПА примитивных типов с низкотемпературной минералогией возможны при следующих общих условиях: (1) наличие льда  $\text{H}_2\text{O}$  в составе вещества, (2) недавние столкновения астероидов с телами меньших размеров в ГПА, приведшие к образованию локальных обнажений льда на их поверхности или к вскрытию его залежей под поверхностью, (3) значительный эксцентриситет орбиты ( $>0.1$ ) как благоприятный фактор для возникновения СПА при более высоких подсолнечных температурах, (4) спорадические события

и/или общее повышение солнечной активности, приводящие к образованию ударных волн в плазме солнечного ветра, воздействующих на поверхностное и подповерхностное вещество астероидов. Очевидно, что длительность существования временной ПЭ на астероиде в каждом конкретном случае определяется интенсивностью и продолжительностью соответствующего процесса СПА в зависимости от объема ледяных обнажений у поверхности, а также параметрами орбиты астероида.

Модельные расчеты показали, что изменение наклона спектра отражения АА может быть вызвано присутствием ПЭ, содержащей очень мелкие субмикронные непоглощающие или слабо поглощающие частицы, а необычные детали спектра, такие как экстремумы и «ступеньки», могут быть обусловлены рассеянием на частицах сложной структуры, состоящих из субмикронных зерен. При этом оптическая толщина ПЭ находится примерно в пределах от 0.1 до 0.5.

### *Вероятный Механизм Формирования Оптически Тонкой Пылевой Экзосферы Активных Астероидов*

Как известно, астероиды считаются безатмосферными небесными телами по причине малой массы и, соответственно, слабого гравитационного поля, которое не может удерживать даже на интервале времени порядка одного периода обращения этих тел вокруг Солнца не только газовую атмосферу, но и разреженную ПЭ. Тем не менее, теоретически предложены несколько механизмов (напр., Jewitt, 2012), которые могут приводить к возникновению временной ПЭ, среди которых на первом месте стоит СПА по данным о частоте обнаружений КТП и их свойствам (Jewitt, Hsieh, 2024). Наиболее вероятной причиной формирования ПЭ у подобных объектов может быть процесс выноса мельчайшей пыли с поверхности газовыми потоками, возникающими при сублимации подповерхностного водяного льда или его обнажения, возникшего при ударном событии.

Для простоты будем считать, что астероид имеет сферическую форму, радиус  $R$  и равномерное распределение массы, а частицы являются материальными точками с пренебрежимо малой массой, движущимися в системе координат с началом на поверхности астероида. Если рассмотреть траекторию одной частицы, выброшенной вертикально вверх с поверхности астероида с первой космической скоростью, то ее движение с ускорением  $g_a$  (с учетом только гравитационного поля астероида) будет описываться одномерным дифференциальным уравнением

$$m \times \ddot{x} = - \frac{m \times g_a \times R^2}{(R+x)^2}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса частицы, а  $x$  – ее координата. Интегрирование этого уравнения и учет граничных условий позволяет получить формулу для максимальной высоты ( $H_1$ ) подъема частицы, где ее скорость обращается в ноль:

$$H_1 = \frac{R \times v_1^2}{2 \times g_a \times R - v_1^2} \quad (2)$$

Таблица 1. Сравнение силы гравитационного поля у астероидов с разными массами и размерами

Название астероида	$R$ (км)	$v_1$ (м/с)	$v_2$ (м/с)	$g_a$ (м/с <sup>2</sup> )	$H_1$ (км)
1 Церера (С)	469.7	365.15	516.40	0.2839	469.6
10 Гигея (С)	203.6	185.42	262.22	0.1689	203.5
101955 Бенну (В)	0.241	0.14245	0.20145	0.0000842	0.241

Примечания:  $R$  – эффективный радиус астероида;  $v_1$  и  $v_2$  – первая и вторая космические скорости соответственно;  $g_a$  – ускорение свободного падения вблизи поверхности астероида;  $H_1$  – максимальная высота, достигаемая частицей при движении вертикально вверх с первой космической скоростью под влиянием только гравитационного поля астероида. Для расчетов были использованы данные о величинах  $GM$  и  $R$  астероидов с номерами 1, 10 и 101955 с сайта <https://ssd.jpl.nasa.gov/>

