

К 270-летию **МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА (МГУ)**  
**имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

**ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ**

**Новые взгляды на активность астероидов:  
наблюдения, модели, прогнозы**

Б.М. Шустов, В.В. Бусарев, Е.В. Петрова, М.П. Щербина, Р.В. Золотарёв

*В последние годы представления о кардинальном различии между кометами и астероидами были существенно скорректированы. У нескольких десятков астероидов Главного пояса наблюдались признаки кометной активности (комы, хвосты), поэтому они получили название "кометы Главного пояса". С помощью наземных инструментов такие активные астероиды выявлялись в основном методом получения изображений, причём наблюдались лишь достаточно мощные проявления активности астероидов Главного пояса. Несомненно, что число астероидов, у которых активность протекает на более умеренных масштабах, несравнимо больше. Для регистрации слабой активности с помощью наземных инструментов нужны новые подходы. Таким эффективным подходом оказалось применение традиционного метода широкополосной фотометрии и спектроскопии низкого разрешения. В работах [1–4] применение этого подхода позволило массово изучать слабую форму активности астероидов примитивных типов, названную сублимационно-пылевой активностью (СПА). СПА приводит к образованию у астероида временной, достаточно разреженной пылевой экзосферы, которая может быть обнаружена методом широкополосной фотометрии. В обзоре приведены современные представления об активных астероидах. Основное внимание уделено проявлениям СПА и моделям рассеяния света в пылевых экзосферах астероидов. Обсуждаются массовость СПА и возможные механизмы, ответственные за СПА.*

**Ключевые слова:** астероиды, активные астероиды, сублимационная активность, рассеяние света на пылевых частицах, столкновения астероидов

PACS number: 96.30.Ys

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.08.039746>

**Содержание**

**1. Активные астероиды (344).**

1.1. Традиционные представления о кометах и астероидах как объектах различной природы. 1.2. Активность астероидов: проявления активности. 1.3. Активность астероидов: механизмы активности. 1.4. Выводы по разделу.

**2. Сублимационно-пылевая активность астероидов (350).**

**Б.М. Шустов**<sup>(1,a)</sup>, **В.В. Бусарев**<sup>(1,2,b)</sup>, **Е.В. Петрова**<sup>(3,c)</sup>,  
**М.П. Щербина**<sup>(1,d)</sup>, **Р.В. Золотарёв**<sup>(1,e)</sup>

<sup>(1)</sup> Институт астрономии РАН,

ул. Пятницкая 48, 119017 Москва, Российская Федерация

<sup>(2)</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Государственный астрономический институт  
им. П.К. Штернберга,

Университетский просп. 13, 119234 Москва, Российская Федерация

<sup>(3)</sup> Институт космических исследований РАН,

ул. Профсоюзная 84/32, 117810 Москва, Российская Федерация

E-mail: <sup>(a)</sup> [bshustov@inasan.ru](mailto:bshustov@inasan.ru), <sup>(b)</sup> [busarev@sai.msu.ru](mailto:busarev@sai.msu.ru),

<sup>(c)</sup> [epetrova@cosmos.ru](mailto:epetrova@cosmos.ru), <sup>(d)</sup> [morskayaa906@yandex.ru](mailto:morskayaa906@yandex.ru),

<sup>(e)</sup> [rv\\_zolotarev@mail.ru](mailto:rv_zolotarev@mail.ru)

Статья поступила 20 июня 2024 г.,  
после доработки 22 июля 2024 г.

2.1. Свидетельства активных событий на астероидах и обнаружение экзосферы астероидов спектральными методами. 2.2. Численное моделирование рассеяния света в пылевой экзосфере и свойства её частиц. 2.3. Влияние солнечных событий на сублимационно-пылевую активность и другие проявления активности астероидов. 2.4. Выводы по разделу.

**3. Столкновения астероидов как причина сублимационно-пылевой активности астероидов (367).**

3.1. Частота и скорость столкновений астероидов в Главном поясе астероидов. 3.2. Параметры выбросов, образующихся при столкновениях. 3.3. Критические энергии механизмов инициирования сублимационно-пылевой активности астероидов на примере астероида 145 Адеона и частота проявления сублимационно-пылевой активности в ансамбле астероидов. 3.4. Выводы по разделу.

**Список литературы (374).**

**1. Активные астероиды**

**1.1. Традиционные представления о кометах и астероидах как объектах различной природы**

В древней науке астрономии за тысячелетия было введено немало определений, которые кажутся всем

понятными, но до сих пор не имеют "официальных" (в астрономии — принятых Международным астрономическим союзом) определений, а иногда и трактуются по-разному. Даже понятие "планета" до 2006 г. трактовалось неоднозначно. В резолюции B5 Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (МАС) приведены определения понятий "планета" и "карликовая планета"<sup>1</sup>. Также специфицировано понятие "малые тела Солнечной системы". Это объекты, которые по своим характеристикам не могут быть отнесены ни к карликовым планетам, ни к планетам или их спутникам. Разъяснено, что к данной группе относятся большинство астероидов Солнечной системы, большинство транснептуновых объектов, кометы и другие тела.

К малым телам Солнечной системы также относятся метеороиды и межпланетная пыль. До недавнего времени чёткого критерия для разделения понятий "астероид", "метеороид", "межпланетная пыль" не было. В 2017 г. Комиссия F1 МАС приняла рекомендации по использованию терминов "метеороид" и "межпланетная пыль"<sup>2</sup>, позволяющие более чётко использовать указанные термины. Согласно принятым рекомендациям:

- метеороиды — твёрдые объекты размером примерно от 30 мкм до 1 м, движущиеся в межпланетном пространстве;
- межпланетная пыль — твёрдые межпланетные объекты размером до 3 мкм.

Из приведённых определений вытекает, что астероиды (и ядра комет) — это твёрдые тела размером более 1 м.

Некоторые термины поясняются не в резолюциях МАС, а в глоссарии, созданном в проекте "The IAU Office of Astronomy for Education". Это совместный проект МАС и Института астрономии Общества Макса Планка (Германия). В глоссарии<sup>3</sup> даны следующие определения (в сокращении):

- астероид — представитель ансамбля обращающихся вокруг Солнца относительно небольших (размером от метров до многих сотен километров) твёрдых тел различного состава: некоторые из них богаты углеродом, некоторые содержат больше каменистого материала (силикатов), а другие в основном состоят из металлов. Многие астероиды представляют собой гравитационно связанные груды щебня (piles of rubble). У некоторых астероидов есть спутники — обращающиеся вокруг них астероиды меньшего размера;

- комета — состоит из ядра, содержащего смесь различных льдов и каменистое (пылевое) вещество. Размеры ядер комет обычно варьируются от нескольких сотен метров до многих десятков километров в поперечнике. Большинство комет движутся по высокоэллиптическим орбитам. Когда комета приближается к Солнцу, часть поверхностного льда испаряется, образуя характерные очертания комы и хвоста. Мы видим кометы благодаря солнечному свету, отражающемуся от комы, хвоста или (для комет, удалённых от Солнца) ядра. Кометы классифицируются как короткопериодические, если их период составляет менее 200 лет, и долгопериодические (также непериодические) в противном случае.

<sup>1</sup> URL: [https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution\\_GA26-5-6.pdf](https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf) — дата обращения 14.07.2024 г.

<sup>2</sup> URL: [https://www.iau.org/static/science/scientific\\_bodies/commissions/f1/meteordefinitions\\_approved.pdf](https://www.iau.org/static/science/scientific_bodies/commissions/f1/meteordefinitions_approved.pdf) — дата обращения 14.07.2024 г.

<sup>3</sup> URL: <https://astro4edu.org/resources/glossary/search/> — дата обращения 14.07.2024 г.

Плотность кометных ядер в тех случаях, когда она измерена достаточно точно (как правило, в космических экспериментах), обычно в несколько раз ниже, чем у астероидов. Но когда мы имеем дело с небольшими телами, то определить их массу (и плотность) весьма проблематично и применить данный критерий для разделения комет и небольших астероидов трудно.

Обычно ещё упоминают различие в орбитальных характеристиках: орбиты комет более вытянутые, чем у астероидов. Но это различие не имеет абсолютного характера. Как показано, например, в [5–7], в населении АСЗ (астероидов, сближающихся с Землёй, т.е. астероидов с перигелийным расстоянием  $q < 1,3$  а.е.) многие тела в процессе относительно быстрой динамической эволюции выходят на крайне вытянутые орбиты и даже сталкиваются с Солнцем. Согласно работе [7], в которой приведены результаты интегрирования движения населения АСЗ на интервале времени 20 млн лет, доля АСЗ, столкнувшихся с Солнцем, составила около 15% от общего количества АСЗ в начальный момент времени. С другой стороны, на орбитах с относительно небольшим эксцентриситетом и перигелийным расстоянием, превышающим радиус границы льдов, находится множество ледяных (льдосодержащих) тел, которые никак не проявляют себя как кометы, поскольку всегда находятся достаточно далеко от Солнца.

Для количественной классификации орбит кометного и астероидного типа используют так называемый параметр Тиссерана — динамическую величину, приблизительно сохраняющуюся при сближении малого тела с планетой. Параметр Тиссерана — это приближённое выражение константы Якоби для ограниченной круговой задачи трёх тел (Солнце, планета и малое тело), он позволяет связать элементы орбиты малого тела после сближения со свойствами, существовавшими до сближения. Его значение сохраняется даже в случае тесных сближений [8]. Малое тело имеет разные значения параметра Тиссерана относительно разных планет. Поскольку Юпитер является самой массивной планетой в Солнечной системе и оказывает наибольшее динамическое влияние на кометы и астероиды, наиболее часто используемым параметром Тиссерана является тот, который вычисляется относительно Юпитера и обозначается как  $T_J$ . Приведём выражение для параметра Тиссерана относительно Юпитера:

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[ (1 - e^2) \frac{a}{a_J} \right]^{1/2} \cos(i), \quad (1)$$

где  $a$ ,  $e$  и  $i$  — большая полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты малого тела соответственно, а  $a_J = 5,2$  а.е. — большая полуось орбиты Юпитера. В первом приближении считается, что если  $T_J \gtrsim 3$ , то данное тело относится к астероидам, и к кометам, если  $T_J \lesssim 3$ .

Происхождение астероидов и комет также считается различным. Астероиды — это фрагменты более крупных родительских тел, раздробленных при взаимных столкновениях. Многие такие тела ещё в процессе своего формирования (на протяжении нескольких первых миллионов лет) испытали глубокие внутренние изменения, включая высокотемпературную дифференциацию вещества. Основным источником нагрева стал распад короткоживущих изотопов —  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$  и др. (см. [9–11]). Другие родительские тела астероидов, которые изначально вклю-

чали существенную долю льдов, испытали только водную дифференциацию (см., например, [12]). Значительные запасы льдов в телах, производных от этого класса тел, т.е. в астероидах примитивных (или низкотемпературных) типов, могли сохраниться до настоящего времени по причине высокой пористости и, соответственно, низкой теплопроводности поверхностных слоёв, как следует из моделирования [13, 14] и подтверждается в наблюдениях, например, в радиометрических измерениях характеристик поверхности астероида С-типа 162173 Ryugu (Рюгю) с космического зонда "Hayabusa-2" [15].

Преимущественной областью образования астероидов является внутренняя Солнечная система, где они концентрируются в торообразной структуре — Главном поясе астероидов (ГПА).

Кометы находятся в основном в области, простирающейся от планет-гигантов до внешних границ Солнечной системы. Ядра комет представляют собой многочисленное подмножество льдосодержащих тел — "наследников" планетезималей (кометезималей), образовавшихся на самых ранних стадиях формирования Солнечной системы. Кометное вещество, особенно у долгопериодических комет, по составу близко к первичному составу планетезималей. Но не всё так однозначно. Некоторые кометы содержат любопытную комбинацию наиболее летучих льдов из самых отдалённых областей протопланетного диска и высокотемпературных кристаллических силикатов с внутреннего края протопланетного диска [16, 17]. Присутствие кристаллических силикатов в кометах, выявленное с помощью инфракрасных наблюдений, долгое время было загадкой. Кристаллические силикаты являются неожиданностью, если кометы состоят из первозданного межзвёздного материала, поскольку межзвёздные силикаты почти полностью аморфны. Нагрев до температуры  $> 1100$  К может привести к кристаллизации силикатов, но не было обнаружено протопланетных источников нагрева, которые были бы достаточно мощными, чтобы нагреть материалы во внешней зоне протопланетного диска до таких высоких температур. Эта загадка привела к предположению, что в протопланетном диске имело место крупномасштабное перемешивание.

В любом случае существует значительная разница в содержании летучих веществ в обоих классах объектов. Данный факт и обеспечил наиболее очевидное различие между кометами и астероидами.

## 1.2. Активность астероидов: проявления активности

В последние годы представления о кардинальном различии между кометами и астероидами существенно изменились, и стало понятно, что по перечисленным в разделе 1.1 признакам отличить комету от астероида не всегда просто.

То, что тела, считающиеся (считавшиеся) астероидами, могут проявлять признаки кометной активности, известно уже довольно давно. Согласно [18], первым астероидом, у которого был замечен признак кометной активности (выраженный хвост), был АСЗ 4015 Wilson – Harrington (Вильсон – Харрингтон) (рис. 1, являющийся фрагментом кадра, взятого из архива ESO и Palomar Observatory<sup>4</sup>). Правда, в работе [19], на которую ссы-

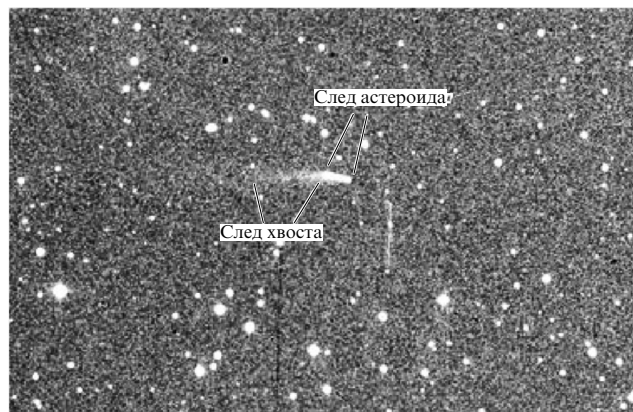


Рис. 1. Фрагмент снимка, сделанного 19 ноября 1949 года. Показан объект 4015 Wilson – Harrington с признаками активности (см. пояснения в тексте).

лается [18], об астероидной природе объекта упоминания нет. Сейчас считается, что это околоземный астероид из группы аполлонов, также известный как комета 107P/Wilson – Harrington.

В наши дни астрономы полагают, что проявления кометоподобной активности, такие как кома и хвосты, не ограничиваются только кометами. За последние 70 лет было открыто около 30 таких "активных астероидов", семь из которых даже имеют и кометное, и астероидное обозначения [18].

В 1996 году началась современная эра исследования активных астероидов, когда был обнаружен активный объект 133P/Elst – Pizarro (Эльст – Писарро), обращающийся по орбите в поясе астероидов [20]. Этот объект неоднократно проявлял активность, особенно вблизи перигелия [21]. Повторяющаяся периодическая активность в перигелийной зоне, когда объект находится близко к Солнцу, является убедительным доказательством того, что активность обусловлена сублимацией льдов, и данный объект стал первым, получившим название "комета Главного пояса" (Main Belt Comet, MBC). MBC — подмножество активных астероидов, которые обращаются внутри пояса астероидов и проявляют активность, обусловленную в основном сублимацией (см. хороший обзор в [22]).

Исходя из кометоподобной активности нескольких небольших астероидов, в том числе двух членов динамического семейства Themis (Фемида), делались предположения о присутствии льда на/близ поверхности этих тел. В [23] такие предположения были подтверждены для астероида 24 Themis (Фемида) с помощью спектральных инфракрасных наблюдений. Присутствие поверхностного льда на Фемиде было несколько неожиданным из-за относительно короткого времени существования открытого льда на данном расстоянии ( $\sim 3$  а.е.) от Солнца.

Таким образом, в том, что касается, казалось бы, бесспорного признака комет — сублимационной активности, чёткость разделения на астероиды и кометы в последнее время изрядно размылась. В конце своей активной жизни некоторые кометы могут выглядеть как астероиды, когда сублимация прекращается из-за истощения летучего материала и/или образования теплоизолирующей коры на их поверхности (см., например, [24]). Такая кора из тугоплавких частиц может в итоге стать настолько толстой, что подповерхностные летучие вещества не смогут быть нагреты до температуры сублимации, даже

<sup>4</sup> URL: <https://www.eso.org/public/images/eso9212b/> — дата обращения 14.07.2024 г.

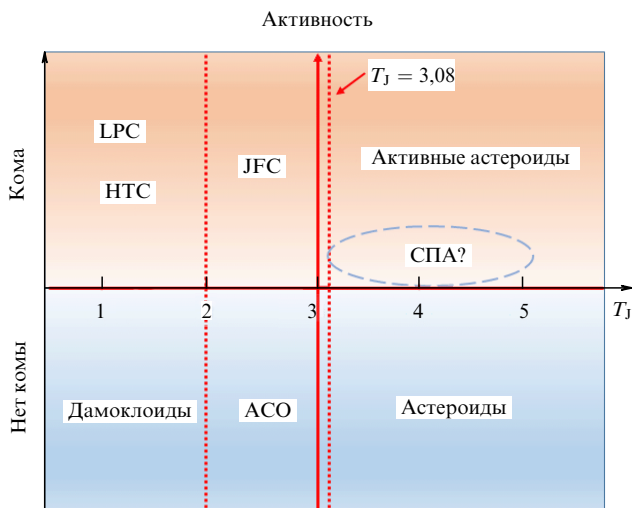


Рис. 2. Диаграмма классификации малых тел по динамическому параметру (параметру Тиссерана  $T_J$ ) и по признаку активности (обнаружения комы). Сокращения пояснены в тексте. Вертикальная пунктирная линия, обозначенная  $T_J = 3,08$ , соответствует номинальной нижней границе для активных астероидов. Область астероидов с сублимационно-пылевой активностью (СПА) показана условно. (Диаграмма адаптирована из [30].)

при прохождении перигелия на близком расстоянии от Солнца (существенно внутри границы льдов). В работе [14] показано, что даже при продолжительном (более 100 лет) нахождении короткопериодической кометы (рассмотрен пример кометы 67P/Churyumov–Gerasimenko (Чурюмова–Герасименко)) на орбите тепловая энергия аккумулируется в субповерхностном слое ядра толщиной не более 10 м. Распределение температуры в этом слое стремится к некоему квазистационарному состоянию, сохраняющемуся в течение всего периода обращения кометы по орбите. Аналогичный результат получен в работе [25], в которой промоделирована тепловая история поверхностных слоёв объекта 11/2017 U1 (Oumiautua) во время его облёта Солнца и продемонстрирована высокая живучесть подповерхностного льда. Ещё один важный результат данной работы — согласно модели максимум температуры на глубине 30 см отмечался не в перигелии, а существенно позже (через 100 дней) после прохождения перигелия, причём он так не и достиг температуры сублимации льда  $H_2O$ , хотя в перигелии на поверхности объекта температура превышала 600 К. Так что даже если Oumiautua в конце концов "записали" в астероиды, это не значит, что под его поверхностью не может содержаться некоторое количество льдов.

В последние годы всё чаще прибегают к понятию "астероидно-кометный континуум", понимая под этим отсутствие жёстких границ между свойствами таких объектов. Впервые термин "Comet-Asteroid Continuum" (в последние годы чаще используется вариант "Asteroid-Comet Continuum") введён в [26], популярном изложении результатов работы [23]. В ряде работ (см., например, [27–29]) обсуждаются различные аспекты астероидно-кометного континуума. Историю вопроса можно проследить в недавнем обзоре [30], где представлена двумерная диаграмма классификации малых тел по динамическому параметру (параметру Тиссерана  $T_J$ ) и по признаку активности (обнаружения комы). Диаграмма представлена на рис. 2 (адаптированном из рис. 1 [30]).

На диаграмме показана область, занимаемая долгопериодическими кометами (LPC), у которых  $T_J < 2$  и орбитальные периоды  $P_{orb} \geq 200$  лет; область комет типа кометы Галлея (HTC), имеющих  $T_J < 2$  и  $P_{orb} < 200$  лет; область комет семейства Юпитера (JFC), имеющих  $2 \leq T_J \leq 3$ . Различные орбитальные свойства этих популяций отражают их происхождение: LPC приходят из облака Оорта, JFC — из пояса Койпера, а HTC — из пока неясного источника, с вероятным вкладом как облака Оорта, так и рассеянного диска пояса Койпера [31]. Дамоклоиды (малые тела неясной природы на кометных орбитах, скорее всего, потерявшие все летучие вещества ядра комет) и астероиды на кометных орбитах (АСО) являются неактивными телами с  $T_J < 2$  и  $2 \leq T_J \leq 3$  соответственно. Кентавры (малые тела, находящиеся между орбитами Юпитера и Нептуна, переходные по свойствам между астероидами ГПА и объектами пояса Койпера) на диаграмме не показаны. Они могут находиться в любом месте диаграммы.

### 1.3. Активность астероидов: механизмы активности

Итак, активные астероиды — это тела, у которых хотя бы один раз были зарегистрированы выраженные признаки кометной активности (образование комы или хвоста). Такая хорошо детектируемая активность может возникнуть под действием различных механизмов. Довольно полные обзоры механизмов можно найти в [22, 32, 33]. Главное заключение по указанным работам состоит в том, что сублимация — не единственная причина наблюдаемой активности. На некоторых телах может вообще не быть льда, особенно на богатых силикатами астероидах, известных как астероиды S-типа. Более того, механизмы, потенциально ответственные за наблюдаемую активность, не являются взаимоисключающими, и один механизм активности может запускать другой или они могут проявляться одновременно. Некоторые события носят стохастический (разовый) характер, в то время как другие повторяются. Повторяющаяся активность является важным диагностическим показателем при определении механизма, лежащего в основе активности. Кратко охарактеризуем основные механизмы активности астероидов.

**Сублимация льдов.** Основным механизмом активности комет является сублимация летучих веществ, находящихся в ядрах комет в виде льдов. Помимо водяного льда на астероидах и кентаврах были обнаружены диоксид и монооксид углерода, аммиак, метан, азот и другие молекулы. Летучим веществам не обязательно находиться на поверхности, чтобы сублимироваться, однако для дистанционного обнаружения льда на неактивных телах требуется, чтобы лёд присутствовал на поверхности. Резервуары льдов в таких телах могут находиться и непосредственно под поверхностью, и глубже. Для сублимации требуется энергия. Обычно это энергия излучения Солнца. Многие периодически активные объекты, особенно кометы, становятся более активными по мере приближения к Солнцу. Энергия может также поступать из других источников, таких как приливный нагрев (например, нагрев Европы — спутника Юпитера [30]) или фазовые переходы льда (см. [32]). Скорость сублимации льдов существенно зависит от температуры. Любой лёд начинает более активно сублимироваться при температуре выше некоторой критической, часто называемой температурой сублимации. Для разных льдов темпера-

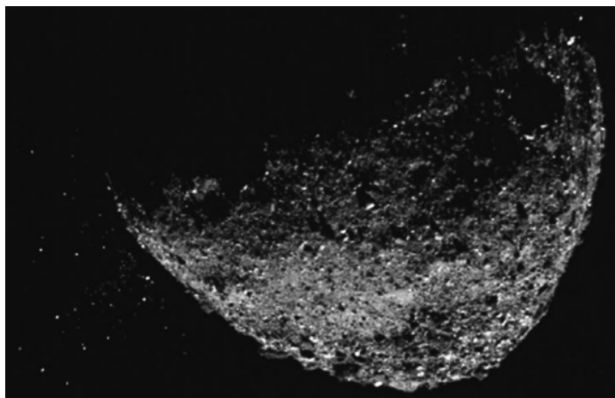


Рис. 3. Частицы гравия (слева), выброшенные с поверхности астероида 101955 Бенну, были зафиксированы камерами на борту космического аппарата OSIRIS-REx. (Источник: NASA/Goddard/University of Arizona/Lockheed Martin.)