Для пробной пылевой частицы малой массы в таблице 1 приведены расчетные значения космических скоростей, гравитационных ускорений и высоты  $H_1$  вблизи трех астероидов с разной массой и размерами. Эти значения показывают, что независимо от размера астероида, с учетом только силы его гравитационного поля, высота  $H_1$  подъема основного количества пылевых частиц над его поверхностью примерно равна его радиусу. Это подтверждается результатами численного моделирования заполнения частицами временной ПЭ астероидов с использованием метода Монте-Карло (Schläppi et al., 2008). Найденную высоту  $H_1$  можно было бы использовать как некоторую условную верхнюю границу ПЭ астероидов, если бы не было других значительных факторов. С увеличением высоты подъема пылевых частиц в слабом поле тяготения астероида его гравитационное влияние на частицы быстро ослабевает, особенно – на частицы субмикронного размера. В общем случае пылевая частица, отделившаяся от поверхности астероида под действием каких-либо факторов, подвергается суммарному воздействию не только гравитационных полей самого астероида, Солнца и других оказавшихся поблизости небесных тел, но и электростатического поля фотоэмиссионной природы, возникающего под действием мягкого рентгеновского и ультрафиолетового солнечного излучения (напр., Singer, Walker, 1962; Nitter, Havnes, 1992; Lee, 1996; Борисов, Захаров, 2014).

Как известно из результатов первых космических исследований лунной поверхности (напр., Criswell, 1972; Rennilson, Criswell, 1974; Berg и др., 1976), сила электростатического поля

фотоэмиссионной природы может превосходить силу гравитации, способна отрывать от поверхности и приводить в состояние левитации заряженные пылевые частицы субмикронных и микронных размеров. Такие частицы вместе с электронами и протонами формируют плазменно-пылевую оболочку или слой (англ. перевод – plasma sheath), «скользящую» непосредственно над освещенной Солнцем поверхностью вращающегося безатмосферного тела. Теоретические расчеты и моделирование показывают (например, Nitter, Havnes, 1992; Lee, 1996; Colwell и др., 2005; Poppe и др., 2012, 2015; Popel и др., 2015; Hartzell, 2019, а также указанные в данных работах ссылки), что мельчайшие заряженные пылевые частицы (порядка  $\sim 10^{-2}$  мкм и меньше), оказавшись в пределах плазменно-пылевого слоя, толщина которого увеличивается от нескольких десятков сантиметров вблизи подсолнечной точки до примерно километра вблизи терминатора, ускоряются возрастающим электростатическим градиентом (до  $\sim 300$  В/м) настолько, что выбрасываются из поля тяготения этого тела. Частицы несколько большего размера, от  $10^{-2}$  до 1 мкм, оказавшиеся в тех же условиях, балансируют между силами электростатического и гравитационного полей, но могут быть в любой момент выброшены под действием флуктуаций солнечного ветра или радиационного давления (Nitter, Havnes, 1992; Lee, 1996). Как следует из результатов наших наблюдений и моделирования, именно такие частицы наиболее эффективно влияют на спектральные характеристики АА.

Таким образом, мы предполагаем, что: 1) временная ПЭ, возникающая на астероиде примитивного типа при СПА, в основном соответствует плазменно-пылевому слою, который пополняется пылевыми частицами, увлекаемыми газовыми потоками из обнажения или вскрытых подповерхностных залежей льда  $H_2O$  при вращении астероида, что приводит к увеличению оптической толщины ПЭ примерно до значений  $\tau \sim 0.1-0.5$ , которые согласуются с результатами модельных расчетов спектров отражения; 2) агрегатные частицы с размерами от  $\sim 10^{-2}$  до 1 мкм формируются, вероятно, в плазменно-пылевом слое АА из левитирующих одиночных частиц, имеющих противоположные заряды, которые образуются в процессе их стохастического накопления при фотоионизации частиц коротковолновым электромагнитным излучением и при их взаимодействии с электронами и протонами солнечного ветра. Это предположение основано на подобии физических условий в плазменно-пылевом слое безатмосферных небесных тел и астрофизической среде досолнечной туманности (небулы) и протопланетных дисков, где коагуляция частиц пыли является фундаментальным процессом, который подтверждается теоретическими и модельными расчетами (напр., Mendis, Rosenberg, 1994; Matthews, Hyde, 2009; Matthews и др., 2013, 2018). Объединение в агрегаты частиц микронных и более крупных размеров, левитирующих в плазменно-пылевом слое, также наблюдалось в вакуумной камере под действием УФ излучения и потока электронов на микросферы  $SiO_2$  (напр., Orger и др., 2021).