тура сублимации может сильно отличаться. Например, в [35] приведены теоретические значения температуры сублимации различных льдов при очень низкой плотности газа ( $10^{13} \text{ см}^{-3}$ ), в частности, для льда  $\text{H}_2\text{O}$  температура сублимации 152 К, а для  $\text{CO}$  — 25 К. Понятно, что водяной лёд, например, не будет заметно сублимироваться на типичных орбитальных расстояниях кентавров, но он может легко сублимироваться на телах в поясе астероидов. Можно ожидать, что водяной лёд может сохраниться на теле, обращающемся на орбите радиусом 5 а.е., причём на таком теле не сохранились запасы монооксида углерода и метана из-за их летучести [13, 36].

*Ударные события.* Столкновения астероидов — постоянно протекающий процесс (особенно в ГПА), влияющий на формирование спектра размеров (масс) астероидов и их орбитальную эволюцию. Столкновительная эволюция населения астероидов рассматривалась многими авторами (см., например, [37–39]). Прямых наблюдений таких событий нет, и даже наблюдений последствий недавних столкновений мало. Зафиксировать недавнее столкновение — момент случайной наблюдательной удачи. Пример подобной удачи — объект P/2010 A2. Сразу после открытия 6 января 2010 г. на наземном телескопе LINEAR и выполненных вскоре наблюдений на телескопе им. Хаббла этот необычный объект рассматривался либо как представитель класса комет Главного пояса, либо как проявление столкновения двух астероидов семейства Flora (Флора). Вторая интерпретация получила признание [40]. Считается, что первый обнаруженный активный астероид 4015 Вильсон–Харрингтон (см. рис. 1) подвергся удару, поскольку активность данного объекта больше никогда не наблюдалась, несмотря на то что поиски продолжались более 70 лет.

Астероид 596 Scheila (Шейла) считается образцом астероидной активности, вызванной столкновением [41]. В [42] представлены результаты наблюдений астероида 596 Шейла и облака его выбросов с помощью ультрафиолетового оптического телескопа UVOT на космическом аппарате (КА) Swift. Не обнаружено ни одного из газов, которые обычно ассоциируются с повышенной летучестью ( $\text{CO}^+$ ,  $\text{CO}_2^+$ ), или каких-либо летучих веществ, выделяющихся вместе с пылью (ОН, NH, CN,  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$ ). По оценкам, было выброшено  $6 \times 10^8$  кг пыли с высокой скоростью выброса  $57 \text{ м с}^{-1}$ . Согласно [42], 596 Шейла,

скорее всего, столкнулся с другим астероидом Главного пояса диаметром менее 100 м.

Выше приведены примеры последствий столкновений с достаточно крупными телами. Но гораздо чаще с астероидами сталкиваются более мелкие тела. При таких столкновениях происходит некоторый выброс вещества и/или разрушается самый внешний слой тела-мишени, т.е. происходит его разрыхление (gardening). Разрыхление — сложный многофакторный процесс, он может быть обусловлен воздействием микрометеороидов (ударное разрыхление, impact gardening [43, 44]) и фотонов (разрыхление под действием излучения, solar gardening [45]). Ударное разрыхление выполняет важную функцию приближения льда к поверхности тела, тем самым увеличивая доступность материала для сублимации.

Недавно космический аппарат OSIRIS-REx посетил астероид 101955 Bennu (Бенну) для сбора образцов. Камеры на борту КА зафиксировали то, что выглядело как гравий и другие твёрдые частицы, вылетающие с поверхности и возвращающиеся на неё (рис. 3). В качестве потенциальной причины были выдвинуты предположения о воздействии микрометеороидов [46, 47], хотя обсуждается и другой механизм — термическое разрушение (см. далее в этом разделе).

*Вращательная неустойчивость.* Астероиды подвержены "раскручиванию" с течением времени в результате процесса, известного как эффект Ярковского–О'Кифа–Радиевского–Паддока (YORP) (подробнее о YORP см., например, в [48]). Возможно, что вращательная неустойчивость может привести к повторяющейся активности, не связанной с сублимацией [22]. Даже если активность повторяется, её проявления не будут коррелировать с расстоянием до перигелия. Неустойчивость вращения может привести к сублимации, если, например, обвал или оползень обнажат ранее захороненные летучие вещества, которые впоследствии сублимируются. Активность может снова прекратиться, если летучие вещества будут поглощены оседающим материалом, который был выброшен ранее.

*Термическое разрушение.* Нагревание твёрдых материалов может привести к разрушению. Разрушение происходит, когда напряжение, вызванное изменением температуры (например, расширением нагретого материала), превышает предел прочности прилегающего материала. В зависимости от орбиты объекта, это может происходить неоднократно, особенно когда объект находится близко к Солнцу. Само по себе такое действие может инициировать выброс вещества в космос и кометоподобную активность. Кроме того, образование трещин может привести к экспонированию ранее изолированных льдов, которые впоследствии сублимируются.

В [49] показано, что динамические модели популяции околоземных астероидов (АСЗ) дают большее количество тел с перигелием вблизи Солнца, чем это следует из наблюдений, и предполагается, что АСЗ с малыми перигелийными расстояниями подвергаются так называемому суперкатастрофическому разрушению в результате не вполне понятного процесса. Механизм разрушения, хотя и явно связан с температурой, не является тривиальным. Возможно, что горные породы распадаются на мелкие фрагменты в результате термического растрескивания верхнего слоя, а затем самые мелкие частицы сдуваются с астероида радиационным давлением. В [50] сделано предположение, что суперкатастрофическое разрушение

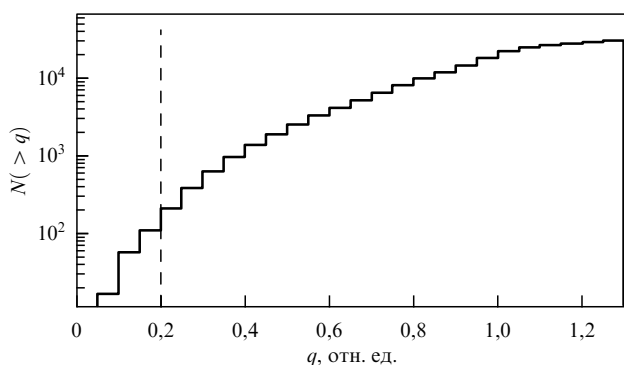


Рис. 4. Распределение АСЗ по перигелийному расстоянию.

может быть также вызвано столкновениями с метеороидами, которые достигают высоких скоростей и концентрации в окосолнечной области. В данном случае астероиды могут сбрасывать верхние слои неоднократно, хотя и не периодически, и как раз в зоне перигелия, т.е. почти по кометному образцу. В целом всё же такие суперкатастрофические разрушения относительно редки, поскольку число АСЗ с очень малыми перигелийными расстояниями относительно невелико. Как видно из рис. 4, построенного по ансамблю известных АСЗ (данные с сайта Центра малых планет<sup>5</sup>), количество АСЗ, имеющих  $q < 0,2$  а.е. (термические эффекты могут быть существенны лишь при высоких температурах  $T > 600$  К, что соответствует  $q < 0,2$  а.е.), составляет лишь примерно 0,3 % от общего числа.

В случае с активным астероидом 3200 Phaeton (Фаэтон), который, как полагают, ответственен за метеорный поток Геминид (см., например, [51]), температура тела достигает примерно 1100 К в перигелии (0,14 а.е.) [52], что может вызвать термическое разрушение и, в свою очередь, может привести к потере массы [53, 54]. Миссия JAXA DESTINY+ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science), запуск которой запланирован на 2025 г., призвана дать более полное представление о Фаэтоне и его активности [55].

*Давление излучения на пыль.* Давление солнечного излучения создаёт силу, которая, в принципе, может сметать мелкие частицы с поверхности безатмосферного тела, особенно тела со слабым гравитационным полем. Такой эффект может играть важную роль в качестве вторичного воздействия, унося выброшенный другими способами материал (см. далее), который в противном случае осел бы обратно на поверхность. Считается, что это играет важную роль в случае астероида 3200 Фаэтон, с учётом того что его  $q = 0,14$  а.е. и поток излучения Солнца интенсивен. На сегодняшний день данный эффект не был непосредственно измерен на астероиде, но миссия DESTINY+ может принести новые сведения.

*Электростатический подъём.* Проявление этого механизма было замечено в наблюдениях, проведённых с борта космических аппаратов Surveyor-5, 6 и 7, как "свечение лунного горизонта" [56]. Электростатические силы могут быть достаточно мощными, чтобы отталкивать пылевые частицы от поверхности небольших безатмосферных тел, таких как астероиды. Если материал

будет поднят без достаточного запаса энергии для покидания тела, второй механизм воздействия (например, давление излучения) может помочь унести материал прочь. Электростатический подъём — слабый механизм, поэтому не ясно, может ли он привести к активности, обнаруживаемой на расстояниях, превышающих размер околоастероидной орбиты КА [22].

*Другие механизмы.* Рассматриваются и другие механизмы активности астероидов: контактное разрушение в двойных астероидах, дегидратация филлосиликатов и даже криовулканизм (см., например, [33]).

Криовулканизм имеет место только у крупных спутников планет (например, у Энцелада [57]) или у карликовых планет (Церера [58]). На сегодняшний день не ясно, связана ли какая-либо активность на активных астероидах или активных кентаврах с криовулканизмом.

Филлосиликаты — класс минералов, для которых характерно расслоение, например, слюдяные или смектиновые глины. Гидратированные филлосиликаты содержат летучие вещества, такие как вода, задерживающиеся между слоями. Лабораторные исследования метеоритов, богатых гидратированными филлосиликатами, показывают, что летучие вещества могут выделяться при нагревании. Это может привести к выбросу материала с поверхности безатмосферного тела. Такой механизм может быть задействован на астероиде 101955 Бенну [46], поскольку его поверхность изобилует гидратированными филлосиликатами [59]. Впрочем, предполагается (см. [46]), что на активном астероиде 101955 Бенну могут работать сразу три механизма генерации подобных выбросов: столкновения астероида с метеороидами, дегидратация филлосиликатов, входящих в состав вещества астероида, а также взрывное разрушение пород из-за резкого нагрева и охлаждения. Последнее возможно из-за слишком быстрой смены дня и ночи на астероиде.

Компоненты двойного астероида могут в конечном итоге сблизиться в контактную двойную систему. Физическое взаимодействие между соприкасающимися компонентами двойных систем может привести к отслаиванию материала с поверхностей, что приведёт к образованию комы и/или хвоста. Однако этот механизм ещё предстоит окончательно идентифицировать как причину активности какого-либо известного активного астероида, хотя он был предложен в качестве одного из возможных объяснений активности астероида P/2013 P5 [60].

#### 1.4. Выводы по разделу

Сравнительный анализ описанных выше наблюдений и механизмов активности астероидов приводит к следующим выводам:

1. Активность астероидов детектировалась в основном с помощью получения изображений. В свою очередь спектральные наблюдения позволяют, в принципе, выявить активность объекта независимо от того, состоит ли вещество из летучих веществ или пыли. Этот метод ранее также применялся, однако сублимационные проявления у комет Главного пояса ранее не были подтверждены в спектральных наблюдениях с поверхности Земли (см. [36, 61]). Отметим, что недавно наблюдения на космическом телескопе JWST позволили обнаружить воду в коме кометы Главного пояса 238P/Read [61].

2. С помощью наземных наблюдений выявляются лишь достаточно мощные проявления активности, приводящие к появлению комы и/или хвоста у небольшого

<sup>5</sup> URL: <https://minorplanetcenter.net> — дата обращения 01.06.2023.

числа астероидов. Несомненно, что число астероидов, у которых активность протекает в более умеренных масштабах, несравнимо больше. Для регистрации слабой активности наземными инструментами нужны новые подходы.

3. Механизмов активации астероидов много, но большинство из них слабы, и их проявления, по-видимому, можно детектировать только с помощью космических миссий.

4. Наиболее эффективными механизмами являются сублимация льдов (для льдосодержащих тел) и ударные события (для тел любого состава). Эти механизмы работают на телах всех размеров.

5. Ударный механизм универсален и может путём фрагментации обеспечить образование малых тел размером от долей микрона до астероидных, но он работает преимущественно в областях с высокой концентрацией тел-ударников (например, в Главном поясе).

## 2. Сублимационно-пылевая активность астероидов

Как отмечено в разделе 1, для регистрации слабой активности астероидов с помощью наземных инструментов необходимо применять новые подходы. Таким эффективным подходом оказалось применение традиционного метода широкополосной фотометрии и спектрофотометрии. В работах [1–4] применение этого подхода позволило массово изучать слабую форму активности астероидов примитивных типов, названную сублимационно-пылевой активностью (СПА). СПА приводит к образованию у астероидов временной, достаточно разреженной пылевой экзосферы. В настоящем разделе представлены спектральные данные, которые позволили не только впервые обнаружить СПА ряда достаточно крупных астероидов примитивных типов Главного пояса, но и наметить ориентиры их дальнейших исследований, включая уточнение их происхождения и современного состава вещества. С другой стороны, выполнение численного моделирования спектров отражения таких условных активных астероидов и их сравнение с наблюдательными данными дало возможность конкретизировать размеры, структуру и состав вещества пылевых частиц, образующих их временную пылевую экзосферу.

### 2.1. Свидетельства активных событий на астероидах и обнаружение экзосферы астероидов спектральными методами

Одним из основных признаков астероидов как малых небесных тел традиционно считалось отсутствие не только газовой атмосферы, но и разреженной пылевой экзосферы (ПЭ), так как их гравитационное поле очень слабое (слабее земного в  $\sim 30-10^5$  раз) и не может длительно удерживать ПЭ даже у самых крупных астероидов. Однако около трёх десятилетий назад в ГПА было обнаружено ещё несколько совсем небольших объектов, примерно километровой размера, проявивших кратковременную кометоподобную активность. Можно предполагать, что она была обусловлена выбросами пыли и более крупных фрагментов, связанными с ударными событиями или столкновениями небольших астероидов. Эти результаты инициировали до сих пор идущую дискуссию о возможной активности астероидов и их вероятной эволюционной связи с ядрами комет (см., например, [20–22]).

Основные механизмы активности астероидов уже были рассмотрены в ряде публикаций (см., например, [22, 30]), а также обсуждались выше. Рассмотрим более подробно механизм, связанный с сублимацией льда  $H_2O$  с поверхностного слоя астероида примитивного типа. Сразу подчеркнём, что под такими астероидами мы подразумеваем в основном малые тела таксономических (спектральных) типов C, B, F и G с низкотемпературной минералогией, аналогами вещества которых считаются углистые хондриты разных химических групп с характерными проявлениями водного метаморфизма.

Как известно из многочисленных наблюдений и моделирования ядер комет, различия в их активности зависят от степени активности, фазового состояния и относительного содержания астрофизических льдов, входящих в их состав (см., например, [62, 63]). Наши наблюдательные результаты (см., например, [1–4]) показывают, что сублимационная активность астероидов примитивных типов напоминает кометную, но является значительно более слабой и ограниченной по времени. В то же время очевидно, что водяной лёд должен преобладать среди других летучих соединений в составе астероидов, родительские тела которых сформировались в ранней Солнечной системе вблизи границы образования льда  $H_2O$ . Как показывают модельные расчёты (см., например, [63]), при подсолнечных температурах, соответствующих гелиоцентрическим расстояниям ГПА ( $\sim 2,1-3,2$  а.е.), скорость сублимации водяного льда почти на семь порядков меньше, чем у сухого льда, близкого к нему по физическим параметрам, откуда следует, что из-за высокой летучести льда  $CO_2$  его наличие в недрах астероидов Главного пояса является маловероятным. Поэтому сублимационная и связанная с ней пылевая активность астероидов примитивных типов должна определяться в основном содержанием льда  $H_2O$ . Тем более что возможность его сохранности в масштабе времени существования Солнечной системы в недрах достаточно крупных астероидов примитивных типов (от километра и больше) обоснована с помощью численных расчётов [13].

Ещё одной важной особенностью рассматриваемых астероидов, которая проявляется с ростом размера и массы, является увеличение толщины слоя их реголита. Это, например, известно из результатов комплексных исследований поверхностного вещества Цереры [64], содержащего высокую долю мелкодисперсной пыли. Последнее свойство также обусловлено преобладающим составом таких тел, включающим микрокристаллические водосодержащие филлосиликаты (см., например, [65, 66]). При сублимации водяного льда (как одного из связующих компонентов реголита) частицы субмикронных размеров могут выноситься с поверхности активных астероидов даже низкоскоростными (порядка десятых долей  $m\ s^{-1}$ ) газовыми потоками и обеспечивать формирование тонкой ПЭ. Но в то же время, как будет показано в разделе 2.2, состоящая из частиц субмикронных размеров ПЭ способна эффективно влиять на спектральные характеристики обсуждаемых астероидов примитивных типов в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах, что способствует её обнаружению спектральными методами. Таким образом, сублимационная активность астероидов примитивных типов может быть более точно определена таким термином, как сублимационно-пылевая активность (СПА). Закономерно также задать во-

прос: могут ли отличаться спектральные признаки СПА астероида от его чисто пылевой активности в случае отсутствия ледяных частиц в ПЭ или при действии другого механизма активности? Ответом на этот вопрос будут результаты численного моделирования спектров отражения условных активных астероидов, которые представлены в разделе 2.2.

Следует отметить, что наиболее распространёнными способами обнаружения активности астероидов при наземных наблюдениях являются анализ их прямых изображений и изучение их фотометрических профилей на снимках (обычно в полосе V) по сравнению с точечными изображениями соседних звёзд (см., например, [63]). Появление какой-либо асимметрии на изображении астероида трактуется как признак его активности в форме комы, хвоста или выброса вещества, связанного с ударным событием. В качестве разновидности прямого метода обнаружения активности астероидов можно рассматривать фотометрический метод, при котором мониторинг видимой звёздной величины изучаемого астероида сопровождается её расчётом по стандартным формулам, связывающим известные орбитальные и физические параметры астероида. В этом случае уменьшение наблюдаемой видимой звёздной величины астероида по сравнению с расчётной также служит признаком его активности.

Особенностью нашего подхода к изучению активных астероидов является применение спектрального метода, который показал высокую эффективность в этих исследованиях даже при низком спектральном разрешении. Более того, низкое разрешение является преимуществом спектроскопии или популярной широкополосной фотометрической системы UBVRi при обнаружении и изучении наиболее слабых астрономических объектов. Именно такие методы позволили нам впервые получить результаты, представленные ниже.

Также важно отметить, что на прямых снимках активного астероида в ГПА, полученных с помощью крупных наземных телескопов в хороших фотометрических условиях, невозможно обнаружить признаки его активности до тех пор, пока размер его комы или хвоста не будет превышать несколько сотен километров, что соответствует сотым долям угловой секунды. В то же время спектральный метод позволяет обнаружить изменения в спектре отражения астероида, связанные с наличием ПЭ, даже при меньшей протяжённости последней, т.е. ниже предела пространственного разрешения. Этим, вероятно, объясняется тот факт, что активность многих из обнаруженных нами астероидов пока не подтверждается прямыми наблюдательными методами [67].

В наши наблюдательные программы, нацеленные на обнаружение активных объектов, в основном были включены астероиды примитивных типов с эксцентриситетами орбит не менее 0,1 (у которых происходят более заметные изменения подсолнечных температур на поверхности при движении от афелия до перигелия). Ещё одним требованием было нахождение объектов вблизи перигелийных расстояний, что соответствует самым высоким температурам поверхности. Обсудим наиболее важные результаты этих исследований.

Таким образом, спектроскопия низкого разрешения ( $R \sim 100$ ) и/или UBVRi-фотометрия являлись основными методами наших наблюдений, в результате проведения которых в течение примерно 10 лет были

получены спектры отражения  $\sim 300$  астероидов примитивных типов. Расчёт спектров отражения (или аппроксимированных спектров отражения) астероидов осуществлялся с помощью спектров непременных звёзд солнечного типа в качестве аналогов Солнца, а непременные звёзды, находившиеся на общих ПЗС-кадрах с астероидами, были использованы для контроля фотометрической стабильности при UBVRi-наблюдениях (см., например, [65, 68]). Таксономические классы и основные физические параметры астероидов, у которых нами были обнаружены явные спектральные признаки СПА, а также астероидов, подозреваемых в активности (для подтверждения которой необходимы дополнительные наблюдения), приведены в таблице. Общее количество первых на сегодняшний день составляет 16 (их названия в таблице выделены заглавным шрифтом), а вторых — тоже 16. Интересно, что в числе активных оказались два астероида с повышенным значением геометрического альbedo ( $> 0,10$ ). Это вероятно, поскольку наличие льда на таких астероидах может быть объяснено их низкоскоростными столкновениями с ледяными телами.

Одновременная активность четырёх астероидов Главного пояса примитивных типов (145 Adeona (Адеона) и 704 Interamnia (Интерамния) и как раз двух упомянутых астероидов с повышенным значением геометрического альbedo — 779 Nina (Нина) и 1474 Beira (Бейра)) (см. таблицу), находящихся вблизи своих перигелийных расстояний, была нами впервые обнаружена спектроскопическим методом в сентябре 2012 г. [1]. Напомним, что средний состав поверхностного вещества астероидов разных таксономических (спектральных) типов был установлен с помощью сопоставления их спектров отражения, характеризующих химико-минералогический состав вещества, с лабораторными спектрами отражения раздробленных образцов метеоритов, как их вероятных фрагментов (см., например, [78–80]). Но полученные в диапазоне  $\sim 0,36–0,95$  мкм спектры отражения этих четырёх астероидов (рис. 5а–г) оказались совершенно не похожими на их же спектры отражения из базы данных SMASS II<sup>6</sup>, слабо меняющиеся в видимом диапазоне и характерные для тел силикатного состава (см., например, [81]).

Несмотря на некоторые различия в составе поверхностного вещества 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины (в соответствии с классификацией), их общей спектральной деталью оказался необычный максимум на  $0,4–0,5$  мкм (рис. 5а–в). Мы предположили [1], что такое сходство может быть признаком активности этих астероидов и наличием у них ПЭ, состоящей из частиц близких размеров, сравнимых с длинами волн рассеиваемого света. В то же время в спектре отражения 1474 Бейры было обнаружено два необычных максимума, из которых больший оказался смещён к  $0,65$  мкм (рис. 5г). Ошибки измерений обсуждаемых нормированных спектров отражения астероидов (здесь и далее) составляют 1–2% в центре видимого диапазона и нарастают до 5–7% вблизи его границ, а сами спектры представляют собой усреднённые характеристики, полученные на интервале времени до нескольких часов. Указанные спектральные особенности активных астероидов были проанализиро-

<sup>6</sup> URL: <http://smass.mit.edu/data/smass/smass2/> — дата обращения 14.07.2024.