### *Оптически Толстая Пылевая Экзосфера*

Из Рис. 5 видно, что с увеличением оптической толщины ПЭ основными тенденциями изменения спектров отражения АА являются: (1) значительный рост интенсивности света, рассеянного в экзосфере непоглощающими или слабо поглощающими частицами (лед  $H_2O$ , астрономические силикаты) и, напротив, заметное снижение этого параметра для сильно поглощающих частиц (оливин и тугоплавкая органика) в коротковолновой части спектра; (2) повышение отражательной способности в длинноволновой части спектра для частиц тугоплавкой органики в отличие от остальных соединений, демонстрирующих постепенное уменьшение этого параметра. С учетом вышесказанного можно предполагать, что рассматриваемом спектральном диапазоне с ростом оптической толщины ПЭ, состоящей из агрегатных частиц смешанного состава (например, в простейшем случае при равных долях указанных соединений), спектр отражения АА может приобрести более гладкую и частично вогнутую (или выпуклую) форму в результате взаимной компенсации интерференционных максимумов и минимумов при многократных отражениях света. Возможно, что такую форму спектров отражения мы наблюдаем у активных ядер комет, окруженных плотной комой (напр., Busarev и др., 2021b). Однако, следует подчеркнуть, что в общем случае влияние увеличения оптической толщины ПЭ на форму спектра отражения АА может быть весьма разнообразным в зависимости от состава вещества (показателя преломления) частиц в экзосфере и их морфологии, поскольку их эффекты в самых разных комбинациях будут накладываться на изменения, вызванные увеличением оптической толщины.

Мы предполагаем, что оптически толстая ПЭ ( $\tau$  в пределах 1.0–6.0) на АА может образоваться только при сильных ударных событиях, когда с поверхности астероида одновременно выбрасывается большое количество мельчайшей пыли и более крупных частиц. Возможными примерами таких событий являются обнаружения КГП – кометоподобных тел километровой и меньшего размера (например, Hsieh и др., 2015), внезапная активность которых делает их заметными и, вероятно, является следствием столкновения тел сопоставимых размеров.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, обнаружение спектральным методом СПА и связанной с ней ПЭ у 20 астероидов примитивных типов ГПА и изучение особенностей их спектров отражения с помощью модельных расчетов переноса излучения в экзосфере, содержащей частицы разного состава и морфологии, позволило установить наличие подповерхностных залежей водяного льда примерно у 20% изученных объектов.

СПА астероидов примитивных типов ГПА представляет собой относительно слабый процесс (периодически возникающий у некоторых тел со значительным эксцентриситетом орбиты ( $>0.1$ ))

выноса пылевых частиц газовыми потоками при сублимации водяного льда в локальных обнажениях или из подповерхностных залежей льда  $H_2O$ , вскрытых преимущественно при недавних ударных событиях.

Как следует из моделирования, результатом СПА астероидов примитивных типов ГПА является образование оптически-тонкой ( $\tau \sim 0.1-0.5$ ) ПЭ, состоящей из субмикронных однородных частиц разного состава и/или фракталоподобных агрегатов таких частиц. Поскольку слабое гравитационное поле астероидов не может удерживать оптически-тонкую ПЭ на интервале времени порядка нескольких месяцев (что по нашим оценкам представляет собой типичную продолжительность СПА АА вблизи перигелия), возможным механизмом удержания ПЭ АА является электростатическое поле фотоэмиссионной природы, которое образуется практически на всех безатмосферных телах по действием солнечного УФ и мягкого рентгеновского излучения.

Хотя, как следует из экспериментальных и модельных исследований, воздействие электростатического поля на частицы субмикронного размера, левитирующие над заряженной непроводящей поверхностью, сводится к их преимущественному выбросу из гравитационного поля астероида, инъекция частиц соответствующих размеров в плазменно-пылевой слой газовыми потоками из локального обнажения льда при вращении астероида в случае его СПА, вероятно, позволяет увеличивать их концентрацию до уровня оптически-тонкой ПЭ.

Изучение с помощью моделирования особенностей спектров отражения АА в случае оптически толстой ПЭ ( $\tau \sim 0.1-6.0$ ) показывает, что с увеличением оптической толщины рассеивающей среды могут «замываться» (исчезать) наиболее значительные максимумы и минимумы интенсивности света, рассеянного непоглощающими или слабо поглощающими свет агрегатными частицами, но в то же время могут возникать другие экстремумы, обусловленные присутствием сильно поглощающих частиц.

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

Список литературы:

- Борисов Н.Д., Захаров А.В.* Электризация и движение пыли вблизи поверхности астероида // *Астрон. вестн.* 2014. Т. 48. № 1. С. 24–34 (Borisov N.D., Zakharov A.V. Electrostatic charging and motion of dust near the surface of an asteroid // *Solar Sys. Res.* 2014. Vol. 48. No. 1. P. 22–32).
- 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. No 1. P. 39–47.).

*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 // Solar Syst. Res. 2010. V. 44. No. 6. P. 507-519).

*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. No 1. P. 13–23.)

*Бусарев В.В., Барабанов С.И., Пузин В.Б.* Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 4. С. 300–312. (Busarev V.V., Barabanov S.I., Puzin V.B. Material composition assessment and discovering sublimation activity on asteroids 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, and 1474 Beira // Sol. Syst. Res. 2016. V. 50. № 4. P. 281–293.)

*Бусарев В.В., Щербина М.П., Барабанов С.И., Ирсамбетова Т.Р., Кохинова Г.И., Хамроев У.Х., Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гумеров Р.И., Иртуганов Э.Н., Мельников С.С.* Подтверждение сублимационной активности примитивных астероидов Главного пояса 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны и ее вероятные спектральные признаки у 51 Немаузы и 65 Цибелы // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 4. С. 273–290. (Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I., 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.)

*Бусарев В.В., Петрова Е.В., Щербина М.П., Кузнецов С.Ю., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Савелова А.А., Белинский А.А.* (2023) Поиск признаков сублимационно-пылевой активности астероидов примитивных типов вблизи перигелия // Астрон. вестн., 2023, том 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 // *Solar System Research*. 2023. Vol. 57. No. 5. P. 449–466).
- 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 // *Solar System Research*. 2023. V. 57. No. 2. P. 161–174).
- 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.
- Berg O.E., Wolf H., Rhee J.* Lunar soil movement registered by the Apollo 17 cosmic dust experiment // In: Proc. of the IAU-Colloquium No. 31, Heidelberg, June 10–13, 1975. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. – P. 233–237.
- 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 (162,173) Ryugu. *Icarus*. 2018. V. 304. P. 83–94.
- Busarev V.V., Golubeva L.F., Petrova E.V., Shestopalov D.I.* (2020) 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*. 2021a. V. 369, 114634 (18 pp).
- Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Ikonnikova N.P., Burlak M.A., Belinski A.A.* Interstellar comet 2I/Borisov: dust composition from multiband photometry and modeling // *MNRAS*. 2021b. V. 502. Issue 2. P. 1882–1894.
- Criswell D.R.* Lunar dust motion // *Proc. of the 3<sup>rd</sup> Lunar Science Conference (Suppl. 3, Geochimica et Cosmochimica Acta)*. 1972. V. 3. P. 2671-2680.