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

Номер и название	Диаметр (эффективный), км	Класс <sup>a</sup>	Геометрическое альbedo	Период вращения <sup>a</sup> , ч	Фазовый угол <sup>a</sup> , град.	Угол элонгации <sup>a</sup> , град.	$e^a$	$a^a$	Семейство <sup>b</sup>
19 Fortuna (Фортуна)	200 <sup>a</sup> , 223,07 <sup>b</sup>	G <sup>1</sup> , Ch <sup>2</sup>	0,04 <sup>a</sup> , 0,05 <sup>b</sup>	7,44	28,45–28,46	90,68–90,70	0,16	2,44	—
24 THEMIS (ФЕМИДА)	198 <sup>a</sup> , 202,25 <sup>b</sup>	C <sup>1</sup> , B <sup>2</sup>	0,07 <sup>a</sup> , 0,06 <sup>b</sup>	8,37	19,45–21,36	91,22–111,20	0,12	3,15	Themis (Фемида)
51 Nemausa (Немауза)	136,16 <sup>a</sup> , 147,31 <sup>b</sup>	CU <sup>1</sup> , Ch <sup>2</sup>	0,10 <sup>a</sup> , 0,06 <sup>b</sup>	7,78	9,23–11,26	150,72–156,29	0,07	2,37	—
52 Europa (Европа)	303,92 <sup>a</sup> , 292,89 <sup>b</sup>	CF <sup>1</sup> , C <sup>2</sup>	0,06	5,63	9,04–9,05	153,79–153,80	0,11	3,09	Hugiea (Гигея)
65 CYBELE (КИБЕЛА)	237,26 <sup>a</sup>	P <sup>1</sup> , Xc <sup>2</sup>	0,07 <sup>a</sup> , 0,05 <sup>b</sup>	6,08	9,12	145,21–145,22	0,12	3,43	Cybele (Кибела)
145 ADEONA (АДЕОНА)	127,78 <sup>a</sup> , 150,95 <sup>b</sup>	C <sup>1</sup> , Ch <sup>2</sup>	0,06 <sup>a</sup> , 0,05 <sup>b</sup>	15,07	10,14–25,81	55,03–154,20	0,15	2,67	Adeona (Адеона)
164 EVA (ЕВА)	100,25 <sup>a</sup> , 73,03 <sup>b</sup>	C <sup>1</sup> , Ch <sup>2</sup>	0,06 <sup>a</sup> , 0,05 <sup>b</sup>	15,07	10,14–25,81	55,03–154,20	0,15	2,67	Adeona (Адеона)
177 IRMA (ИРМА)	69,05 <sup>a</sup> , 73,10 <sup>b</sup>	C <sup>1</sup> , Ch <sup>2</sup>	0,02 <sup>a</sup> , 0,04 <sup>b</sup>	13,86	14,44–14,45	146,03–146,06	0,23	2,77	—
203 POMPEJA (ПОМПЕЯ)	124,59 <sup>a</sup> , 116,01 <sup>b</sup>	DCX <sup>1</sup>	0,04	24,05	2,17	174,25–174,27	0,06	2,74	—
250 Bettina (Беттина)	121,00 <sup>a</sup> , 79,27 <sup>b</sup>	M <sup>1</sup> , Xk <sup>2</sup>	0,11 <sup>a</sup> , 0,23 <sup>b</sup>	5,05	6,50–19,23	103,88–161,54	0,14	3,14	—
266 Aline (Алина)	109,49 <sup>a</sup> , 108,84 <sup>b</sup>	C <sup>1</sup> , Ch <sup>2</sup>	0,03 <sup>a</sup> , 0,06 <sup>b</sup>	13,02	10,46–10,48	153,27–153,32	0,15	2,81	—
302 CLARISSA (КЛАРИССА)	38,53 <sup>a</sup> , 42,99 <sup>b</sup>	F <sup>1</sup>	0,05 <sup>a</sup> , 0,04 <sup>b</sup>	14,38	117,22	139,45–139,46	0,11	2,41	Clarissa (Кларисса)
322 PHAEO (ФЕО)	69,86 <sup>a</sup> , 73,14 <sup>b</sup>	X <sup>1</sup> , X <sup>2</sup> , D <sup>2</sup> [69]	0,09 <sup>a</sup> , 0,08 <sup>b</sup>	17,58	7,22	162,54	0,24	2,78	Phaео (Фео)
360 CARLOVA (КАРЛОВА)	129,13 <sup>a</sup> , 115,62 <sup>b</sup>	C <sup>1</sup> , C <sup>2</sup>	0,04 <sup>a</sup> , 0,05 <sup>b</sup>	6,18	17,43	116,13–116,14	0,17	3,01	—
379 Huenna (Гуенна)	84,787 <sup>a</sup> , 87,34 <sup>b</sup>	B <sup>1</sup> , P <sup>1</sup> [70], C <sup>2</sup>	0,05 <sup>a</sup> , 0,06 <sup>b</sup>	14,14	9,97–9,98	150,20–150,24	0,18	3,14	Themis (Фемида)
383 JANINA (ЯНИНА)	43,48 <sup>a</sup> , 45,39 <sup>b</sup>	B <sup>1</sup> , B <sup>2</sup>	0,04 <sup>a</sup> , 0,08 <sup>b</sup>	6,43	13,32–13,35	142,20–142,29	0,17	3,14	Themis (Фемида)
424 Gratia (Грация)	102,57 <sup>a</sup> , 87,22 <sup>b</sup>	X <sup>1</sup> , [71], Xc <sup>2</sup> [71]	0,03	20,06	3,43–15,55	134,69–170,78	0,11	2,77	—
435 Ella (Элла)	34,79 <sup>a</sup> , 41,34 <sup>b</sup>	DCX <sup>1</sup>	0,12 <sup>a</sup> , 0,06 <sup>b</sup>	4,63	11,51	153,04–153,05	0,15	2,45	Ella (Элла) [72]
449 HAMBURGA (ГАМБУРГА)	85,59 <sup>a</sup> , 87,16 <sup>b</sup>	C <sup>1</sup>	0,04	36,52	24,58–27,79	99,34–117,99	0,17	2,55	—
629 Bernardina (Бернардина)	35,09 <sup>a</sup> , 29,97 <sup>b</sup>	X <sup>2</sup>	0,14 <sup>a</sup> , 0,18 <sup>b</sup>	3,76	3,57–8,62	156,27–170,34	0,16	3,13	—
690 WRATISLAVIA (ВРАТИСЛАВИЯ)	134,65 <sup>a</sup> , 134,42 <sup>b</sup>	CPF <sup>1</sup> , B <sup>1</sup> [71], B <sup>2</sup> [71]	0,06 <sup>a</sup> , 0,07 <sup>b</sup>	8,64	8,56	155,24	0,18	3,15	—
704 INTERAMNIA (ИНТЕРАМНИЯ)	306,31 <sup>a</sup> , 316,46 <sup>b</sup>	F <sup>1</sup> , B <sup>2</sup>	0,08 <sup>a</sup> , 0,05 <sup>b</sup>	8,73	13,68–22,69	86,55–142,36	0,16	3,06	Interamnia (Интерамния)
750 OSKAR (ОСКАР)	22,53 <sup>a</sup> , 20,51 <sup>b</sup>	F <sup>1</sup> , C <sup>1</sup> [73]	0,06 <sup>a</sup> , 0,05 <sup>b</sup>	6,26	13,20–13,21	148,88–148,90	0,13	2,44	Nysa-Polana (Ниса-Пулана)
751 Faína (Фаина)	113,70 <sup>a</sup> , 110,18 <sup>b</sup>	C <sup>1</sup> , Ch <sup>2</sup>	0,03 <sup>a</sup> , 0,04 <sup>b</sup>	23,68	14,80–17,10	132,82–138,27	0,15	2,55	Faína (Фаина) [74]
757 Portlandia (Портлендия)	32,89	XF <sup>1</sup> , F <sup>1</sup> [75], Xk <sup>2</sup>	0,22 <sup>a</sup> , 0,16 <sup>b</sup>	6,58	17,10–19,50	131,63–138,64	0,11	2,37	Athor (Атхор) [76]
762 Pulcova (Пулкова)	147,34 <sup>a</sup> , 136,88 <sup>b</sup>	F <sup>1</sup> , C <sup>1</sup> [71], Cb <sup>2</sup> [71]	0,04	5,84	11,15–16,51	125,75–145,87	0,11	3,15	—
778 Theobalda (Теобальда)	55,32 <sup>a</sup> , 63,88 <sup>b</sup>	F <sup>1</sup>	0,08 <sup>a</sup> , 0,05 <sup>b</sup>	11,66	14,82–17,26	134,51–141,23	0,26	3,18	Theobalda (Теобальда)

Таблица. Окончание

Номер и название	Диаметр (эффективный), км	Класс <sup>a</sup>	Геометр. альbedo	Период вращения <sup>a</sup> , ч	Фазовый угол <sup>a</sup> , град.	Угол элонгации <sup>a</sup> , град.	$e^a$	$a^a$	Семейство <sup>b</sup>
<b>779</b> NINA (НИНА)	80,57 <sup>a</sup> , 77,45 <sup>b</sup>	X <sup>2</sup> , M [77]	0,16 <sup>a</sup> , 0,17 <sup>b</sup>	11,19	8,55–26,23	114,64–157,15	0,23	2,66	—
859 Bouzaréah (Бузареа)	65,42 <sup>a</sup> , 73,90 <sup>b</sup>	C <sup>1</sup> [71], X <sup>2</sup> [71]	0,03 <sup>a</sup> , 0,04 <sup>b</sup>	23,20	11,31–11,89	140,37–142,05	0,11	3,23	—
<b>1121</b> Natascha (Наташа)	12,86 <sup>a</sup> , 12,41 <sup>b</sup>	—	0,29 <sup>a</sup> , 0,27 <sup>b</sup>	13,20	7,34–12,99	148,49–163,09	0,16	2,55	Astraea (Астрея)
<b>1474</b> BEIRA (БЕЙРА)	9,71 <sup>b</sup>	FX <sup>1</sup> , B <sup>2</sup>	0,20 <sup>b</sup>	4,18	23,58–23,97	140,80–141,41	0,49	2,73	—
<b>1687</b> Glarona (Гларона)	37,85 <sup>a</sup> , 33,66 <sup>b</sup>	—	0,14 <sup>a</sup> , 0,08 <sup>b</sup>	6,50	0,94–3,82	168,84–177,33	0,17	3,16	Themis (Фемида)

*Примечание.* Названия выделены заглавным шрифтом у активных астероидов (их всего 16), у которых нами обнаружена СПА и признаки ПЭ. Объекты, у которых только номера выделены жирным шрифтом, имеют повышенное геометрическое альbedo ( $> 0,10$ ), что характеризует их как частично высокотемпературные.

*Условные обозначения.* Источник информации отмечен надстрочными буквами:

<sup>a</sup> <https://ssd.jpl.nasa.gov/>,

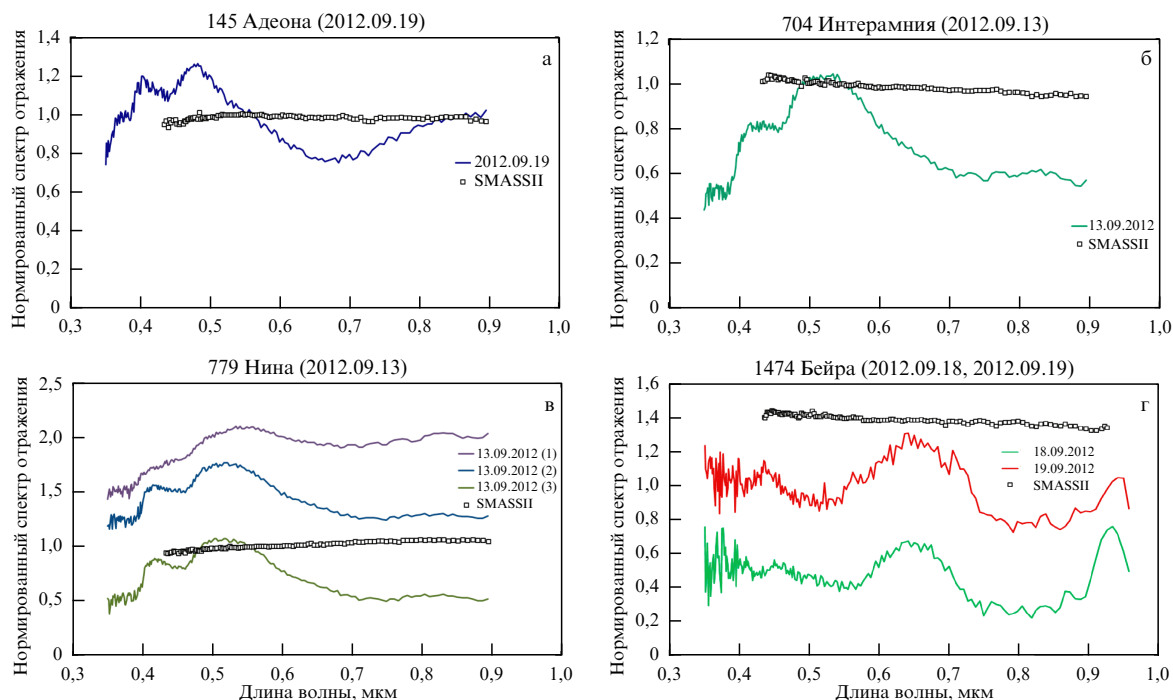
<sup>b</sup> <https://www.minorplanet.info/>,

<sup>c</sup> <https://sbnarchive.psi.edu/ferret/>.

В случае совпадения данных их источник не указывается. По умолчанию в качестве основного источника берутся значения с сайта JPL NASA. Классификация отмечена надстрочными цифрами:

<sup>1</sup> согласно классификации Толена (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>);

<sup>2</sup> согласно классификации SMASS II (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>).



**Рис. 5.** Нормированные (на длине волны 0,55 мкм здесь и далее) спектры отражения, полученные в сентябре 2012 г. при активном состоянии астероидов (а) 145 Адеоны, (б) 704 Интерамнии, (в) 779 Нины, (г) 1474 Бейры (разноцветные кривые), и ранее измеренные спектры этих же астероидов в неактивном состоянии (почти прямолинейные кривые чёрного цвета из базы данных SMASS II) [1].

ваны с помощью численного моделирования рассеяния света в пылевой экзосфере, подробности которого обсуждаются в разделе 2.2.

С помощью недавних астрометрических и небесно-механических исследований было установлено, что 145 Адеона возглавляет одно из самых крупных семейств астероидов (6279 членов) с близкими параметрами орбит [82, 83], которые могут иметь и близкие хи-

мико-минералогические свойства, включая подповерхностные залежи водяного льда.

Необходимо обратить внимание на ещё одну важную особенность СПА активных астероидов примитивных типов — феномен их квазиодновременной активности (с учётом небольшой разницы времени наблюдений). Её можно объяснить тем, что эти астероиды должны иметь некие общие свойства, облегчающие их переход в актив-

ное состояние под влиянием внешних факторов. Основным из таких факторов может быть высокая подсолнечная температура их поверхности при прохождении вблизи перигелия, поскольку указанные астероиды во время наблюдений были на небольших перигелийных расстояниях (кроме Адеоны, которая в это время была на расстоянии около 1 а.е. от перигелия) [1]. Учитывая возможность образования астероидов примитивных типов вблизи или за границей конденсации водяного льда, мы предположили, что общим свойством, вызвавшим одновременную СПА астероидов, является наличие водяного льда в составе их вещества в количествах, достаточных для образования временной ПЭ. Весьма вероятно, что такой процесс начинается на всех астероидах, в недрах которых сохранился водяной лёд, при возникновении у них поверхностных ледяных обнажений, вызванных недавними ударными событиями. Это подтверждается данными, полученными с помощью спутника IRAS (InfraRed Astronomical Satellite), согласно которым существует не менее трёх пылевых поясов, гравитационно связанных с ГПА, что может служить признаком высокой частоты взаимных столкновений тел разного размера (см., например, [84]). Хотя наиболее мелкие частицы (примерно от одного до нескольких сотен микрон) сравнительно быстро удаляются из ГПА благодаря эффектам радиационного давления и Пойнтинга–Робертсона [85], достаточно высокая концентрация раздробленного и пылевого материала там поддерживается за счёт новых каскадных столкновений [86]. Более подробно данная проблема будет рассмотрена в разделе 3.

В 2016–2019 гг. при следующем прохождении 145 Адеоны, 704 Интрамнии и 779 Нины вблизи перигелия (их периоды обращения вокруг Солнца составляют от ~ 4 до 6 лет) мы вновь наблюдали СПА указанных астероидов с помощью спектрофотометрии и UBVR-фотометрии в разных обсерваториях, а в 2016 г. была впервые обнаружена СПА вблизи перигелия у астероида 65 Кибела, спектральный класс которого оценивается как Р и Хс [3]. Хотя было получено всего 2 спектра отражения Кибелы вблизи перигелия (рис. 6) на достаточно коротком интервале времени (около 10 мин), но их значительные изменения при хороших фотометрических условиях по сравнению со спектром этого астероида из базы данных SMASS II свидетельствуют о наличии СПА. Хотя для более уверенных выводов, очевидно, необходимо больше наблюдательных данных, активность Кибелы подтверждается результатами наблюдений в ближнем ИК-диапазоне: в её спектрах отражения вблизи 3 мкм обнаружены диагностические полосы поглощения водяного льда и органики [87], что, вероятно, обусловлено их наличием на поверхности астероида.

По результатам следующей серии UBVR-наблюдений в марте–апреле 2019 г. нами впервые была обнаружена одновременная СПА астероидов 24 Фемиды и 449 Гамбург и в третий раз — 704 Интрамнии, когда они находились вблизи перигелия [67]. Но при этом по спектрам отражения астероидов было впервые зарегистрировано прохождение ударных волн в солнечном ветре, вызванных, как мы полагаем, корональными выбросами вещества на Солнце. Некоторые различия гелиоцентрических расстояний обсуждаемых астероидов во время их наблюдений указывают на то, что была не одна волна, а как минимум две последовательные волны

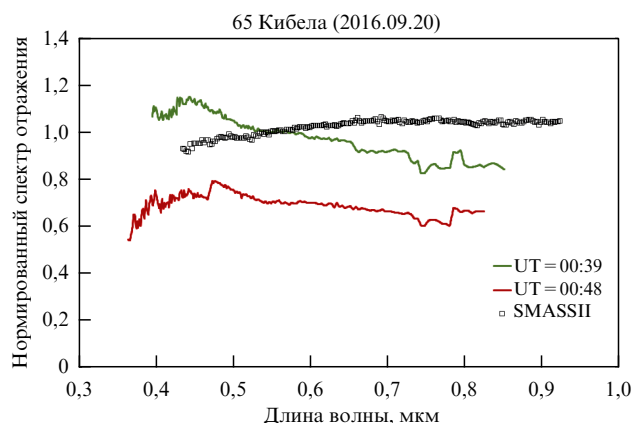
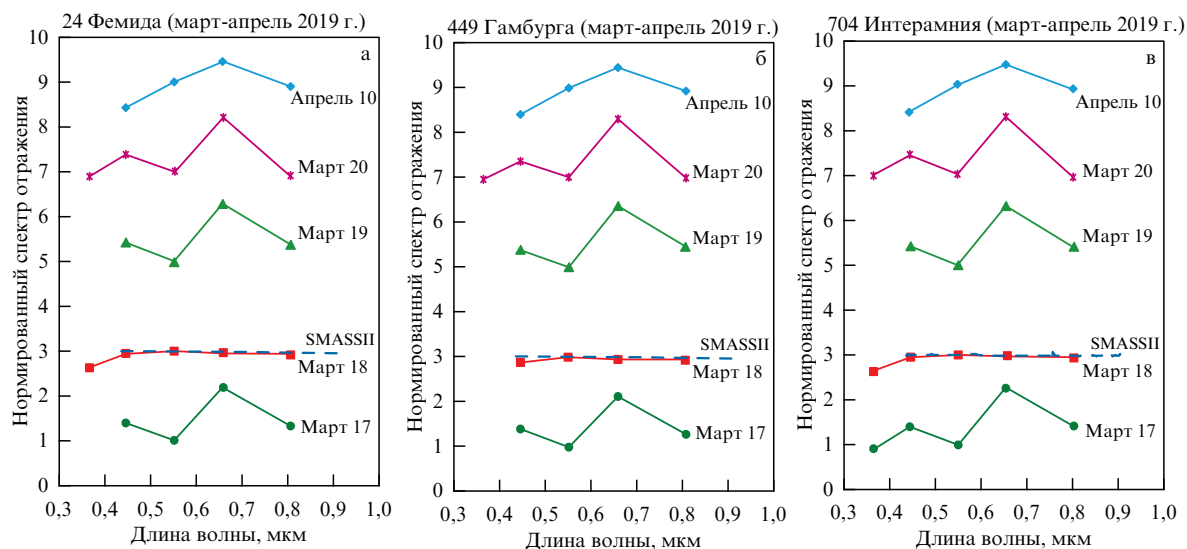


Рис. 6. Нормированные спектры отражения 65 Кибелы в активном состоянии, полученные в 2016 г. с интервалом времени около 10 минут (цветные линии). Резкое изменение формы спектра отражения астероида может быть объяснено рассеянием отражённого от астероида света в нерегулярной ПЭ, состоящей преимущественно из частиц водяного льда субмикронных размеров (см. раздел 2.2). Для сравнения приведён нормированный спектр отражения этого астероида без признаков активности из базы данных SMASS II.

с интервалом времени около суток. Продолжим более подробное обсуждение обстоятельств данных наблюдений в разделе 2.3.

По UBVR-данным 24 Фемиды, 449 Гамбург и 704 Интрамнии были рассчитаны значения их отражательной способности на соответствующих эффективных длинах волн фотометрических полос (0,36 мкм, 0,44 мкм, 0,55 мкм, 0,64 мкм и 0,80 мкм), а затем построены их аппроксимированные спектры отражения (в виде ломаных кривых, показанных разными цветами) в диапазоне 0,36–0,80 мкм (рис. 7а–в) [67]. Отсутствие данных в полосе U 17 и 19 марта и 10 апреля на представленных характеристиках астероидов связано с высоким уровнем фона в этой полосе и низким уровнем сигнала. "Двугорбая" или "одногоорбая" (10 апреля 2019 г.) форма аппроксимированных спектров отражения наблюдаемых астероидов, как и форма спектров четырёх активных астероидов в сентябре 2012 г., не соответствует их поверхностному веществу, а является признаком наличия ПЭ. Последнее также подтверждается совпадением представленных аппроксимированных спектров отражения 24 Фемиды и 449 Гамбург с аналогичными характеристиками наблюдавшейся вместе с ними 704 Интрамнии, активность которой у перигелия была обнаружена и подтверждена раньше [1, 3].