- Colwell J.E., Gulbis A.A., Horányi M., Robertson S.* Dust transport in photoelectron layers and the formation of dust ponds on Eros // *Icarus*. 2005. V. 175. P. 159-169.
- 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. Astrophys.* 1995. V. 300. P. 503–520.
- Hsieh H.H., Jewitt D.A.* Population of comets in the Main asteroid belt // *Science*. 2006. V. 312. P. 561–563.
- Hsieh H.H., Haghhighipour N.* Potential Jupiter-family comet contamination of the Main asteroid belt // *Icarus*. 2016. V. 277. P. 19–38.
- Hsieh H.H., Micheli M., Kelley M.S.P., Knight M.M., Moskovitz N.A., Pittichová J., Sheppard S.S., Thirouin A., Trujill C.A., Wainscoat R.J., Weryk R.J., Ye Q.* Observational Characterization of Main-belt Comet and Candidate Main-belt Comet Nuclei // *Planet. Sci. J.* 2023. V. 4. Id. 43 (22pp).
- Jewitt D.* The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. id. 66 (14 p.)
- Jewitt D., Hsieh H.H.* The asteroid-comet continuum // arXiv preprint arXiv:2203.01397. – 2022. Chapter in press for the book *Comets III*, edited by K. Meech and M. Combi, Univ. of Arizona Press (35pp).
- Kelley M. S., Hsieh H. H., Bodewits D., Saki M., Villanueva 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.
- Lee P.* Dust levitation on asteroids // *Icarus*. 1996. V. 124. P. 181–194.
- Li A., Greenberg J.M.* A unified model of interstellar dust // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 232. P. 566–584.
- Matthews L.S., Hyde T.W.* Effect of dipole–dipole charge interactions on dust coagulation // *New J. Phys.* 2009. V. 11. Id. 063030 (17 pp.).
- Matthews L.S., Shotorban B., Hyde T.W.* Cosmic dust aggregation with stochastic charging // *Astroph. J.* 2013. V. 776. Id. 103 (9pp).
- Matthews L.S., Shotorban B., Hyde T.W.* Discrete stochastic charging of aggregate grains // *Phys. Review*. 2018. V. E97, Id. 053207 (11pp).
- Mendis D. A., Rosenberg M.* Cosmic dusty plasma // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1994. V. 32. P. 419-63.
- 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.
- Orger N.C., Toyoda K., Masui H., Cho M.* Experimental investigation on particle size and launch angle Distribution of Lofted Dust Particles by Electrostatic Forces // Publication of Elsevier, 2021, <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- Popel S.I., Zelenyi L.M., Atamaniuk B.* Dusty plasma sheath-like structure in the region of lunar terminator // *Physics of Plasmas*. 2015. V. 22, id. 123701 (8 pp.).

- Poppe A.R., Piquette M., Likhanskii A., Horányi M.* The effect of surface topography on the lunar photoelectron sheath and electrostatic dust transport // *Icarus*. 2012. V. 221. P. 135–146.
- Poppe A.R., Zimmerman M.I., Halekas J.S., Farrell W.M.* The electrostatic plasma environment of a small airless body under non-aligned plasma flow and UV conditions // *Planet. Space Sci.* 2015. V. 119. P. 111–120.
- Pravec P., Harris A. W., Michalowski T.* Asteroid rotations // In: *Asteroids III* / Eds: Bottke W. et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 113-122.
- Rennilson J.J., Criswell D.R.* Surveyor observations of Lunar horizon-glow // *Moon*. 1974. V. 10. P. 121-142.
- Schläppi B., Altwegg K., Wurz P.* Asteroid exosphere: A simulation for the ROSETTA flyby targets (2867) Steins and (21) Lutetia // *Icarus*. 2008. V. 195. P. 674–685.
- Schorghofer N.* The lifetime of ice on main belt asteroids // *Astroph. 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.
- Schorghofer N., Mazarico E., Platz T., Preusker F., Schröder S. E., Raymond C. A., Russell C. T.* The permanently shadowed regions of dwarf planet Ceres // *Geoph. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 6783-6788.
- Singer S.F., Walker E.H.* Photoelectric screening of bodies in interplanetary space // *Icarus*. 1962. V. 1. P. 7–12.
- 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.
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomic classifications // In: *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Tholen D.J., Barucci M.A.* Asteroid taxonomy // In: *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: 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., et al. Massachusetts: 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. D14220.
- West R., Lavvas P., Anderson C., Imanaka H.* Titan’s haze // In: *Titan: Interior, surface, atmosphere, and space environment* / Eds: Müller-Wodarg I., Griffith C.A., Lellouch E., Cravens T.E. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2014. P. 285–321.