Необычным явлением, которое мы наблюдали 18 марта 2019 г., стало одновременное исчезновение "двугорбой" формы аппроксимированных спектров отражения 24 Фемиды, 449 Гамбург и 704 Интрамнии как признака наличия ПЭ. Форма спектров сменилась на обычную, характерную для твёрдой поверхности астероидов (что также подтвердилось совпадением спектров, наблюдаемых 18 марта, с "каноническими" спектрами из базы данных SMASS II (рис. 7а–в). Но форма спектров отражения, указывающая на активность астероидов, восстановилась уже 19 марта 2019 г. Данное событие можно объяснить тем, что ПЭ была удалена с подсолнечной стороны рассматриваемых астероидов близкими по времени ударными волнами в солнечном ветре, достигшими их непосредственно перед наблюдениями 18 марта. С



**Рис. 7.** Нормированные аппроксимированные спектры отражения (а) 24 Фемиды, (б) 449 Гамбург и (в) 704 Интерамнии получены по фотометрическим данным UBVRI за 17–20 марта и 10 апреля 2019 года, когда астероиды были в состоянии активности и находились очень близко к перигелию [67]. Спектры нормированы к значению на 0,55 мкм и произвольно сдвинуты вдоль вертикальной оси для удобства сравнения. Спектры отражения, измеренные 18 марта, соответствуют поверхности этих астероидов и следуют их "каноническим" спектрам отражения из базы данных SMASS II.

учёт некоторой разницы гелиоцентрических расстояний Фемиды и Интерамнии и более близкой к Солнцу 449 Гамбург можно предполагать, что таких волн было несколько. Вернёмся к более детальному анализу этого события в разделе 2.3.

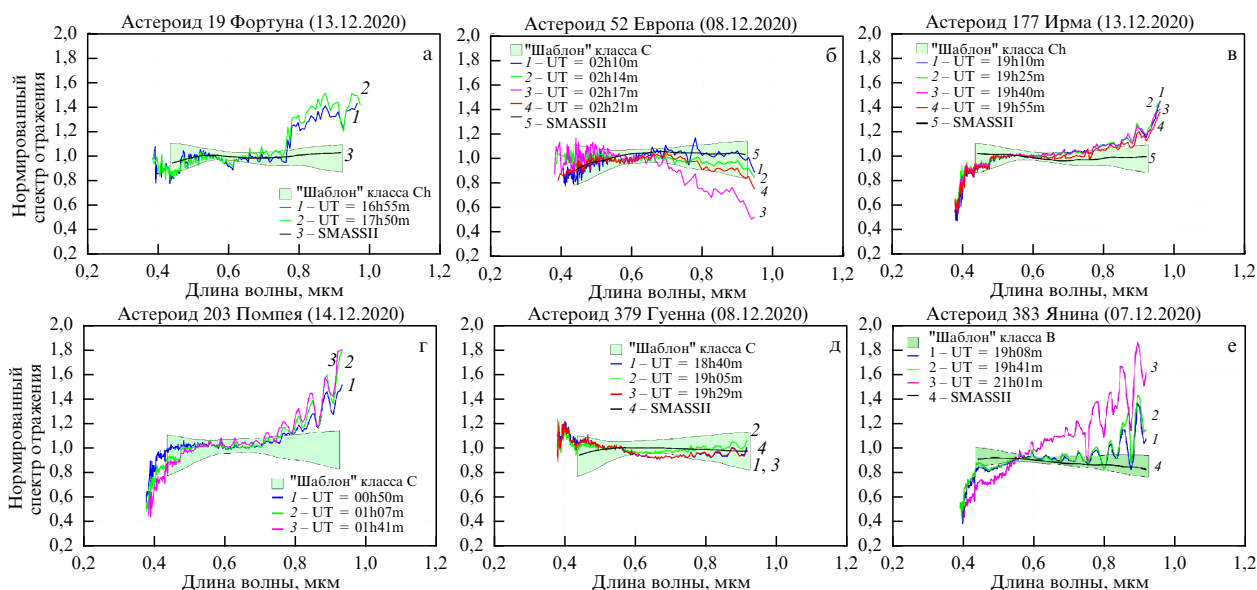
Кратко обсудим другую важную информацию о 24 Фемиде. С помощью наземных ИК-наблюдений вблизи полосы поглощения около 3 мкм на поверхности Фемиды были обнаружены водяной лёд и органические соединения, а также показано, что они являются на поверхности преобладающими [23, 88]. А по данным японского ИК-спутника AKARI на Фемиде выявлено наличие гидратированных минералов [89]. Ещё в одной публикации о 24 Фемиде и 1 Церере приведены результаты оценки темпа сублимации водяного льда по эмиссионной линии [O I] 6300 Å, составляющие соответственно (как верхние пределы)  $4,5 \times 10^{27}$  и  $4,6 \times 10^{28}$  молекул в секунду [90]. Хотя Фемиды в пять раз меньше Цереры, выброс газообразной  $H_2O$  при сублимации льда с поверхности указанных тел оказался сопоставим. Приведённые приближённые оценки соответствуют очень малой части активной поверхности обсуждаемых астероидов (менее  $2 \times 10^{-4}$ ), но авторы допускают, что эта относительная величина может меняться на порядок в зависимости от теплопроводящих свойств поверхности. Также подчёркивается, что ядра комет имеют значительно большие по размеру активные области — от десятых до сотых долей площади поверхности [90].

Необходимо отметить, что 24 Фемиды, как и 145 Адеона, возглавляет одно из самых крупных семейств астероидов (12288 членов) [82, 83], которые могут иметь близкие химико-минералогические свойства с учётом их предполагаемого общего происхождения. Высказаны предложения (см., например, [91]) о необходимости наземных и космических исследований 24 Фемиды, вероятно, представляющей собой ледяное ядро некоторого родительского тела, из которого могло сформироваться всё её семейство. Если дело обстоит действительно так, то

преобладающая часть астероидов, входящих в состав семейства Фемиды, имеют каменно-ледяной состав. Но, несмотря на признаки значительных залежей водяного льда в недрах самой Фемиды, это нельзя с уверенностью отнести к другим членам данного семейства, особенно небольших размеров, если придерживаться гипотезы об их общем ударном происхождении.

В декабре 2020 г. нами были проведены спектрофотометрические наблюдения шести астероидов Главного пояса примитивных типов: 19 Fortuna (Фортуна), 52 Europa (Европа), 177 Irma (Ирма), 203 Pompeja (Помпея), 379 Huenna (Гуенна) и 383 Janina (Янина) (см. таблицу), имеющих значительные эксцентриситеты орбит и находившихся вблизи перигелийных расстояний [92]. Целью этих исследований было определение влияния на спектры отражения астероидов не только максимальных подсолнечных температур, но и последних событий солнечной активности. Согласно данным, полученным со спутников GOES-16 и SOHO, перечисленные астероиды в конце ноября 2020 г., в период общей низкой солнечной активности, определяющей достаточно спокойное состояние межпланетной среды, примерно за 10 дней до начала наших наблюдений оказались под влиянием значительной солнечной вспышки класса M–X в рентгеновском диапазоне и связанного с ней выброса корональной массы (Coronal Mass Ejection — CME) вблизи экваториальной плоскости Солнца.

Для обнаружения признаков активности указанных астероидов мы сравнили их нормированные спектры отражения в диапазоне  $\sim 0,36–0,95$  мкм с так называемыми шаблонами (двумерными областями  $r-\lambda$ , построенными на поле зависимости относительной отражательной способности астероида  $r$  от длины волны  $\lambda$  по всем возможным изменениям нормированных спектров отражения астероидов соответствующих спектральных типов в неактивном состоянии по базам данных [78] и [79]). На графиках со спектрами отражения астероидов на рис. 8а–е такие области закрашены светло-зелёным цве-



**Рис. 8.** Нормированные спектры отражения активных астероидов (а) 19 Фортуны, (б) 52 Европы, (в) 177 Ирмы, (г) 203 Помпеи, (д) 379 Гуенны и (е) 383 Янины, полученные последовательно 7–14 декабря 2020 г. "Шаблоны" их таксономических типов показаны областями светло-зелёного цвета. На фоне "шаблонов" изображены по несколько последовательных разноцветных спектров отражения каждого астероида и жирной чёрной линией их "канонические" нормированные спектры отражения без признаков активности из базы данных SMASS II; спектра отражения астероида 203 Помпея в этой базе данных нет.

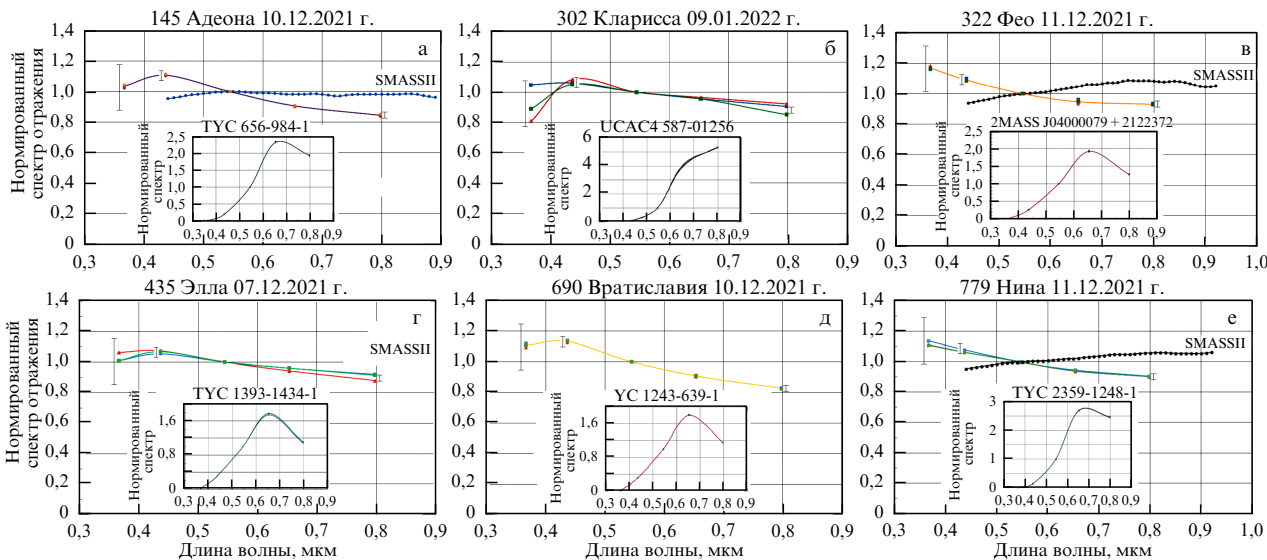
том. На спектрах отражения этих астероидов были обнаружены заметные, а в некоторых случаях скачкообразные отклонения, выходящие за границы указанных "шаблонов" (например, у 19 Фортуны, рис. 8а) при отсутствии заметных изменений спектральной прозрачности земной атмосферы во время наблюдений [92]. Такие особенности можно интерпретировать как проявления подвижной, но нерегулярной ПЭ или даже как образование у астероидов отдельных пылевых выбросов под влиянием волн в солнечном ветре. Возможно, что активность этих астероидов была недостаточно сильной для формирования более устойчивой временной ПЭ со спектральными особенностями в виде упоминавшихся одного или двух максимумов в видимом диапазоне. Похожая на СПА спектральная особенность, но сравнительно слабая, была обнаружена только в коротковолновой части спектра отражения 379 Гуенны (рис. 8д). В то же время в спектрах отражения 177 Ирмы, 203 Помпеи и 383 Янины были обнаружены необычные регулярные структуры в виде "гребёнки", которые обсудим в разделе 2.3, посвящённом влиянию на активные астероиды указанных солнечных событий.

С декабря 2021 г. по февраль 2022 г., а также с декабря 2022 г. по март 2023 г. в Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ на 0,6-м полуавтоматическом телескопе RC600 мы провели по единой методике два UVBRI-обзора доступных для наблюдений астероидов Главного пояса с целью поиска среди них активных объектов. Наблюдения охватывали астероиды преимущественно примитивных типов, находившиеся вблизи перигелийных расстояний [68, 93]. В первом из этих обзоров были получены данные о 29 астероидах, а во втором — о 65. Вместе с астероидами мы наблюдали непременные звёзды солнечного типа (при минимальной разнице по координатам) для последующего расчёта аппроксимированных спектров отражения астероидов в

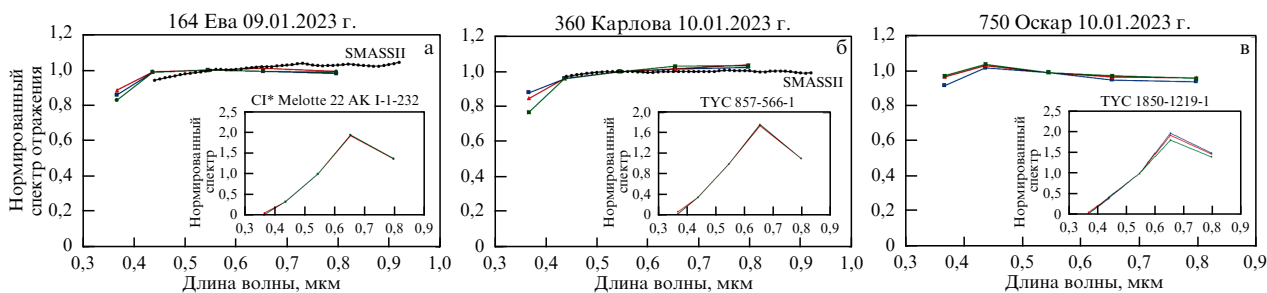
диапазоне 0,36–0,80 мкм на эффективных длинах волн пяти фотометрических полос. Следует отметить, что в число используемых звёзд G-типа были включены только такие, показатель цвета которых  $U - V$  был достаточно близок к данному параметру у Солнца. Как будет показано далее с помощью моделирования спектров отражения условного активного астероида C-типа (в разделе 2.2), точность измерения наклона спектра отражения наблюдаемого астероида в коротковолновой части диапазона имеет критически важное значение при идентификации у него признаков активности.

Ещё одним методически новым решением при получении наблюдательных данных об активных астероидах, наряду с применением широкополосной UVBRI-фотометрии, стало использование в нашем анализе непременных контрольных звёзд, находящихся на тех же ПЗС-кадрах, что и астероиды, для контроля спектральной стабильности экстинкции атмосферы в моменты их наблюдений. С помощью расчёта и сравнения между собой последовательных аппроксимированных спектров астероидов и контрольных звёзд (см. вставки со спектрами звёзд на графиках рис. 9) такой контроль можно осуществлять на качественном и количественном уровнях. По совпадению на качественном уровне трёх последовательных спектров у контрольной звезды видно, что атмосферные вариации пренебрежимо малы во всём диапазоне. В то же время несколько последовательных (серийных) спектров отражения активных астероидов заметно отличаются, особенно в коротковолновой части спектров.

Основным результатом обзора 2021–2022 гг. является обнаружение значительных спектральных признаков 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 составило  $\sim 24\%$  от общего числа тел,



**Рис. 9.** Нормированные аппроксимированные спектры отражения астероидов с признаками СПА: (а) 145 Адеоны, (б) 302 Клариссы, (в) 322 Фею, (г) 435 Эллы, (д) 690 Вратиславии и (е) 779 Нины. На графиках 145 Адеоны, 322 Фею и 779 Нины для сравнения приведены нормированные спектры отражения этих астероидов из базы данных SMASS II. На вставках графиков приведены спектры переменных звёзд, которые наблюдались одновременно с астероидами. Предельные погрешности измерений (полученные при расчёте FWHM полос системы UBVRi) приведены для фотометрических полос U, V и I. Для полос V и R они составляли менее 1% и поэтому не показаны.



**Рис. 10.** Нормированные аппроксимированные спектры отражения астероидов с признаками СПА: (а) 164 Евы, (б) 360 Карловы и (в) 750 Оскара по сравнению с нормированными спектрами переменных контрольных звёзд (на вставках), наблюдавшихся одновременно с астероидами. Спектры отражения 164 Евы и 360 Карловы также сравниваются с их "каноническими" спектрами отражения из базы данных SMASS II.

включённых в данную наблюдательную программу. В качестве примеров на рис. 9 приведены спектры отражения перечисленных астероидов. Возможные спектральные проявления активности с меньшей интенсивностью были впервые обнаружены ещё у 5 астероидов (424 Gratia (Грация), 751 Faina (Фаина), 762 Pulcova (Пулкова), 778 Theobalda (Теобальда) и 859 Bouzaréah (Бузареа)), и они были отнесены к категории подозреваемых в активности (см. таблицу). Важно отметить, что сублимационно-пылевая активность 145 Адеоны и 779 Нины вблизи перигелия была нами зарегистрирована уже в третий раз на протяжении последних 10 лет, что соответствует примерно трём периодам обращения их вокруг Солнца. Но проблема продолжительности СПА вблизи перигелия обсуждаемых астероидов (как и 704 Интерамнии, СПА которой была уже неоднократно подтверждена) пока остаётся малоизученной. Безусловно, это будет входить в перечень задач наших дальнейших исследований.

Хотя обзорные UBVRi-наблюдения 2022–2023 гг. охватывали примерно вдвое больше объектов ГПА по сравнению с предыдущим обзором, их главным ре-

зультатом стало обнаружение признаков СПА всего у трёх астероидов низкоальбедных типов (рис. 10): 164 Евы, 360 Карловы и 750 Оскара; ещё у четырёх астероидов: 629 Бернардины, 757 Портлендии, 1121 Наташи и 1687 Глароны — такие признаки неявные и вызваны, вероятно, другим механизмом. Однако в этих наблюдениях нам удалось получить дополнительную важную информацию [93]. По сравнению с предыдущим обзором среди наблюдавшихся астероидов ГПА оказалось значительно больше тел с комбинированными спектральными типами, а также тел меньших размеров (с наименьшими эффективными диаметрами до ~ 8 км), что, как можно предполагать, является следствием их более значительной ударной переработки за всё время существования. Два упомянутых факта, взятые вместе или по отдельности, можно рассматривать как свидетельства того, что в недрах таких астероидов условия могут быть более неблагоприятными для выживания водяного льда в космогоническом масштабе времени и, соответственно, для потенциальной возможности его сублимации в настоящее время.

Для интерпретации измеренных спектров отражения активных астероидов было выполнено численное моделирование рассеяния света в экзосфере условного астероида. Результаты расчётов изложены в разделе 2.2; в том числе показано, что измерения в ближнем и среднем УФ-диапазоне наиболее перспективны для идентификации СПА астероидов примитивных типов и водяного льда, как её основного источника.

Ещё одним важным вопросом является причина вариаций спектров отражения активных астероидов, обладающих разреженной и подвижной ПЭ. В тех областях используемого при наблюдениях спектрального диапазона, где рассеяние на экзосферных частицах разных размеров или состава приводит к различному поведению спектра, в подвижной ПЭ возможны более частые спектральные колебания под влиянием высокочастотных колебаний в солнечном ветре. Находясь под влиянием значительного электростатического поля фотоэмиссионной природы на подсолнечной стороне астероида (см., например, [94]), мельчайшие пылевые частицы независимо от механизма их выброса с поверхности приобретают электрический заряд ([93] и ссылки там) и подвергаются влиянию частых и нерегулярных волн плотности в солнечном ветре [95–97]. С другой стороны, у астероидов примитивных типов сама ПЭ может быть неоднородной, поскольку формируется, как правило, из газопылевого потока, выходящего из локального облажения водяного льда, которое возникает при метеороидном ударе. В то же время осевое вращение активного астероида должно постепенно приводить к более равномерному распределению ПЭ вдоль его поверхности, особенно при отсутствии значительных ударных волн в солнечном ветре.

Таким образом, более тщательное изучение полученных спектров отражения активных астероидов примитивных типов со слабыми проявлениями активности привело нас к выводу о необходимости разработки специального количественного критерия, который бы позволял (при его определённых значениях) более обоснованно утверждать именно о СПА конкретного астероида, а не о другом механизме его пылевой активности. На качественном уровне понятно, что такой критерий может быть основан на использовании информации о величине спектральных вариаций спектров отражения активных астероидов в более узких спектральных областях рабочего диапазона, где, согласно численному моделированию, спектральные характеристики ледяных и других частиц ПЭ расходятся более всего, что приводит к наибольшей амплитуде короткопериодических вариаций в интенсивности регистрируемого светового потока. Исходя из этого представления мы сравнили среднеквадратичные ошибки в интенсивности светового потока, регистрируемого в полосе  $U$  от активного астероида  $\Delta I_{\text{аст.}}$  и неперемещенной контрольной звезды  $\Delta I_{\text{к.зв.}}$ , и пришли к выводу о слабой СПА астероидов 164 Еввы, 360 Карловы и 750 Оскара (на основании положительного значения указанной разности, а также при отношении "сигнал/шум" астероида не менее нескольких десятков) [98].

## 2.2. Численное моделирование рассеяния света в пылевой экзосфере и свойства её частиц

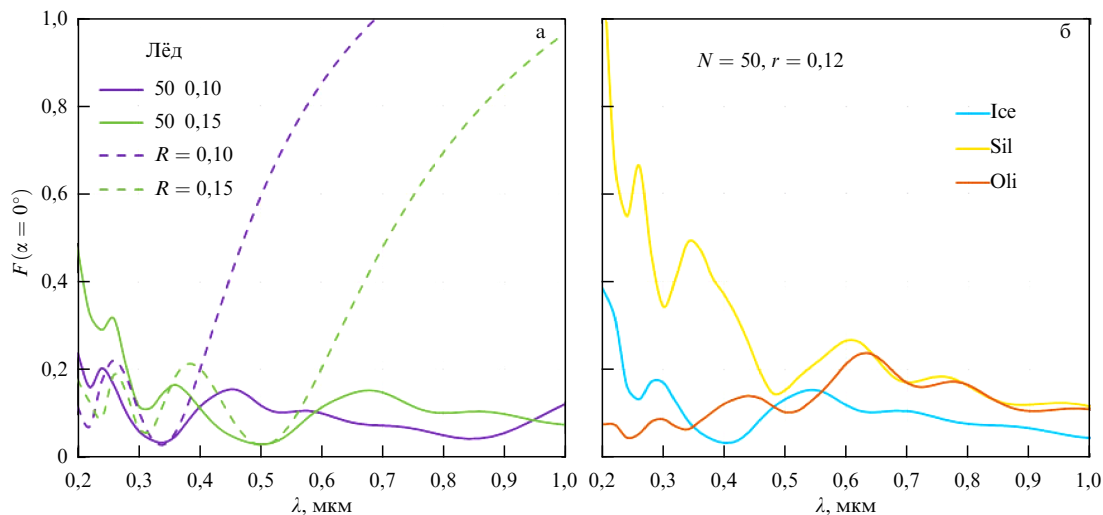
**2.2.1. Вводные замечания.** Для того чтобы понять, каким образом экзосфера, образовавшаяся вокруг астероида, может изменить его спектр отражения, необходимо

определить, как ведут себя в зависимости от длины волны характеристики рассеяния частиц экзосферы — фазовая функция (индикатриса), альbedo однократного рассеяния и эффективность рассеяния. Расчёты перечисленных характеристик основаны на предположении, что частицы пыли в экзосфере сходны с найденными в межпланетном пространстве и в комах и хвостах комет (см., например, [99–102]). Среди них есть как плотно упакованные твёрдые частицы размером в десятки и сотые доли микрона, так и более крупные частицы агрегатной структуры, состоящие из субмикронных зёрен, размеры которых несколько меньше или сравнимы с длиной волны видимого света. О сложной морфологии частиц кометной пыли говорят и результаты анализа поляриметрии комет, согласно которым параметр размера зёрен в агрегатных частицах кометной пыли  $x \equiv 2\pi r/\lambda$  (где  $r$  — радиус составляющих зёрен и  $\lambda$  — длина волны) находится примерно в интервале от 1,0 до 2,0 (см., например, [103–107] и ссылки там). При таком соотношении между длиной световой волны и размерами рассеивателей усиление коллективных эффектов в процессе рассеяния ансамблями частиц оказывает существенное влияние на интенсивность и поляризацию рассеянного агрегатом света, в результате чего поведение указанных характеристик для частиц сложной структуры и однородных частиц таких же размеров и состава заметно отличается. Это, в свою очередь, делает необходимым учёт агрегатной структуры рассеивающих частиц в модельных расчётах при интерпретации измерений (см., например, [105, 108–112] и ссылки там).

Результаты исследования характеристик рассеяния однородных частиц в зависимости от длины волны, размеров и показателя преломления широко представлены в литературе (см., например, [113, 114]). В частности, важно, что если параметр размеров менее  $\sim 3$ , то интенсивность рассеянного такими частицами света заметно растёт с уменьшением длины волны (при спектрально нейтральном коэффициенте поглощения вещества) и характеристики рассеяния частиц неправильной формы можно рассчитывать в приближении Лоренца–Ми для сферических частиц.

Что касается характеристик рассеяния агрегатных частиц, то данных об их спектральной зависимости гораздо меньше. В основном они касаются либо ИК-диапазона, либо интегральных характеристик — сечений рассеяния и экстинкции (см., например, [115]). В то же время известно, что угловая зависимость интенсивности рассеянного света также чувствительна к морфологии рассеивающих частиц (см. ссылки выше). Проявление коллективных эффектов в спектре интенсивности видимого света, рассеянного в обратном направлении агрегатными структурами, состоящими из субмикронных зёрен, было недавно исследовано в работе [116]. Было показано, что в таком спектре формируются интерференционные детали, обусловленные как рассеянием на отдельных составляющих агрегата, так и на их группах.

Поскольку этот результат важен для интерпретации спектров отражения активных астероидов, обладающих экзосферой, поясним его подробнее. Напомним, что интенсивность излучения, рассеянного частицей, зависит от значения фазовой функции  $F$  на данном фазовом угле  $\alpha$  и от сечения рассеяния частицы  $C_{\text{sca}}$ . Как показывают расчёты, для частиц сложной структуры спектральная зависимость  $C_{\text{sca}}$  оказалась в целом сходной со спектраль-



**Рис. 11.** Спектральные зависимости  $F(\alpha = 0^\circ)$  для (а) агрегатных частиц льда  $\text{H}_2\text{O}$ , состоящих из 50 мономеров радиусом 0,10 и 0,15 мкм, и одиночных частиц указанных радиусов  $R$ , и (б) для агрегатных частиц, состоящих из 50 мономеров радиусом 0,12 мкм указанного состава (лёд "Ice", силикаты "Sil" и оливин "Oli"). (См. детали в разделе 2.2.2.)

ной зависимостью  $C_{\text{sca}}$  однородных частиц примерно той же массы, только сдвинута в область коротких волн [117]. Что касается спектральной зависимости значений фазовой функции агрегатных частиц, то в нашем случае имеет смысл рассмотреть спектр  $F$  на угле фазы  $\alpha = 0^\circ$ , так как для интерпретации результатов наземных наблюдений важна интенсивность излучения, рассеянного в обратную полусферу.

Спектры  $F(\alpha = 0^\circ)$ , рассчитанные для ледяных агрегатных частиц, состоящих из мономеров радиусом 0,10 и 0,15 мкм, и агрегатных частиц разного состава, состоящих из мономеров радиусом 0,12 мкм, показаны на рис. 11а и 11б. Детали расчётов и данные о показателе преломления рассматриваемых веществ приведены ниже в разделе 2.2.2. На рисунке 11а также показаны спектральные зависимости  $F(\alpha = 0^\circ)$  для одиночных сферических частиц радиусом  $R = 0,10$  и 0,15 мкм. Очевидно, что положения минимумов кривых в коротковолновой части спектра для одиночных частиц и агрегатов, состоящих из таких же частиц, совпадают, тогда как на более длинных волнах в спектре агрегатов появляются дополнительные детали. Как показано в [116], на коротких волнах экстремумы фазовой функции агрегатов субмикронных составляющих обусловлены интерференцией электромагнитных волн, рассеянных на отдельных мономерах агрегата, в то время как интерференция волн, рассеянных группами мономеров, ответственна за детали на более длинных волнах.

Объяснить формирование интерференционной картины в спектре  $F(\alpha = 0^\circ)$  одиночных субмикронных частиц и примерно оценить положение экстремумов можно исходя из приближения геометрической оптики (в данном случае оно даёт разумную оценку, хотя для малых по сравнению с длиной волны частиц оно в целом не может быть корректным). Наблюдаемые экстремумы являются результатом интерференции волн, одна из которых при падении на частицу радиуса  $R$  с комплексным показателем преломления  $m_r + im_i$  отражается от её внешней поверхности, а другая проходит через частицу дважды и возвращается обратно. Тогда разность фаз этих волн  $\delta = 4Rm_r$ , и положение интерференционных минимумов в спектре излучения, рассеянного одиночной частицей,

можно оценить как  $\lambda_n = \delta / (n + 0,5)$ , где  $n$  — целое число. Для частиц льда  $\text{H}_2\text{O}$  получаем  $\lambda_1 \approx 0,34$  и 0,50 мкм при  $R = 0,10$  и 0,15 мкм, что согласуется с картиной на рис. 11а. При более высоких значениях  $m_r$  согласие с формулой для  $\lambda_n$  становится хуже, а при значительном поглощении такой подход даёт некорректные оценки.

Основной интерференционный минимум (на  $\lambda_1$ ) в спектре  $F(\alpha = 0^\circ)$ , обусловленный рассеянием на отдельных мономерах в агрегате, сдвигается в длинноволновую область при увеличении размеров мономеров (рис. 11а). Такой же эффект наблюдается при увеличении действительной части показателя преломления частиц. Из рисунка 11б видно, что с ростом  $m_r$  (например, при переходе от льда к оливином)  $\lambda_1$  перемещается от  $\sim 0,40$  до  $\sim 0,52$  мкм (при радиусе мономеров 0,12 мкм). В спектре  $F(\alpha = 0^\circ)$  для агрегатов сразу за основным минимумом формируется так называемый "коллективный" максимум, обусловленный интерференцией волн, рассеянных на группах мономеров. Расчёты показывают, что при достаточно большом числе мономеров в агрегате положение этого максимума становится независимым от числа мономеров и структуры агрегата и слабо смещается, если зёрна агрегата имеют размеры, отличающиеся от среднего в пределах 20% [116, 117].

Таким образом, положение основных максимумов и минимумов, определяющих общую форму спектра  $F(\alpha = 0^\circ)$ , зависит главным образом не от величины самих агрегатов, а от размеров их зёрен и состава вещества. Это позволяет ограничиться в данном моделировании относительно небольшими структурами, хотя, естественно, в реальных экзосферах частицы могут быть крупнее или мельче рассматриваемых здесь. Поэтому необходимо помнить, что представленные далее спектры отражения активных астероидов с экзосферой, содержащей агрегатные частицы, основаны не на характеристиках самих частиц, а на их характеристиках рассеяния.

**2.2.2. Входные параметры и процедура расчёта спектра отражения активного астероида.** В расчётах спектра отражения активного астероида с пылевой экзосферой, результаты которых приведены ниже в этом разделе,

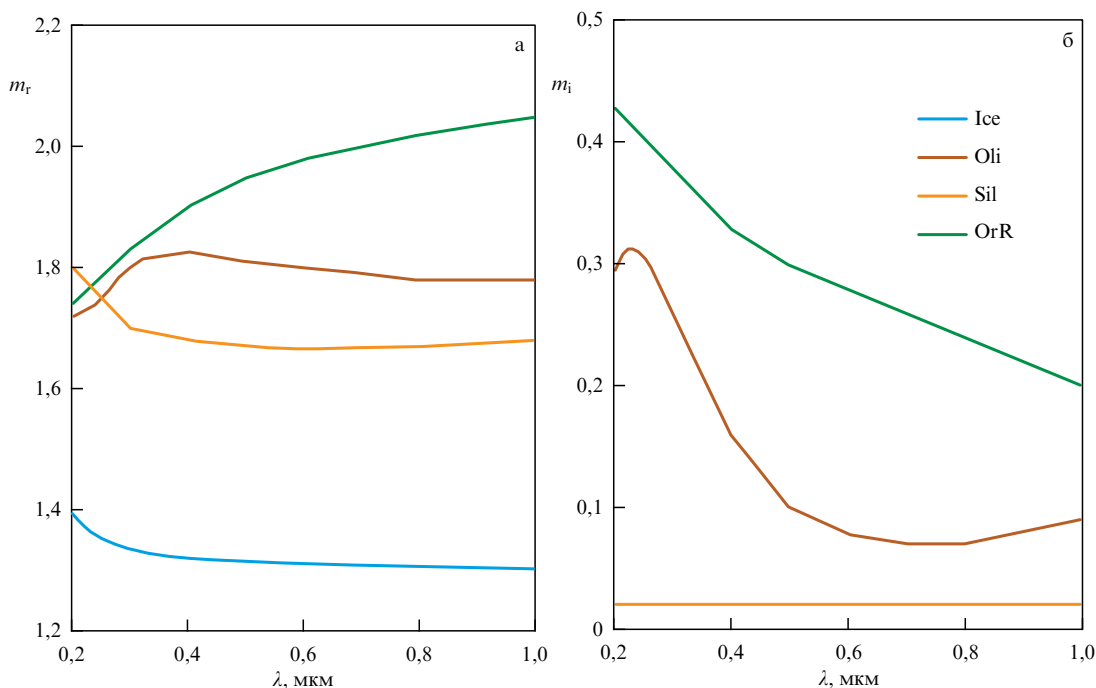


Рис. 12. Спектральные зависимости (а) действительной  $m_r$  и (б) мнимой  $m_i$  частей показателя преломления рассматриваемых веществ. Для льда  $\text{H}_2\text{O}$  значения  $m_i$  близки к нулю в данном спектральном диапазоне. (Ссылки приведены в тексте.)

предполагалось, что экзосфера состоит либо из однородных субмикронных сферических частиц, либо агрегатов таких частиц.

Элементы матрицы однократного рассеяния и сечения рассеяния и экстинкции однородных частиц были вычислены в приближении Лоренца–Ми (см., например, [114]) для степенного распределения частиц по размерам при нескольких значениях эффективного радиуса и эффективной вариации:  $R_{\text{eff}} = 0,1 - 0,2$  мкм и  $v_{\text{eff}} = 0,02 - 0,1$ .

Детальное описание агрегатных частиц, для которых выполнены расчёты, дано в статье [117]. При их генерации мы исходили из концепции статистически фрактальной структуры агломератов кометной пыли (см., например, [118]) и формировали фракталоподобные агрегаты (кластеры) одинаковых сферических субмикронных зёрен (мономеров) с помощью процесса диффузно ограниченной агрегации [119]. Было сформировано несколько вариантов структур разной пористости (от 0,54 до 0,90), состоящих из 50 и 100 мономеров. Для расчётов были выбраны четыре значения радиуса мономеров  $r = 0,08, 0,10, 0,12$  и  $0,15$  мкм. Вычисления характеристик рассеяния на таких частицах сложной морфологии выполнены с помощью численно точного метода суперпозиции Т-матриц [120, 121].

Поскольку часть веществ, присутствие которых можно ожидать в частицах экзосферы, имеют близкие по значению и спектральному поведению показатели преломления в рассматриваемом диапазоне, данное моделирование было ограничено четырьмя вариантами: лёд  $\text{H}_2\text{O}$  ([122]; обозначен далее на рисунках как "Ice"), оливины ([123]; "Oli"), астрономические силикаты ([124]; "Sil") и тугоплавкая органика ([124]; "OrR"). Спектральные зависимости действительной  $m_r$  и мнимой  $m_i$  части показателя преломления рассматриваемых веществ показаны на рис. 12.

Элементы матрицы однократного рассеяния и сечения рассеяния и экстинкции, рассчитанные для частиц экзосферы, служили входными параметрами в процедуре

расчёта переноса излучения в экзосфере над поверхностью астероида (об использованном методе инвариантного погружения см. [125]). Принятые в модельных расчётах значения оптической толщины экзосферы варьировали от  $\tau = 0,1$  до  $6,0$  на  $\lambda = 0,55$  мкм, а значения  $\tau$  вдоль спектра вычислялись исходя из изменения сечения рассеяния модельных частиц с длиной волны.

Что касается газовой составляющей экзосферы, то её влияние на спектры отражения астероидов с экзосферой в большинстве случаев не учитывалось, так как оно невелико и может проявлять себя небольшим плавным увеличением яркости в коротковолновом диапазоне [67]. Это согласуется с оценками [126], согласно которым вклад газа в оптическую толщину комы кометы 67P/Churyumov–Gerasimenko у перигелия очень мал.

Для расчётов интенсивности света, рассеянного оптически тонкой средой с подстилающей поверхностью, надо задать закон отражения для этой поверхности. Поскольку наблюдения астероидов обычно проводятся на фазовых углах, существенно больших нуля, можно не учитывать оппозиционный эффект (характерный для реголитовых поверхностей значительный рост яркости при приближении к оппозиции) и принять поверхность астероида рассеивающей свет изотропно, что делает процедуру вычислений гораздо проще и быстрее.

При расчётах представленных ниже модельных спектров принято типичное для низкоальбедных астероидов Главного пояса (см., например, [3, 127]) значение альбедо поверхности  $A_s = 0,072$  на  $\lambda = 0,55$  мкм. Спектр поверхности, принятый в этом моделировании, показан на рис. 13–17 дополнительной кривой. На длинах волн  $\lambda > 0,35$  мкм он следует канонической зависимости для астероида С-типа 145 Адеона из базы данных SMASS II<sup>7</sup>, которая соответствует "неактивному" состоянию асте-

<sup>7</sup> URL: <http://smass.mit.edu/data/smass/smass2/a000145.2.txt> — дата обращения 14.07.2024.

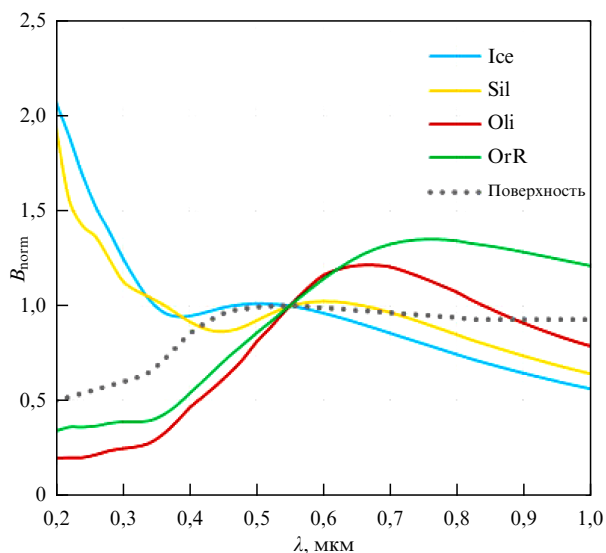
роида, так как была получена примерно за шесть месяцев до прохождения им перигелия. Предполагаемый для низкоальбедных астероидов спад  $A_s$  в коротковолновом диапазоне, где данные SMASS II отсутствуют, был задан на основе результатов исследований [128].

**2.2.3. Модельные спектры отражения астероида с экзосферой.** В этом разделе приведены примеры спектров отражения  $B_{\text{норм}}(\lambda)$ , рассчитанные для условного низкоальбедного астероида С-типа, окружённого пылевой экзосферой, и нормированные на значение на длине волны 0,55 мкм. Приняты в моделях величины оптической толщины экзосферы  $\tau$ , размеров отдельных частиц  $R_{\text{эфф}}$  и мономеров в агрегатах  $r$  и обозначения веществ указаны на графиках и в подписях к ним. Данные спектры вычислены для фазового угла  $\alpha = 10^\circ$ . Следует отметить, что изменение фазового угла в пределах от  $0^\circ$  до  $\sim 30^\circ$  слабо влияет на форму модельного спектра, так как

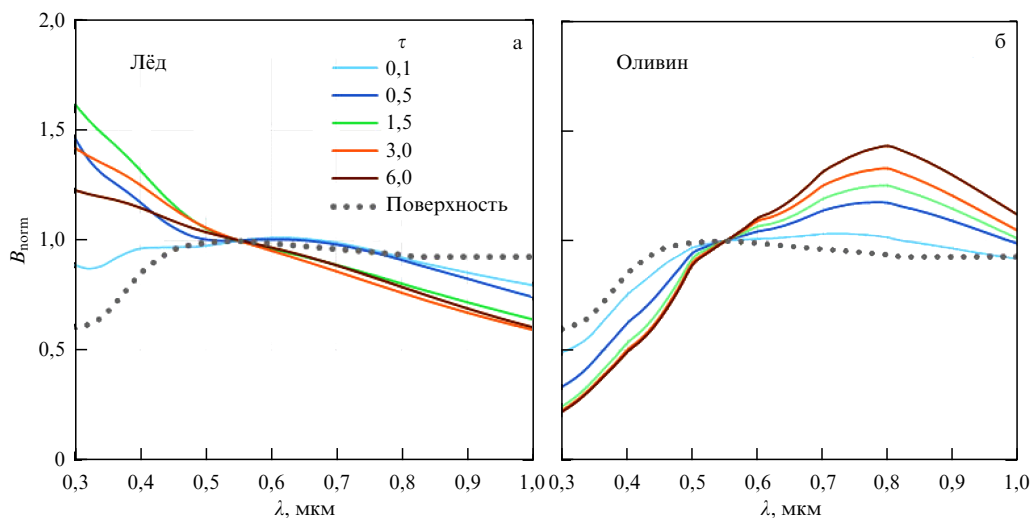
фазовые функции рассматриваемых агрегатов и субмикронных однородных сферических частиц в области обратного рассеяния не имеют резких деталей, а отражение поверхностью принято изотропным.

На рисунках 13 и 14 показаны модельные спектры  $B_{\text{норм}}(\lambda)$  для случаев, когда в экзосфере находятся однородные полидисперсные субмикронные частицы. Из рисунка 13 видно, насколько разным может быть спектр отражения активного астероида в зависимости от состава вещества частиц экзосферы. Очевидно, что присутствие субмикронных частиц непоглощающего льда или слабопоглощающих астрономических силикатов существенно поднимает коротковолновую часть спектра  $B_{\text{норм}}(\lambda)$ , тогда как присутствие субмикронных частиц, поглощающих излучение на коротких волнах, оказывает противоположный эффект. С увеличением оптической толщины экзосферы до  $\tau \approx 2$  изменение формы спектра становится более выраженным (рис. 14). Дальнейшее увеличение  $\tau$  в целом всё меньше влияет на форму спектра, при этом рост многократного рассеяния в экзосфере, содержащей непоглощающие или слабопоглощающие частицы, делает подъём  $B_{\text{норм}}$  в коротковолновом диапазоне менее значительным.

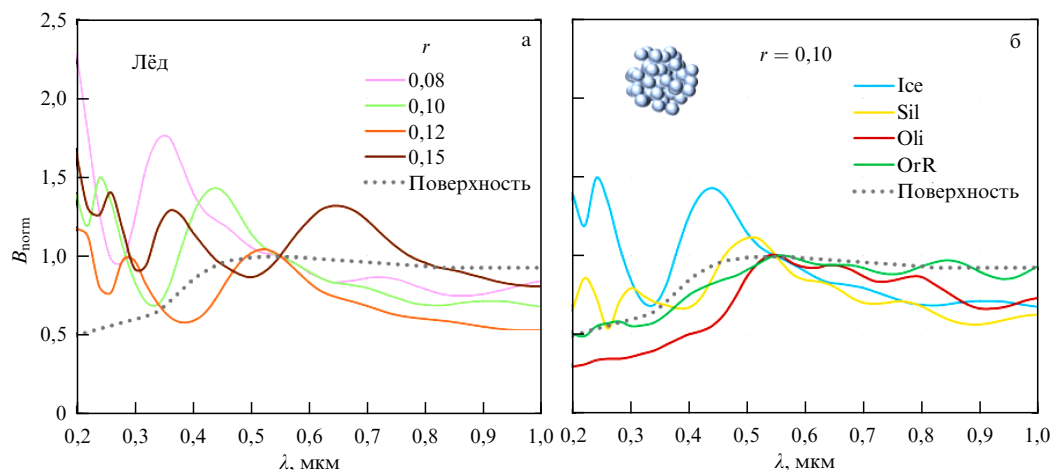
Чтобы дать читателю представление о том, какая концентрация частиц в экзосфере может обеспечить заметные изменения формы спектра отражения астероида, показанные на рис. 13, приведём примерные значения числа частиц  $n_0$  в колонке слоя экзосферы, непосредственно связанные со значением оптической толщины. Если принять для простоты, что слой экзосферы оптической толщины  $\tau = 0,5$  (на длине волны 0,55 мкм) однородный и концентрация не изменяется с высотой, то соответствующая лучевая концентрация пылевых частиц будет  $n_0 \approx 125 \times 10^8, 26 \times 10^8, 20 \times 10^8$  и  $18 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$  для частиц водяного льда, астрономических силикатов, оливинов и тугоплавкой органики соответственно при  $R_{\text{эфф}} = 0,1$  мкм. Отметим, что на основе значений  $n_0$  можно грубо оценить массу облака экзосферы определённого размера: для диаметра облака 10 км, состоящего из частиц астрономических силикатов ( $R_{\text{эфф}} = 0,1$  мкм), получаем его массу приблизительно  $2,5 \times 10^7$  кг, что согласуется, например, с оценкой



**Рис. 13.** Спектры  $B_{\text{норм}}(\lambda)$  условного низкоальбедного астероида, окружённого пылевой экзосферой с оптической толщиной  $\tau = 0,5$ , которая состоит из однородных субмикронных частиц ( $R_{\text{эфф}} = 0,1$  мкм).



**Рис. 14.** То же, что на рис. 13, но для экзосферы разной оптической толщины, содержащей однородные частицы льда  $\text{H}_2\text{O}$  (а) и оливина (б) с распределением по размерам при  $R_{\text{эфф}} = 0,10$  мкм и  $v_{\text{эфф}} = 0,10$ .



**Рис. 15.** То же, что на рис. 13, но для экзосферы оптической толщины  $\tau = 0,5$ , которая содержит агрегаты льда  $H_2O$  с мономерами разного радиуса (а) и агрегатные частицы различного состава при радиусе мономеров  $0,10$  мкм (б). Агрегаты с пористостью  $\sim 0,54$  состоят из 100 мономеров (структура схематично показана на вставке рис. б).

массы пылевого хвоста активного астероида 248370 (2005 QN173)  $4,2 \times 10^7$  кг ([129]).

Примеры спектров отражения  $B_{\text{norm}}(\lambda)$ , рассчитанные для активных астероидов с экзосферой, содержащей агрегатные частицы с мономерами разного размера и разного состава, показаны на рис. 15а и 15б. Сравнение спектров на этих рисунках со спектрами  $F(\alpha = 0^\circ)$  на рис. 11 показывает, что в целом поведение  $B_{\text{norm}}(\lambda)$  следует спектральным кривым для значений фазовой функции однократного рассеяния. Например, положения экстремумов в спектре  $B_{\text{norm}}(\lambda)$  для экзосферы, содержащей ледяные агрегатные частицы (рис. 15а), и в спектре  $F(\alpha = 0^\circ)$  для агрегатов, состоящих из зёрен такого же размера (рис. 11а), совпадают, и вся интерференционная картина сдвигается в длинноволновую область при увеличении размеров мономеров. Более того, видно, что разница в числе мономеров в агрегатах (50 и 100 на рис. 11а и 15а соответственно) не оказывает влияния на положение экстремумов. Следует отметить, что расчёты  $B_{\text{norm}}(\lambda)$  для широкого диапазона параметров агрегатных частиц также показали, что у большинства моделей для агрегатов с более мелкими зёрнами понижение спектра  $B_{\text{norm}}(\lambda)$  на  $\lambda > 0,6$  мкм происходит заметнее, чем для агрегатов с более крупными зёрнами [117].

На рисунке 15б хорошо видно смещение деталей спектра  $B_{\text{norm}}(\lambda)$  в длинноволновую область при увеличении действительной части показателя преломления  $m_r$  агрегатных частиц в экзосфере: у астрономических силикатов  $m_r$  выше, чем у льда  $H_2O$ , и его основной интерференционный минимум  $\lambda_1$  сдвинут относительно  $\lambda_1$  ледяных частиц в сторону длинных волн ( $\sim 0,4$  мкм против  $\sim 0,34$  мкм). Обращает на себя внимание тот факт, что в спектрах  $B_{\text{norm}}(\lambda)$  для веществ, у которых в коротковолновой части диапазона растёт поглощение (оливин и тугоплавкая органика, см. на рис. 15б), интерференционная картина на длинах волн меньше  $\sim 0,5$  мкм нечёткая даже при  $\tau = 0,5$ . В то же время рассеяние на агрегатных частицах льда, не поглощающего излучение, и слабопоглощающих астрономических силикатов формирует хорошо заметные детали в УФ-диапазоне и при  $\tau = 0,1$ . Следует отметить, что с ростом оптической толщины экзосферы до  $\tau \approx 2$  детали

спектра, обусловленные рассеянием на агрегатных частицах, становятся более выраженными, но дальнейшее увеличение  $\tau$  вызывает более слабый эффект, который может поменять знак с ростом распада многократного рассеяния [117].

**2.2.4. Возможности оценки свойств частиц экзосферы активного астероида на основе нормированных спектров отражения в видимом и УФ-диапазонах.** Напомним, что методика измерений спектров отражения, обсуждаемых в данном обзоре, позволяла получать не абсолютные значения яркости объектов, а нормированные. Это ограничивает возможности их интерпретации и не позволяет оценивать массу рассеивающего облака частиц по его вкладу в изменение абсолютного блеска объекта, как сделано в работе [130]. Тем не менее на основе модельных расчётов, по наблюдаемым вариациям формы нормированных спектров отражения активных астероидов и по появлению в них необычных для твёрдых поверхностей деталей мы можем сделать определённые выводы о свойствах частиц в экзосфере активного астероида.

Спектры отражения, рассчитанные для активного астероида, окружённого оптически тонкой экзосферой, содержащей субмикронные частицы, как однородные, так и агрегатные, дают возможность понять, каким образом рассеяние света в экзосфере может изменить канонический спектр отражения астероида и на какие особенности измеренных спектров следует обращать внимание при их интерпретации.

Рассеяние на агрегатных частицах экзосферы формирует в коротковолновой части спектра отражения ( $\lambda < 0,6$  мкм) в рассматриваемом диапазоне параметров составляющих их зёрен интерференционные детали, по положению которых можно оценить размеры составляющих агрегаты зёрен (но не самих агрегатов) и действительную часть их показателя преломления. Однако такие оценки не могут быть однозначными, поскольку взаимосвязаны. Тем не менее для непоглощающих или слабопоглощающих частиц в экзосфере, у которых эти детали в спектре хорошо заметны, данная задача может быть решена по крайней мере на качественном уровне. Кроме того, сделать более определённые выводы может

помочь форма измеренного спектра на более длинных волнах, также зависящая от свойств агрегатных частиц.

В качестве примера объяснения деталей измеренных спектров отражения можно сравнить спектры, измеренные у активных астероидов 145 Адеона и 704 Интерамния в 2012 г. (см. рис. 5) с модельными профилями на рис. 15. Два максимума в спектре астероида 145 Адеона или "ступеньки" в спектре астероида Интерамния (примерно на 0,4 и 0,5 мкм), а также понижение спектра в сторону длинных волн позволяет предположить, что частицы в экзосферах, образовавшихся у этих активных астероидов, были, вероятнее всего, агрегатами и состояли из слабопоглощающих зёрен радиусом порядка 0,1 мкм или менее. Более того, поскольку расстояние между указанными деталями в измеренных спектрах существенно меньше, чем расстояние между интерференционными максимумами в модельных спектрах для агрегатных частиц какого-либо отдельного вещества, можно предположить, что такие детали появились в спектре благодаря рассеянию на частицах разного состава, например, льда и силикатов (см. [68]).

Спектры, рассчитанные для экзосферы, содержащей агрегаты частиц, поглощающих излучение в коротковолновом диапазоне (что характерно для многих веществ, обнаружение которых можно ожидать на активном астероиде), показывают, что поглощение существенно ослабляет интерференционные детали в этом диапазоне. Поэтому попытки обнаружения сильнопоглощающих частиц в экзосфере, и тем более оценки их свойств по таким деталям в спектре, не могут быть успешными.

Рассеяние однородными частицами, существенно меньшими длины волны, проявляет себя в спектре активного астероида, как и следовало ожидать, устойчивым ростом интенсивности на длинах волн менее 0,4–0,5 мкм при условии слабого поглощения в этом диапазоне. Присутствие в экзосфере поглощающих частиц таких размеров не вносит кардинальных изменений в форму нормированного спектра отражения активного астероида.

Таким образом, модельные расчёты показывают, что обнаружить присутствие экзосферы и оценить свойства её частиц по деталям нормированного спектра отражения активного астероида можно при следующих условиях:

1. В экзосфере присутствуют непоглощающие или слабопоглощающие частицы.

2. Спектры активного астероида могут быть измерены на длинах волн менее  $\lambda \sim 0,5$  мкм, и особенно в УФ-диапазоне.

Следует иметь в виду, что по величине подъёма нормированного спектра отражения активного астероида в коротковолновом диапазоне или по степени выраженности появившихся деталей невозможно однозначно оценить концентрацию частиц в реальной экзосфере, содержащей частицы разного состава и морфологии. Причина состоит, например, в том, что рассеяние на слабо- и сильнопоглощающих частицах оказывает разнонаправленное влияние на форму спектра (см. рис. 13, 15), при этом возможно, что многочисленные поглощающие частицы могут не проявлять себя явно в спектре отражения, а маскировать детали, обусловленные присутствием слабопоглощающих частиц.

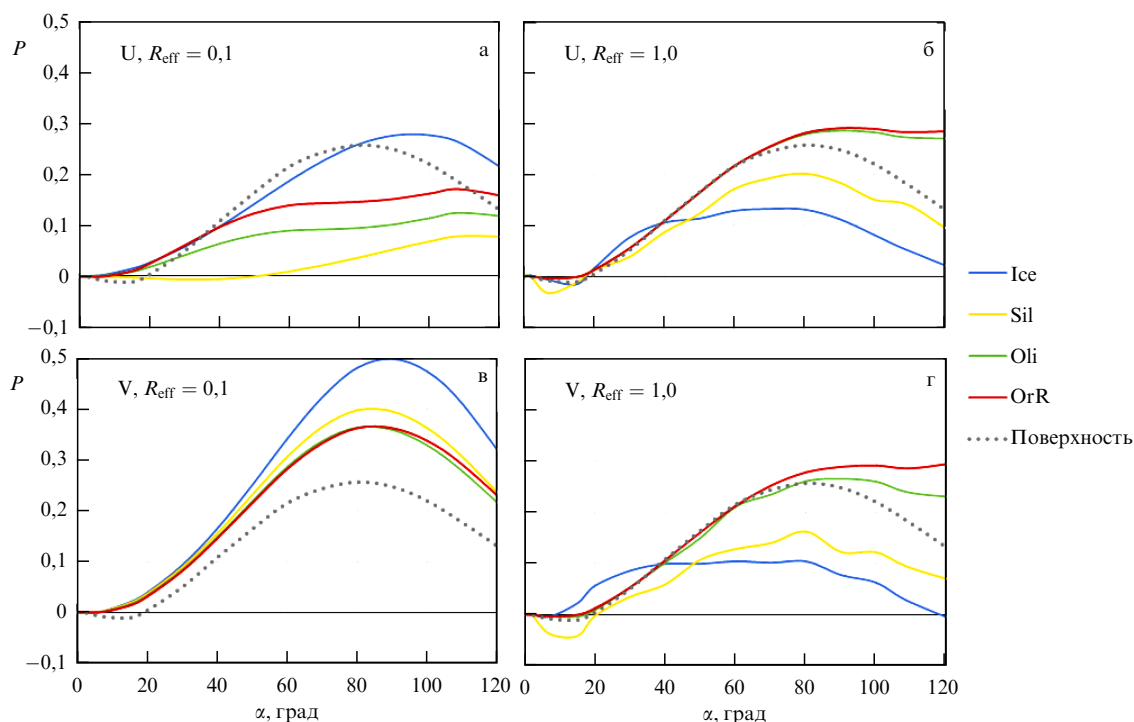
**2.2.5. О возможности оценки активности астероидов с помощью измерений поляризации.** Для определения свойств экзосферы активного астероида можно также

обратиться к поляриметрии — методу, известному своей чувствительностью к характеристикам частиц, рассеивающих свет. Возможное влияние экзосферы, образовавшейся у астероида, на поляризацию рассеянного им света, которую можно измерить при наземных UVBR-наблюдениях (длины волн  $\lambda = 0,36, 0,44, 0,54$  и  $0,68$  мкм), было недавно оценено на основе расчётов характеристик рассеяния частиц разной морфологии и состава [131]. Ниже кратко представлены результаты этой работы.

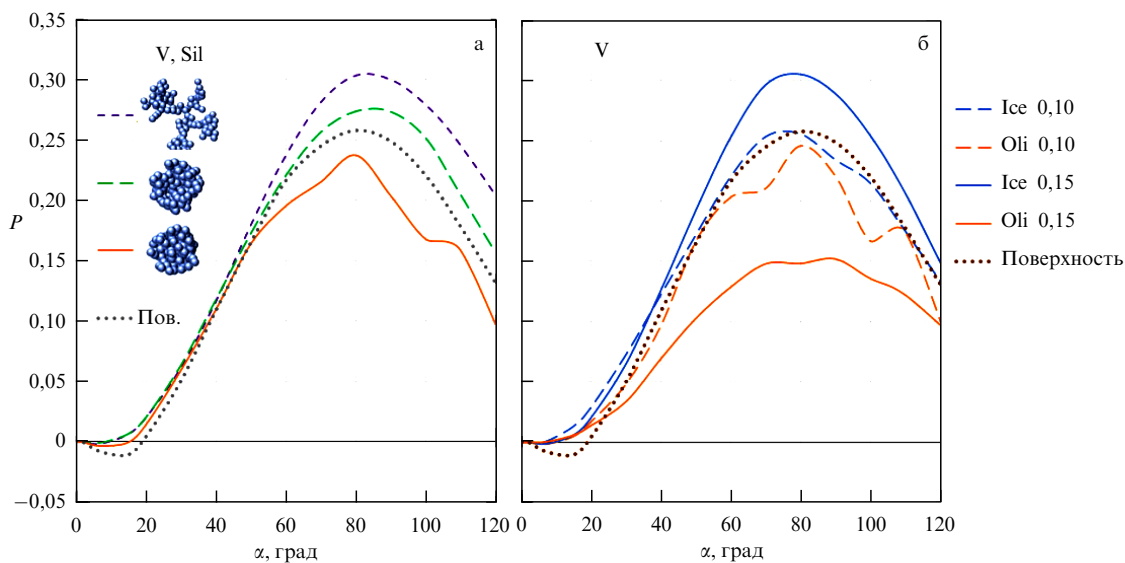
При моделировании параметры частиц экзосферы были выбраны на основе результатов анализа спектров отражения астероидов в ближнем и видимом УФ-диапазонах, которые были измерены во время появления признаков сублимационной активности (см. ссылки выше). Однако, в отличие от моделирования спектров отражения, в расчётах поляризации была учтена несферическая форма однородных частиц. Они были представлены смесью случайно ориентированных сфероидов с разным отношением осей ( $E = 0,7–1,3$ ). Расчёты были выполнены с помощью метода Т-матриц [114] для полидисперсных ансамблей частиц при двух значениях эффективного радиуса сферы эквивалентного объёма  $R_{\text{eff}} = 0,1$  и  $1,0$  мкм и при эффективной вариации  $v_{\text{eff}} = 0,05$ .

Основная поляриметрическая характеристика рассеивающей среды, на основе которой оценивают её свойства, — фазовая зависимость степени линейной поляризации в широком диапазоне углов фазы  $P(\alpha)$ . Её поведение определяется свойствами рассеивателей в среде: их размерами, морфологией, показателем преломления, упаковкой (см., например, [132] и ссылки там). Для определения свойств частиц в оптически тонкой экзосфере активного астероида на основе измеренной зависимости  $P(\alpha)$  необходимо учитывать поляризацию света, отражённого от поверхности астероида. В данных расчётах зависимость  $P(\alpha)$  для поверхности активного астероида была принята одинаковой в разных длинах волн, так как задача состояла лишь в том, чтобы отследить изменения, которые может внести экзосфера в наблюдаемые характеристики активного астероида. Для условного астероида интенсивность и поляризация света, рассеянного поверхностью, были вычислены на основе матрицы рассеяния агрегатных частиц силикатов (см. подробности в статье [131]). Это дало слабую ветвь отрицательной поляризации на углах фазы меньше  $\sim 20^\circ$  и максимум поляризации  $\sim 26\%$  при геометрическом альбедо объекта  $A_g \approx 0,1$  (рис. 16), что соответствует характеристикам низкоальбедных астероидов.

Из рисунка 16 видно, как рассеяние света в экзосфере, состоящей из мелких однородных частиц, может изменить фазовую функцию линейной поляризации света  $P(\alpha)$ , отражённого модельным астероидом. Приведены модели для частиц разного состава на двух длинах волн  $\lambda = 0,36$  и  $0,54$  мкм (каналы U и V) и модельная кривая для поверхности астероида. Видно, что размер рассеивающих частиц экзосферы относительно длины волны во многом определяет их влияние на  $P(\alpha)$  активного астероида. Если частицы существенно меньше длины волны ( $R_{\text{eff}} = 0,1$  мкм и  $\lambda = 0,54$  мкм), то рассеяние в экзосфере повышает положительную поляризацию во всём интервале фазовых углов и подавляет слабую ветвь отрицательной поляризации, характерную для поверхности астероидов. Это объясняется тем, что свет, рассеянный частицами таких размеров, поляризован преимущественно в плоскости, перпендикулярной плоскости рассея-



**Рис. 16.** Степень линейной поляризации света  $P$ , отражённого модельным астероидом с экзосферой на длинах волн 0,36 и 0,54 мкм (каналы U и V соответственно), в зависимости от фазового угла наблюдений  $\alpha$ . Показаны модели для частиц различного состава и размера  $R_{\text{eff}}$  [мкм], а также модель для астероида без экзосферы ("Поверхность"). Оптическая толщина экзосферы принята равной  $\tau = 0,5$  на  $\lambda = 0,54$  мкм.



**Рис. 17.** Степень линейной поляризации света  $P$ , отражённого модельным астероидом с экзосферой оптической толщины 0,5 на  $\lambda = 0,54$  мкм, состоящей из частиц — случайно ориентированных агрегатов ( $N = 100$  мономеров размером  $r$ ) — в зависимости от фазового угла  $\alpha$ : (а) зависимости для структур разной пористости (0,54, 0,72, и 0,94 (снизу вверх)), состоящих из астрономических силикатов при  $r = 0,10$  мкм; (б) модели для агрегатных частиц льда и оливина (пористость  $\sim 0,54$ ), состоящих из мономеров указанных радиусов (в микронах).

ния, а  $P(\alpha)$  имеет колоколообразную форму с высоким максимумом на  $\alpha \approx 90^\circ$  при слабой зависимости от материала частиц (см., например, [114]). С ростом размеров частиц влияние показателя преломления на поляризацию усиливается, форма  $P(\alpha)$  становится более сложной, её максимум значительно понижается. В результате положительная поляризация света, отражённого астероидом с экзосферой, состоящей из относительно крупных слабопоглощающих частиц, становится ниже, чем у астероида без экзосферы, а отрицательная ветвь поляри-

зации может усилиться. В то же время присутствие относительно крупных поглощающих частиц в экзосфере слабо изменяет  $P(\alpha)$  астероида.

Рисунок 17 даёт представление о влиянии рассеяния агрегатными частицами, присутствующими в экзосфере, на  $P(\alpha)$  активного астероида. В качестве примера приведены функции  $P(\alpha)$ , рассчитанные для агрегатных частиц разной пористости, состоящих из астрономических силикатов при радиусе мономеров 0,10 мкм, и для относительно плотных агрегатов, состоящих из непогло-

щающих ледяных и поглощающих оливиновых мономеров указанных размеров. Видно, что поведение  $P(\alpha)$  активного астероида зависит как от показателя преломления и структуры частиц в экзосфере, так и от размеров составляющих агрегаты мономеров. Функция  $P(\alpha)$  для активного астероида с экзосферой, содержащей ледяные агрегатные частицы, в целом следует поведению  $P(\alpha)$  для астероида без экзосферы, но часто принимает более высокие значения и не имеет отрицательной ветви. Когда в экзосфере находятся поглощающие агрегатные частицы, функция  $P(\alpha)$  ведёт себя сходным образом, если структура агрегатов неплотная, но может иметь более сложный вид при плотноупакованной структуре.

Таким образом, рассеяние света в экзосфере активного астероида может как ослаблять поляризацию света, отражённого от поверхности, так и приводить к её усилению в зависимости от длины волны, интервала фазовых углов, вещества и морфологии частиц в экзосфере. Рассеяние в экзосфере может также изменять спектральный градиент поляризации как в сторону более положительных, так и отрицательных значений.

На фазовых углах меньше  $30^\circ$ , характерных для наблюдений астероидов Главного пояса, изменения, вносимые рассеянием в экзосфере в поляризацию активного астероида, невелики и слабо отличаются для частиц разных свойств. В связи с этим перспективы определения характеристик частиц экзосферы на основе поляризметрических данных на малых фазовых углах представляются крайне низкими. Тем не менее изменение отрицательной ветви поляризации по сравнению с каноническими значениями должно свидетельствовать о развитии экзосферы у активного астероида.

На фазовых углах больше  $30^\circ$  влияние рассеяния в экзосфере на поляризацию активного астероида может быть более заметным, что делает многообещающим привлечение поляриметрии для исследования активности астероидов, сближающихся с Землёй. Такой эффект следует также учитывать при оценке альбедо астероида по максимуму поляризации (по закону Умова), если у этого астероида можно ожидать проявления активности.

### 2.3. Влияние солнечных событий на сублимационно-пылевую активность и другие проявления активности астероидов

При изучении спектральных характеристик активных астероидов мы ранее уже обсуждали возможное влияние солнечного ветра, а также вспышечных и эруптивных событий на Солнце на пылевую активность астероидов в целом и на астероиды примитивных типов в частности ([67, 93] и ссылки там). Здесь только заметим, что время движения образовавшейся в плазме солнечного ветра слабой ударной волны до какого-либо астероида будет определяться средней скоростью медленного солнечного ветра ( $\sim 550 \text{ км с}^{-1}$ , см., например, [133, 134]). Но распространение более мощных ударных волн, как последствий корональных выбросов вещества на Солнце, по данным спутников GOES-16 и SOHO, может происходить со скоростью в 1,5–2 раза выше<sup>8</sup>.

В дополнение к рис. 18 и рис. 7 со спектрами отражения активных астероидов 24 Фемиды, 704 Интерамнии и 449 Гамбургри приведём схему (рис. 19), иллюстрирую-

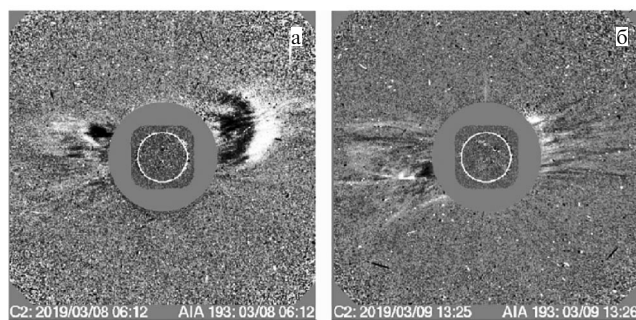


Рис. 18. Выбросы корональной массы CME1 (а) и CME2 (б), зарегистрированные спектральным коронографом (LASCO) на борту солнечной и гелиосферной обсерватории (SOHO). Видно, что CME1 и CME2 находятся близко к экваториальной плоскости Солнца и, вероятно, послужили причиной образования ударных волн в межпланетной среде (ICME1 и ICME2), которые привели к одновременному временному удалению ПЭ активных астероидов 24 Фемиды, 449 Гамбургри и 704 Интерамнии 18 марта 2019 года.

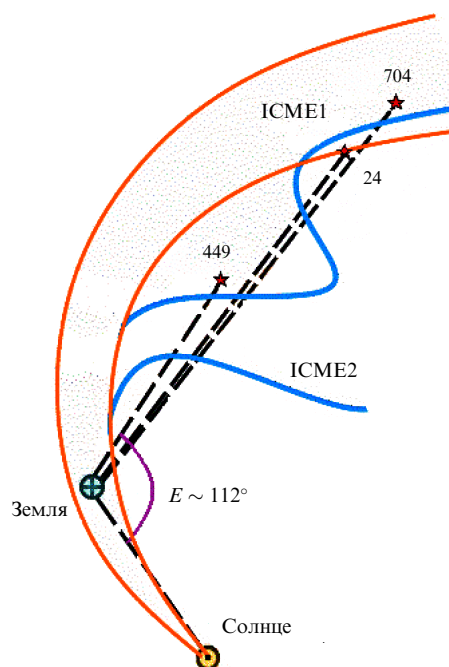


Рис. 19. Расположение астероидов 24 Фемиды, 449 Гамбургри и 704 Интерамнии на очень близких углах элонгации ( $E \sim 112^\circ$ ), определяющих их расположение по отношению к наблюдателю и Солнцу в период их наблюдений с 17.03.2019 по 10.04.2019. Предполагаемая ориентация фронтов близких по времени ударных волн (показаны голубым цветом) в солнечном ветре, вызванных корональными выбросами вещества на Солнце 08.03.2019–09.03.2019. Оранжевым цветом показаны спиралеобразные силовые линии солнечного магнитного поля. (Рисунок адаптирован из [67].)

щую предполагаемое "сметание" их пылевых экзосфер 18 марта 2019 г. Оно могло произойти при воздействии на астероиды двух близких по времени (с интервалом  $\sim 35 \text{ ч}$ ) и мощности ударных волн (ICME1 и ICME2, показанные на рис. 19), возникших при корональных выбросах вещества на Солнце CME1(2019-03-08) и CME2(2019-03-09) с мощностью, несколько превышающей минимальную для таких событий, между которыми были ещё две более слабые волны<sup>9</sup>. Важно иметь в виду, что эти эруптивные

<sup>8</sup> URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) — дата обращения 14.07.2024.

<sup>9</sup> URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/UNIVERSAL\\_ver2/2019\\_03/univ2019\\_03.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL_ver2/2019_03/univ2019_03.html) — дата обращения 14.07.2024.

события произошли вблизи минимума 11-летнего цикла активности Солнца, на "фоне" его длительного спокойного состояния. Как уже отмечалось выше, подтверждением временного удаления ПЭ активных астероидов 24 Фемиды, 704 Интерафии и 449 Гамбургги 18 марта 2019 г. является её одновременное восстановление 19 марта у всех трёх астероидов. Другими достаточно убедительными свидетельствами данного события являются следующие обстоятельства, значительно повышающие его вероятность:

1. Направленность двух основных корональных выбросов преимущественно в плоскости экватора Солнца, в которой находятся и рассматриваемые астероиды (рис. 18).

2. Преобладающая асимметрия выброшенной массы более сильного первого выброса в сторону всех трёх астероидов, имеющих практически совпадающие углы элонгации (рис. 19).

Привлекает внимание необычное сходство формы аппроксимированных спектров отражения 24 Фемиды, 449 Гамбургги и 704 Интерафии с 17 по 20 марта 2019 г. Это можно объяснить тем, что и значения углов элонгации астероидов ( $E \sim 112^\circ$ ) почти совпадают (рис. 19), и фазовые углы наблюдений, определяющие расположение указанных тел по отношению к наблюдателю и Солнцу, близки, а значит, близки и условия регистрации их спектров. С другой стороны, причиной такого сходства могло также стать общее маловозмущённое состояние межпланетной плазмы и солнечного магнитного поля, простирающегося до десятков астрономических единиц, в период минимума солнечной активности.

Обсудим также более подробно регулярную спектральную особенность в виде "гребёнки", которая была нами впервые зарегистрирована в спектрах отражения трёх из восьми наблюдавшихся астероидов примитивных типов: 177 Ирмы, 203 Помпеи и 383 Янины — под влиянием, вероятно, более мощных событий на Солнце в конце ноября 2020 г. Как выше сообщалось, астероиды оказались под влиянием значительной солнечной вспышки (в интервале классов М–Х в рентгеновском диапазоне) и связанного с ней СМЕ<sup>10</sup> (рис. 20). В то же время образование указанной спектральной особенности имело место в период сравнительно низкого общего уровня солнечной активности и, возможно, поэтому было нами замечено. Последнее означает, что в течение примерно 10 дней между солнечной вспышкой и СМЕ и нашими наблюдениями астероидов других подобных событий не было. Следует добавить: хотя все астероиды за десять дней до наших наблюдений подверглись воздействию солнечной рентгеновской вспышки, возможно, что вызванные СМЕ ударные волны астероидов ещё не достигли. Судя по снимку данного события, несмотря на ориентацию СМЕ вдоль солнечного экватора, его вектор был направлен преимущественно в западную сторону, т.е. от астероидов (см. рис. 20). Следовательно, вызванные этим СМЕ ударные волны могли достичь астероидов значительно позже — не прямым, а косвенным путём, двигаясь вдоль спиралеобразных силовых линий солнечного магнитного поля.

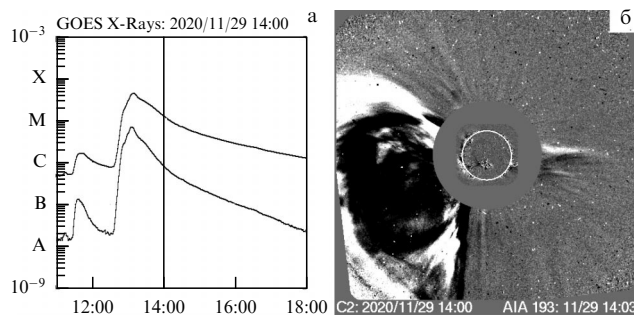


Рис. 20. (а) Солнечная вспышка в рентгеновском диапазоне 2020.11.29 и (б) связанный с ней корональный выброс вещества вблизи экваториальной плоскости Солнца (ссылка в тексте).

Углы элонгаций астероидов 177 Ирмы, 203 Помпеи и 383 Янины также находились в достаточно узком секторе ( $\sim 30^\circ$  и в среднем около  $160^\circ$ ) [92], что, вероятно, обеспечило близкие условия их наблюдений с 7 по 14 декабря 2020 г. по сравнению с другими астероидами данной группы. Кроме того, они продемонстрировали наиболее значительные отклонения от своих спектральных "шаблонов" (рис. 8в, г, е). Необычная волнообразная деталь в виде "гребёнки" в красной части спектров отражения, вероятно интерференционной природы, слабо заметна у 177 Ирмы, но достаточно отчётливо видна при более значительной амплитуде на всех трёх последовательных спектрах двух других астероидов (полученных с интервалами времени от  $\sim 40$  мин до часа) 203 Помпеи и 383 Янины, что подтверждает её достоверность. Интерпретация этих особенностей требует дальнейших модельных расчётов.

#### 2.4. Выводы по разделу

По разделу 2 можно сделать следующие выводы:

1. Уточнены представления о СПА астероидов примитивных типов. Показано, что выбрасываемая на астероиды при сублимации водяного льда пылевая компонента состоит в основном из субмикронных частиц и является преобладающей.

2. Приведено обоснование возможности спектрального обнаружения СПА астероидов примитивных типов ниже предела пространственного разрешения признаков активности астероидов на их прямых снимках.

3. По спектрам отражения 24 Фемиды, 449 Гамбургги и 704 Интерафии в марте 2019 г. впервые зарегистрировано квазиодновременное прохождение ударных волн в солнечном ветре, вызванное близкими по времени слабыми СМЕ.

4. В течение примерно 10 лет в результате спектральных обзоров  $\sim 300$  астероидов примитивных типов с эксцентриситетами орбит не менее 0,1 (у которых происходят более заметные изменения подсолнечных температур на поверхности при движении от афелия до перигелия), находившихся вблизи перигелийных расстояний, было обнаружено 16 активных астероидов и 16 подозреваемых в активности.

5. Установлены качественный (по возникновению значительного отрицательного градиента спектра отражения астероида в активном состоянии по сравнению с градиентом его "классического" спектра отражения в неактивном состоянии) и количественный (на основании

<sup>10</sup> URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/ma-ke\\_javamovie.php?date=20201129](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/ma-ke_javamovie.php?date=20201129) — дата обращения 14.07.2024.

положительного значения разности среднеквадратичных ошибок в интенсивности светового потока, регистрируемого в полосе  $U$  от активного астероида и непременной контрольной звезды, а также при отношении "сигнал/шум" астероида не менее нескольких десятков) критерии обнаружения СПА астероидов примитивных типов как индикатора наличия водяного льда в составе их вещества.

6. Признаки СПА у астероида могут стать заметными из-за достаточно большого количества мелких рассеивающих частиц в его экзосфере. Наибольший вклад в спектральные проявления в УФ- и видимом диапазонах дают слабопоглощающие частицы размером  $\sim 0,1$  мкм и их агрегаты.

7. Из анализа проявлений активности самих астероидов следует, что они могут быть также использованы как индикаторы вспышечных и эруптивных событий на Солнце. Данные спутников GOES-16 и SOHO показывают, что СМЕ являются основным источником ударных волн в солнечном ветре (ИСМЕ), которые в период минимума солнечной активности в основном движутся со скоростью, близкой к скорости медленного солнечного ветра, и направлены достаточно близко к плоскости солнечного экватора. Это подтверждается их обнаружением по спектрам отражения 24 Фемиды, 449 Гамбург и 704 Интерамнии в марте 2019 г.

8. Для изучения влияния солнечных событий на конкретные активные астероиды в период более высокой активности Солнца необходим учёт величины энергии, скорости и геометрии выброса первичного СМЕ, а также моделирования движения ИСМЕ в солнечном магнитном поле на больших гелиоцентрических расстояниях.

### 3. Столкновения астероидов как причина сублимационно-пылевой активности астероидов

Как отмечалось в разделе 1.1, выброс частиц с поверхности астероида может быть обусловлен двумя основными механизмами: выбросом при ударе (столкновительным механизмом) и сублимационным (столкновительно-сублимационным, кометоподобным) механизмом. Сублимационный механизм требует наличия открытого льда на поверхности астероида и соответствующего притока энергии от Солнца. Столкновительный механизм более универсален, он не требует наличия льдов. Практически при любом ударе частицы астероида-мишени будут выбрасываться в околоастероидное (межпланетное) пространство. Более того, столкновение может обнажить подповерхностные льды и таким образом обеспечить условия для сублимационной активности. Образующаяся при ударе пылевая экзосфера астероида, состоящая из мелких пылевых частиц, относительно быстро диссипирует (в динамической шкале движения частиц выброса), поэтому подобные структуры обнаружить не так просто. Сублимационная же активность может проявляться более длительное время, пока астероид находится в перигелийной зоне. Чтобы выяснить относительный вклад описанных механизмов в СПА, эти механизмы нужно сравнивать, желательно на количественном уровне. Для решения данной задачи нужно получить оценки следующих характеристик:

1. Частота и скорость столкновений астероидов в ГПА.
2. Параметры выбросов, образующихся при столкновениях.
3. Частота событий СПА: модельные оценки и сравнение с наблюдениями.

#### 3.1. Частота и скорость столкновений астероидов в Главном поясе астероидов

Оценки темпа столкновений объектов в ГПА основаны не на редких наблюдениях последствий столкновений, а на теоретических моделях. Базовая аналитическая теория для расчёта частоты и скорости столкновений была разработана в статьях [135, 136] и применялась многими исследователями в последующие годы (см., например, [137–139]). В качестве альтернативы различные авторы (см., например, [139, 140] и ссылки в обзоре [141]) используют прямой численный подход, основанный на интегрировании орбит астероидов за достаточно длительный промежуток времени. Полученное распределение количества сближений и взаимных скоростей при сближениях может быть использовано для определения вероятности столкновений и характерных скоростей ударов. Среднее количество столкновений  $N_{col}$  между астероидом-мишенью радиусом  $r_t$  и астероидами-ударниками радиусом, превышающим значение  $r_p$ , за время  $\Delta t$  принято оценивать по формуле вида (см., например, [142])

$$\langle N_{col}(> r_p) \rangle = \langle P_i \rangle (r_t + r_p)^2 \Delta t N_p(> r_p), \quad (2)$$

где  $N_p(> r_p)$  — количество астероидов-ударников, радиус которых превышает значение  $r_p$ , а  $P_i$  — средняя внутренняя вероятность столкновения между мишенью и населением ударников. Формула применима при условии  $r_p \ll r_t$ .  $P_i$  обычно измеряется в единицах  $[\text{км}^{-2} \text{год}^{-1}]$ . Можно рассматривать  $P_i$  для конкретных ансамблей. Такие расчёты проведены в [143]. Значения  $P_i$  для вероятности столкновений между астероидами, входящими в разные зоны ГПА, варьируются от  $0,35 \times 10^{-18} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$  для столкновений между астероидами внешней зоны (значения большой полуоси  $a$  в диапазоне 3,3–3,51 а.е.) и астероидами внутренней зоны (2,1–2,5 а.е.) до  $11,98 \times 10^{-18} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$  для столкновений между астероидами внутренней зоны. Общая вероятность столкновения с астероидами всех зон по результатам [143] оценена как  $21,5 \times 10^{-18} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ .

Понятно, что для оценки числа достаточно эффективных столкновений нужно знать распределение астероидов как по размерам, так и по скоростям сближений, т.е. по энергиям. "Достаточно эффективное" означает, что в результате столкновения из астероида-мишени будет выброшено количество пыли, которое обеспечит наблюдаемые проявления, или на астероиде-мишени будут обнажены подповерхностные (льдосодержащие) слои на достаточно большой площади и последующие проявления кометоподобного механизма будут заметны.

Для оценки скорости сближения (столкновения) можно воспользоваться получаемой из наблюдений оценкой случайной (по отношению к круговому движению) скорости. Согласно [144] случайная скорость  $V_{\text{ran}}$  оценивается из

$$V_{\text{ran}} = (e^2 + i^2)^{1/2} V_{\text{kep}}, \quad (3)$$

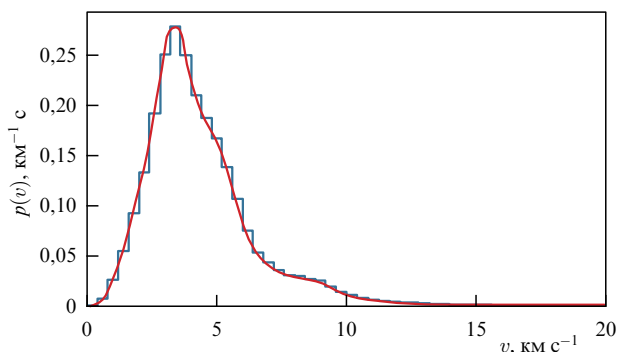


Рис. 21. Распределение  $p(v)$  для выборки астероидов ГПА (из работы [145]) и аппроксимационная функция, рассчитанная по формуле (4) (красная кривая).

где  $V_{\text{кеп}}$  — кеплерова скорость,  $e$  — эксцентриситет и  $i$  — наклонение орбиты (в радианах). Среднеквадратичное значение случайных скоростей для ГПА в целом составляет около  $4,8 \text{ км с}^{-1}$ . Эта оценка хорошо согласуется с результатами динамического моделирования (численной модели сближений астероидов ГПА), представленными в [143].

Для ансамбля астероидов-ударников необходимо знать распределение их случайных скоростей. В [145] по данным Центра малых планет об элементах орбит 1178752 астероидов ГПА и по формуле (3) построено распределение  $V_{\text{ган}}$ , точнее, распределение  $p(v)$  — относительного количества астероидов в интервале скорости шириной  $1 \text{ км с}^{-1}$  и с центром на значении  $V_{\text{ган}}$ . Это распределение показано на рис. 21. Интересно, что оно хорошо описывается аппроксимационной формулой

$$p(v) = 0,27 \exp\left(\frac{-(v-3,1)^2}{1,62}\right) + 0,12 \exp\left(\frac{-(v-5,0)^2}{1,28}\right) + 0,03 \exp\left(\frac{-(v-7,0)^2}{8,0}\right). \quad (4)$$

Легко проверить, что  $\int_0^{20 \text{ км/с}} p(v) dv \approx 1$ . Характерно, что выражение для  $p(v)$  описывается набором функций Гаусса. Возможно, это указывает на то, что поле взаимных скоростей астероидов Главного пояса формируется в результате случайных процессов.

Поскольку рассматривается ансамбль астероидов, то нужно знать распределение астероидов (как ударников, так и мишеней) по размерам. Обычно используют кумулятивную форму распределения  $N(> D)$ , т.е. число астероидов диаметром, превышающим данное значение  $D$ . Поскольку полнота наблюдений (обнаружений) астероидов ГПА в настоящее время достигнута только для астероидов диаметром  $D > 1 \text{ км}$ , для более мелких астероидов распределение по размерам остаётся предметом моделирования. Обычно распределение задают в степенном виде  $N(> D) \propto D^{-q}$ . До сих пор задача построения более или менее общепринятого распределения в данном диапазоне размеров ( $D < 1 \text{ км}$ ) остаётся нерешённой и разнообразие моделей, к сожалению, означает разнообразие результатов. Согласно таблице 1 из [146] для астероидов размера  $D < 1 \text{ км}$  у различных авторов  $q$  может принимать значения от 1,1 до 4,4! На рисунке 22, адаптированном из классического обзора [147], видно, что разброс значений  $N(> D)$  для  $D \sim 10 \text{ м}$  достигает двух

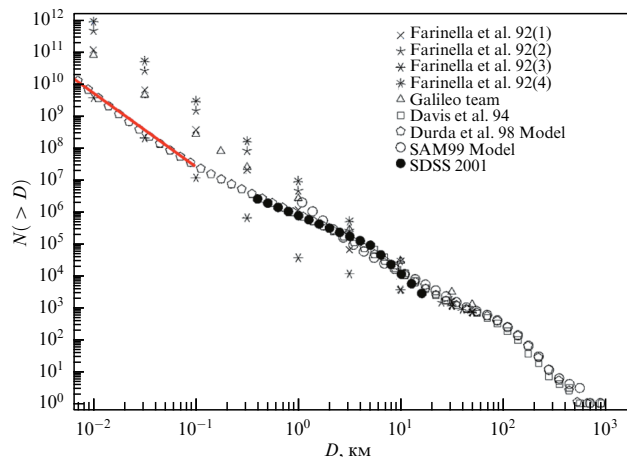


Рис. 22. Кумулятивное распределение астероидов ГПА по размерам (диаметру  $D$ ). Красной прямой аппроксимировано модельное распределение астероидов  $N(> D) \propto D^{-2,3}$  для значений  $D < 100 \text{ м}$ .

порядков. В наших работах [145, 148] для астероидов диаметром менее  $100 \text{ м}$  принято  $q = 2,3$  (конкретный вид зависимости  $N(> D) = 8,4 \times 10^{11} D^{-2,3}$ , где  $D$  измеряется в метрах).

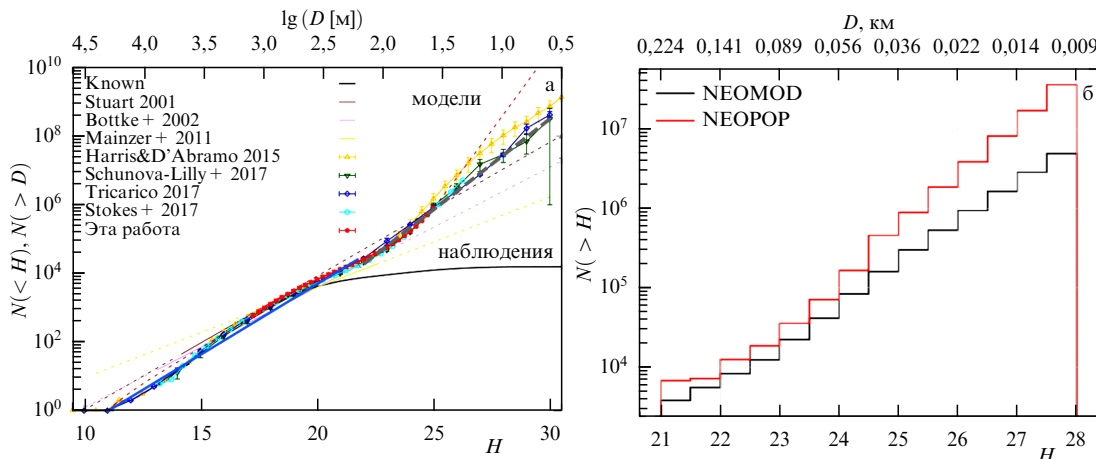
Аналогичная ситуация и с распределением АСЗ по размерам. За пределами полноты информации (считается, что на настоящий момент выборка АСЗ диаметром более  $0,7 \text{ км}$  считается полной, т.е. наблюдаются почти все АСЗ таких размеров) применяются модели, разброс между которыми у разных авторов значителен. На рисунке 23а показано кумулятивное распределение АСЗ по абсолютной астероидной звёздной величине  $H$  и, соответственно, по размерам — диаметру  $D$ .  $D$  и  $H$  связаны соотношением  $D = 10^{3,1236-0,5 \log_{10}(A)-0,2H}$  [149], где  $A$  — альbedo. При построении рис. 23 взято некоторое среднее значение  $A = 0,15$ .

Для моделирования населения АСЗ (точнее, населения ОСЗ — объектов, сближающихся с Землёй, которые включают АСЗ и небольшое количество комет) часто используют модель (программный комплекс) NEOPOP Европейского космического агентства (см. [150, 151]). В ходе мероприятий, связанных с программой ЕКА по космической ситуационной осведомлённости (SSA), возникла необходимость в программном средстве моделирования систем наблюдения АСЗ и была разработана находящаяся в открытом доступе Программа наблюдения населения околоземных объектов (Near-Earth Object Population Observation Program, NEOPOP), позволяющая пользователям выполнять следующие действия:

- генерацию популяций ОСЗ на основе модели [151];
- имитацию наблюдений популяций ОСЗ;
- анализ популяций ОСЗ.

NEOPOP реализован в виде консольной программы и может удобно управляться с помощью графического пользовательского интерфейса (GUI).

В последнее время модель NEOPOP подверглась существенной модификации. Была разработана модель NEOMOD (см. [152, 153]). Она точнее аппроксимирует распределение реальных астероидов. На рисунке 23 показаны распределения маломассивных АСЗ согласно моделям NEOPOP и NEOMOD. Как видно из рисунка, различие распределений в этих двух популярных моделях довольно существенное.



**Рис. 23.** (а) Кумулятивное распределение АСЗ по размерам (диаметру  $D$ ) и абсолютной астероидной звёздной величине  $H$ . (б) То же согласно моделям NEOPOP (красная линия) и NEOMOD (чёрная линия). Для астероидов размером менее 0,7 км наблюдаемое количество астероидов существенно меньше прогнозируемого по моделям.

**3.2. Параметры выбросов, образующихся при столкновениях**

На рисунке 24а проиллюстрирована базовая картина выброса частиц при столкновении астероида-ударника с (более массивным) астероидом-мишенью. Толщина и густота стрелок соответствует размеру и числу частиц и иллюстрирует тот факт, что крупных частиц (более толстые стрелки) меньше, чем мелких (более тонкие стрелки). Длина стрелок иллюстрирует зависимость скорости выброса от размера выбрасываемых частиц. На рисунке 24б показано поле скоростей фрагментов, образовавшихся при бомбардировке базальтовой мишени в лабораторном эксперименте [154] (см. ниже подробнее об этом эксперименте).

В результате столкновения происходит выброс вещества в конус с полным углом раствора  $\alpha$ . В [155] приведена статистика размеров воронок от наземных взрывов. Диапазон энергий взрывов весьма широк — от 1 т до 5 кт тротилового эквивалента. Воронки (кратеры) характеризуются следующими показателями: в мягких породах отношение  $h_c/D_c$ , где  $h_c$  и  $D_c$  — глубина и диаметр кратера соответственно, составляет примерно 0,27, в более твёрдых трещиноватых горных породах — 0,23. При условной конической форме воронки это даёт полные углы раствора  $\alpha = 122^\circ$  и  $131^\circ$  соответственно. Согласно [156] глубина природного земного ударного кратера связана с диаметром кратера соотношением  $h_c/D_c = 0,20$ . Наблюдения ансамблей кратеров примерно одно-

го возраста на одном и том же астероиде дают разброс, обусловленный прежде всего различием свойств участков поверхности астероида. Согласно [157] распределение  $h_c/D_c$  для ансамбля из примерно 500 кратеров в диапазоне размеров от 3 до 63 км на астероиде 4 Vesta (Веста) соответствуют распределению по Гауссу в диапазоне 0,05–0,4 с максимумом 0,18. В дальнейшем мы примем данное значение. В натурном космическом эксперименте DART угол раствора конуса выброса определён как  $125^\circ \pm 10^\circ$  [158]. В классической работе [159], в которой обобщается большой опыт натурных и теоретических экспериментов, показано, что рассчитанные скорости выброса нечувствительны к углу выброса. Следовательно, при моделировании можно принять простую схему выброса в полусферу ( $\alpha = 180^\circ$ ) с одной (для данного размера частиц) скоростью.

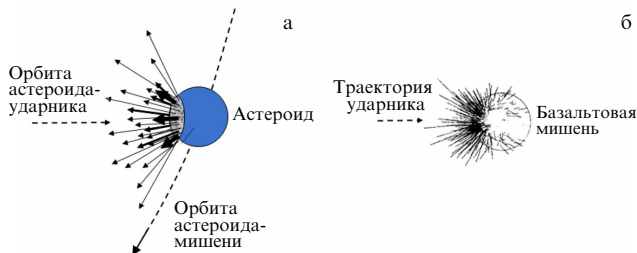
При столкновении из кратера выбрасывается вещество массой  $M_c$ . Её можно оценить, предполагая конечную структуру кратера:  $M_c = (\pi/18) \times D_c^2 h_c \rho_t$ , где  $\rho_t$  — средняя плотность мишени. Размер кратера зависит от энергии (скорости и массы) ударника. Режим образования кратеров на небольших астероидах (менее  $\sim 10$  км) при характерной прочности  $Y \sim 1$  кПа и ударниках размером не более 100 м является прочностным (см. более подробно в [145]). Размеры такого кратера (диаметр кратера  $D_c$ ) можно оценить с использованием выражения из [160],

$$D_c = 2,06 r_p \left( \frac{\rho_t V_p^2}{Y} \right)^{0,205} \left( \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0,40}, \tag{5}$$

где  $r_p$  и  $V_p$  — радиус и скорость ударника,  $\rho_t$  и  $\rho_p$  — плотности астероида-мишени и ударника соответственно. Массу  $M_c$  вещества, выброшенного из кратера, можно оценить из

$$M_c \approx \frac{0,274 r_p^3 V_p^{1,23} \rho_t^{1,615}}{Y^{0,615}} \left( \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{1,2} \text{ кг.} \tag{6}$$

Это оценочная формула. Зависимость от  $\rho$  довольно сильная, но сама плотность астероидов варьируется не очень существенно, в пределах  $\sim (1-5) \times 10^3 \text{ кг м}^{-3}$ , так что фактор  $\rho^{1,615}$  может дать разброс примерно в поря-



**Рис. 24.** (а) Схема вылета частиц (фрагментов) из кратера, образовавшегося при столкновении астероидов. (б) Векторы скоростей (без стрелок) фрагментов, образовавшихся при бомбардировке базальтовой мишени в лабораторном эксперименте [154].

док величины. Для разных веществ вариации прочности  $Y$  от астероида к астероиду могут составлять несколько порядков величины (например, такие различия возможны у астероидов С и М классов), к тому же и структура астероидов может быть весьма различной — от "кучи щебня и пыли" до монолита [161]. Так что фактор  $Y^{0,615}$  тоже может дать разброс не менее порядка величины. Правда, оба указанных фактора (плотность и прочность), вероятно, работают "навстречу" друг другу, так как менее плотные объекты обычно являются менее прочными. В целом, использовать формулу (6) можно, что называется, "по порядку величины", если  $\rho$  и  $Y$  заранее неизвестны. Для дальнейшего рассмотрения примем, что  $\rho_p = \rho_t = \rho$ . Приняв типичные значения  $\rho = 2000 \text{ кг м}^{-3}$  и  $Y = 1 \text{ кПа}$  (примерно таковы оценки по результатам космических экспериментов для астероидов 25143 Itokawa (Итокава), 101955 Bennu (Бенну), 162173 Ryugu (Рюгу)), получим оценочное выражение

$$M_c \approx 839 r_p^3 V_p^{1,23} \text{ кг.} \quad (7)$$

Для примера оценим массу выброшенного вещества при соударении астероида-мишени с ударником размером  $r_p = 5 \text{ м}$  со скоростью  $V_p = 5000 \text{ м с}^{-1}$ . Получим  $M_c = 3,72 \times 10^9 \text{ кг}$ . Примерно такое же количество твёрдого вещества (пыли) выделяют за период прохождения перигелийной зоны некоторые кометы. Интересно применить формулу (6) для оценки массы выброса в эксперименте DART. Согласно [162] в момент удара масса КА, т.е. ударника, была 580 кг, скорость 6,14 км  $\text{с}^{-1}$ . Авторы работы [162] оценили плотность астероида в  $2400 \text{ кг м}^{-3}$ . Приведённый к этой плотности эффективный радиус ударника будет 0,73 м. Применяя (6), получим  $M_c \approx 2,63 \times 10^3 \text{ т}$ . Близкая априорная оценка (5 тыс. т) дана в [163]. Апостериорные оценки  $M_c$  изменяются в диапазоне 1–10 тыс. т. В общем, повторим — можно использовать формулы (6) и (7) для оценки  $M_c$  "по порядку величины".

Формулы (6) и, соответственно, (7) применимы не во всём диапазоне размеров и скоростей ударников. Согласно [164] (см., например, табл. 3.3 из указанного классического пособия) в (суб)миллиметровом диапазоне размеров ударников отношение выброшенной массы к массе ударника примерно такое же, как и для более крупных ударников (несколько тысяч), а вот для ударников микронного размера данное отношение близко к 1–5. В [165] изучались микрократеры в обычном натриево-известковом стекле при бомбардировке микроударниками из полистирола низкой плотности ( $1,06 \text{ г см}^{-3}$ ) с массами от 0,7 до 62 пг и скоростями от 2 до 14 км  $\text{с}^{-1}$ . При нормальном падении общая смещённая масса  $M_e$  материала мишени на единицу кинетической энергии снаряда медленно увеличивается вместе с кинетической энергией ударника  $E$  как  $M_e = 230 E^{1,1}$  пг (здесь  $E$  измеряется в мкДж). Последнее означает, что при ударе снаряда массой 50 пг со скоростью 5 км  $\text{с}^{-1}$  будет выброшена масса 115 пг. При оценке массы выброса это нужно учитывать.

Выброс вещества из родительского тела со скоростью, превышающей скорость убегания, приводит к образованию комы из выброшенных фрагментов, в которой изначально много очень мелких частиц (микронного и субмикронного размера). В исследованиях выбросов частиц при ударах распределение частиц по размерам

описывается аппроксимационным степенным выражением вида  $dn \propto r^{-s_r} dr$ , где  $dn$  — число частиц, значения радиусов  $r$  которых лежат в интервале  $[r, r + dr]$  и характеризуется минимальным и максимальным размерами (радиусами)  $r_{\min}$  и  $r_{\max}$  и наклоном (индексом)  $s_r$ . Степенной спектр масс частиц выглядит аналогично, его индекс  $s$  связан с  $s_r$  как  $s_r = 3s - 2$ . Здесь спектры представлены в дифференциальной форме, в кумулятивной форме значения индексов меньше на 1. Значения  $s < 2$  ( $s_r < 4$ ) указывают на то, что в более крупных (массивных) частицах содержится большая часть массы ансамбля частиц, а значения  $s > 2$  ( $s_r > 4$ ) указывают на то, что большая часть массы сосредоточена в мелких частицах.

Исследованиям спектра масс фрагментов, образующихся в результате разрушительных столкновений между твёрдыми телами, посвящено множество работ. Согласно моделям [166–169] индекс спектра масс фрагментов астероида, образовавшихся при высокоскоростном ударе,  $s = 1,7–2$ . Важную информацию дают лабораторные и натурные эксперименты. Для изучения столкновительной эволюции астероидов и моделирования их фрагментации при соударении проводились экспериментальные исследования по разрушению твёрдых тел при высокоскоростном ударе. Было выполнено много экспериментов по удару более мелкого тела (ударника) о более крупное (мишень) для изучения масс (размеров), форм, скоростей и вращения образовавшихся в результате разрушения мишени фрагментов (см. обзор в [170]). Экспериментальные исследования проводились для разных форм, размеров, структур и материалов мишени (базальты, гипс, пиррофиллит, керамика, цементные смеси, стекло, искусственно созданные конгломераты, образцы метеоритов — обыкновенные и углистые хондриты) и для разных скоростей, форм и материалов ударника. Согласно [171] по результатам большинства экспериментов значения  $s$  лежат в диапазоне 1,65–1,88 и соответственно  $s_r$  в диапазоне 2,95–3,64. По результатам эксперимента DART спектр выброшенных частиц  $s_r = 2,7 \pm 0,2$  [158]. Согласно обзору [171] пылевые и метеороидные частицы, сталкивающиеся с Землёй, описываются в диапазоне масс менее 1 г спектром размеров с индексом  $s_r \approx 3,2$ . Имея в виду этот разброс, при моделировании процесса выброса частиц при ударе можно считать неким средним оценочным значением  $s_r = 3,3$ . Очевидно, что при  $s_r > 3$  площадь сечения ансамбля частиц растёт с уменьшением  $r$  и общий вклад мелких частиц (при условии  $x \equiv 2\pi r/\lambda 1$ ) в рассеяние потока солнечного излучения становится значительнее.

Мелкие частицы выбрасываются с большими, чем более крупные частицы, скоростями. Как и в спектрах масс и размеров частиц, многие исследователи используют степенную форму связи размера (радиуса)  $r$  выброшенных при ударе частиц и скорости выброса  $v$  в виде  $v(r) \propto r^{-\beta}$ . В [148] проведён обзор моделей и экспериментов по определению спектра скоростей фрагментов, образующихся при высокоскоростных ударах, и приводится некоторое среднее значение  $\beta \approx 0,5$ .

Мелкие частицы после выброса рассеиваются относительно быстро из-за их относительно высокой скорости, поэтому существенное увеличение яркости объекта (астероида) из-за появления пылевой комы и последующий спад блеска происходят на короткой шкале времени. Более крупные частицы также формируют околоасте-

роидные структуры (например, хвосты), которые вносят более скромную добавку в общий блеск, но эта добавка уменьшается со временем гораздо медленнее. Пример — кривая блеска двойного астероида 65803 Didymos (Дидим) во время столкновения с КА DART, приведённая на рис. 2 в [172]. Появление комы из самых быстрых (мелких) частиц обусловило "вспышку" на шкале времени  $\sim 10$  мин. Более крупные частицы выбрасываются с меньшими скоростями, и из них образовался ансамбль в виде "хвоста", который затем относительно медленно (в течение нескольких недель) рассеялся по орбите и образовал метеороидный поток. Отметим, что характерное время рассеяния пылевой комы зависит от размера объекта, поскольку скорости разлёта пылинок данного размера практически одинаковы для мишеней любых размеров. Время рассеяния в первом приближении примерно пропорционально размеру астероида-мишени и для  $\sim 100$  км тела время рассеяния может измеряться уже сутками.

### 3.3. Критические энергии механизмов инициирования сублимационно-пылевой активности астероидов на примере астероида 145 Адеона и частота проявления сублимационно-пылевой активности в ансамбле астероидов

Рассмотрим условия, при которых СПА астероида может стать обнаружимой. Понятно, что, поскольку измеряется относительное изменение блеска объекта, количество выброшенных частиц, создающих явление СПА, должно быть больше для более крупных тел. Поэтому рассмотрение должно проводиться для конкретного класса размеров астероидов. Описываемые выше наблюдения (см. таблицу) проведены для астероидов размером  $\sim 100$  км.

В [145] рассмотрено приложение результатов проведённого выше анализа к конкретному астероиду 145 Адеона таксономического класса С. Наблюдения астероида обсуждаются в разделе 2.1. Для удобства и логичности изложения отчасти повторим некоторые необходимые сведения об астероиде. По данным [173], диаметр этого астероида  $D_t = 144$  км, плотность  $\rho_t = 1520$  кг м<sup>-3</sup>, альbedo 0,048. Наличие сублимационно-пылевой экзосферы у астероида 145 Адеона было обнаружено в сентябре 2012 г. за один год (или  $\sim 0,25$  периода обращения) до прохождения перигелия [65]. Повышение отражательной способности 145 Адеоны в сентябре 2012 г. по сравнению с 2004 г. составило: в полосе В 21,7% (см. рис. 5). Хотя вклад отражения от пылевой компоненты, как правило, оценивают по полосе R, использование полосы В для такой оценки позволило показать на качественном уровне преобладание мелких ( $\sim 0,1$  мкм) частиц в пылевой экзосфере 145 Адеоны. Более поздние (в 2021 г.) наблюдения астероида 145 Адеона (см. рис. 9) также показали повышение отражательной способности 145 Адеоны в полосе В по сравнению с 2004 г., но оно уже составило  $\sim 10\%$ .

Для оценки фотометрических особенностей введём фактор  $\gamma$  изменения освещённости, создаваемой на Земле астероидом в видимой части спектра, вследствие выброса пыли и образования отражающей свет пылевой экзосферы. Как отмечено выше, для 145 Адеоны в полосе В  $\gamma \simeq +0,1$ . Это означает, что в околоастероидное пространство должно быть выброшено количество твёрдых частиц, обеспечивающее увеличение световой энергии,

отражённой системой астероид + пылевая экзосфера, в  $(1 + \gamma)$  раз. Рассмотрим оба упоминавшихся выше варианта механизма появления пылевого вещества в окрестности астероида-мишени: 1) выброс при ударе (столкновительный механизм) и 2) кометоподобная активность вскрытых при ударе льдосодержащих слоёв (столкновительно-сублимационный механизм).

**3.3.1. Столкновительный механизм.** Проведём простую оценку необходимой массы выброса в столкновительном механизме исходя из изменения оптических характеристик объекта. Введём понятие оптического сечения астероида как величины, равной произведению геометрического сечения астероида на его отражающую способность (альbedo), т.е.  $0,25 \times \pi D_t^2 A_t$ , где  $D_t$  — диаметр астероида,  $A_t$  — альbedo его поверхности. В качестве альbedo планет, астероидов и т.д. обычно берут геометрическое альbedo. Оптическое сечение ансамбля пылинок вычислим в предположении, что оно равно сумме оптических сечений пылинок, т.е. сумме геометрических сечений пылинок, умноженной на отражательную способность  $A_d$  пылевых частиц. Поскольку мы имеем дело с мелкими частицами (размер соизмерим с длиной волны), то понятие геометрического альbedo в обычном смысле здесь уже неприменимо. Тем не менее, как показало сравнение абсолютных звёздных величин состоящих из аморфного углерода пылинок радиусом  $r = 0,09 - 2,8$  мкм, вычисленных по точной теории (см. [130], в частности, рис. 5 из указанной работы), с "геометрическим" приближением оптического сечения пылинок, оптические сечения можно в широком диапазоне фазовых углов ( $0 - 40^\circ$ ) представить в виде  $A_d \pi r^2$ , где  $A_d = 0,092$ . Это в 2 раза более высокое значение по сравнению с альbedo  $A_t$  астероида 145 Адеона. Отметим, что в [174] на основе моделей поляризации кометной пыли показано, что отражательная способность пыли может в несколько раз превышать стандартную (для ядра кометы). Поскольку здесь рассматриваются относительные изменения в спектрах отражения астероидов, можно использовать параметрический подход с  $A_t/A_d$  в качестве параметра. Для астероида 145 Адеона можно принять  $A_t/A_d = 0,5$ .

Для обоснования упрощённого подхода к анализу отражательных свойств ансамбля пылинок — пылевой экзосферы астероида — важно также отметить, что соблюдаются необходимые для такого подхода условия: малая оптическая толщина пылевого слоя (меньше  $\sim 0,3$ ) и "независимость" частиц, т.е. достаточно большое расстояние между частицами (больше трёх размеров частицы) [175].

Как отмечалось выше, распределение (пылевых) частиц по размеру принято представлять в виде  $dn(r) \propto r^{-s_r} dr$ , где  $r$  — радиус частицы. В [176] по наблюдениям кометы 67P/Чурюмова – Герасименко получено, что  $s_r = 4$  для крупных частиц и принимает меньшие значения для мелких частиц. Аналогичный тренд обсуждается в [177]. Отмечено, что в коме кометы 81P/Wild распределение частиц пыли размером от 0,1 до 10 мкм описывается показателем  $s_r = 2,89$ , но для частиц большего размера значение  $s_r$  существенно выше. Заметим, однако, что спектр размеров самых мелких частиц — быстро меняющаяся после выброса величина, так как на мелких частицах намного быстрее и сильнее проявляются динамические эффекты, искажающие (уменьшающие) началь-

ное (на момент отделения частиц от родительского тела) значение  $s_r$ . В общем, как уже отмечено в разделе 3.2, для дальнейших оценок можно принять для мелких частиц значение  $s_r = 3,3$ . Такое распределение на качественном уровне верно задаёт основной вклад в рассеяние субмикронными и микронными частицами. Более конкретно, в дальнейшем рассмотрении примем  $s_r = 3,3$  для частиц пыли радиусом от 0,1 до 10 мкм и  $s_r = 4$  для более крупных частиц.

Общую площадь  $S_d$  оптического сечения всех пылинок в диапазоне размеров  $r_{\min} - r_{\max}$  можно получить из выражения

$$S_d = C \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^{-3,3} A_d \pi r^2 dr = \frac{1}{0,3} C \pi A_d \left( \frac{1}{r_{\min}^{0,3}} - \frac{1}{r_{\max}^{0,3}} \right). \quad (8)$$

Здесь  $r_{\min} = 0,1$  мкм,  $r_{\max} = 10$  мкм. Для ещё более мелких пылинок, размеры которых существенно меньше длины волны, эффективность рассеяния в видимом диапазоне спектра очень мала (см., например, [115]), и вкладом этого компонента пыли в оптике можно пренебречь. При  $r_{\max} \gg 10$  мкм значение  $S_d$  практически не зависит от  $r_{\max}$ . Из выражения (8) видно, что основной вклад в  $S_d$  дают мелкие частицы. Рассеивающая площадь пылинок 0,1–10 мкм более чем в 4 раза больше рассеивающей площади всех частиц размером крупнее 10 мкм, и вкладом крупных частиц также можно пренебречь.

Оценим массу выброшенной пыли  $M_d$ , необходимую для того, чтобы обеспечить заданное отношение  $\gamma$  общей площади оптического сечения пылинок к площади оптического сечения астероида. Из соотношения  $S_d = \gamma \times 0,25\pi A_t D_t^2$  найдём  $C$  и затем получим

$$M_d = C \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^{-3,3} \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_d dr \approx \frac{\pi}{7} \gamma D_t^2 \rho_d \frac{A_t}{A_d} r_{\min}^{0,3} r_{\max}^{0,7}. \quad (9)$$

Приняв  $A_t/A_d = 1/2$ ,  $\gamma = 0,1$  и  $\rho_d = 1500$  кг м<sup>-3</sup>, из данной формулы получим для Адеоны  $M_d \simeq 1,6 \times 10^3$  т. Общая масса выброса, конечно, больше. Формула (9) для оценки общей массы выброса неприменима, поскольку, как указывалось выше, в диапазоне размеров  $r > 10$  мкм  $s_r \approx 4$ , и зависимость  $M_d$  от  $r_{\max}$  становится намного слабее (пропорциональной  $\ln(r_{\max}/r_{\min})$ ). При характерном размере самых крупных частиц  $\sim 1$  м общая масса выброса примерно на порядок больше ( $\sim 1,8 \times 10^4$  т). Используя характеристики астероида 145 Адеона как мишени, оценим объём выброшенного вещества. Он соответствует объёму кратера конической формы диаметром 42 м и глубиной 8 м. Согласно (5) при принятом для 145 Адеоны "среднемарсианском" значении  $Y = 5$  кПа и плотности ударника, равной плотности мишени, получим, что для образования такого кратера необходимо, например, соударение с ударником радиусом 0,82 м на скорости 4,5 км с<sup>-1</sup>. Кинетическая энергия такого ударника  $3,5 \times 10^{10}$  Дж. Это значение можно считать "критическим" для столкновительного механизма, т.е. минимально достаточным для того, чтобы при ударе выброшенная пыль давала картину сублимационно-пылевой активности масштаба наблюдавшейся у астероида 145 Адеона. В дальнейшем изложении для величины критической энергии ударника используем обозначение  $E_{p, \text{crit}}$ .

**3.3.2. Столкновительно-сублимационный механизм.** Как отмечалось выше, в пользу кометного (столкновительно-сублимационного) механизма свидетельствует корреляция активности ряда астероидов с положением на орбите в области перигелия. Количество периодов обращения, на которых астероид сохраняет активность, может быть больше одного (для 145 Адеоны СПА наблюдалась в трёх прохождениях области перигелия). Рассмотрим столкновительно-сублимационный вариант несколько подробнее.

Для оценки размера кратера, точнее площади вскрытой ударом льдосодержащей поверхности, обеспечивающей кометный механизм выброса пыли в околоастероидное пространство, нужно иметь оценку темпа выброса пыли с такой поверхности. Наиболее подходящий аналог — кометы, у которых перигелийные расстояния близки к перигелийному расстоянию для 145 Адеоны (2,28 а.е.) и, следовательно, условия инсоляции сходны. В [178, 179] приводятся данные о темпе потери пыли для десятка таких комет. Средний темп потери пыли варьируется от 2,1 кг с<sup>-1</sup> для кометы 115P/Maury (размер ядра 2,2 км) до 87,5 кг с<sup>-1</sup> для кометы 81P/Wild 2 (размер ядра  $\sim 4$  км). Очень близкие параметры орбиты с орбитой астероида 145 Адеона имеет активный астероид/комета P/2015 X6 [180]. Это небольшой астероид (размер  $\sim 1$  км), в пике активности терявший пыль с темпом 1–1,6 кг с<sup>-1</sup>. Пиковые значения темпа потери пыли (на перигелийном участке орбиты) на порядок выше: согласно [178, 179] для кометы 115P/Maury — 45 кг с<sup>-1</sup>, для кометы 81P/Wild 2 — 900 кг с<sup>-1</sup>.

Нужно помнить, что речь идёт о кометных ядрах различных размеров, у которых к тому же доля (по площади) активной области (областей) может существенно различаться. Если полагать активной половину площади ядра кометы, то пиковый удельный темп потери массы пыли  $\dot{m}_d$  для обсуждавшихся в предыдущем абзаце комет варьируется от  $\sim 7$  до  $\sim 20$  кг с<sup>-1</sup> км<sup>-2</sup>. Для большинства комет доля площади активных областей на порядок меньше, и, соответственно,  $\dot{m}_d$  в активных областях существенно выше. По-видимому, можно полагать, что свежевскрытые льдосодержащие области на астероидах по удельной сублимационной активности сравнимы с активными зонами комет. Далее для оценок "по порядку величины" примем значение  $\dot{m}_d = 50$  кг с<sup>-1</sup> км<sup>-2</sup>.

При обсуждении формулы (9) было сделано заключение, что для обеспечения увеличения потока отражённого от астероида 145 Адеона видимого солнечного излучения на фактор  $1 + \gamma$  нужно иметь в экзосфере астероида  $M_d \simeq 1,6 \times 10^3$  т пыли. Поскольку характерное динамическое время существования пылевой экзосферы  $\sim 0,01$  год, темп выброса пыли должен быть  $\sim 5$  кг с<sup>-1</sup> при  $\dot{m}_d = 50$  кг с<sup>-1</sup> км<sup>-2</sup>, а площадь активной поверхности должна быть  $\sim 0,1$  км<sup>2</sup> и, соответственно, диаметр вскрытой поверхности (кратера) для обеспечения такого темпа должен быть довольно большим:  $D_c \sim 0,37$  км. Глубина кратера при этом будет несколько десятков метров. Согласно (5) для образования кратера такого размера на астероиде 145 Адеона ударник при скорости 4,5 км с<sup>-1</sup> должен быть относительно крупным ( $r_p \approx 6$  м). Соответствующее значение критической энергии для активации обнаружимой СПА в результате действия столкновительно-сублимационного механизма  $E_{p, \text{crit}} \sim 10^{13}$  Дж.

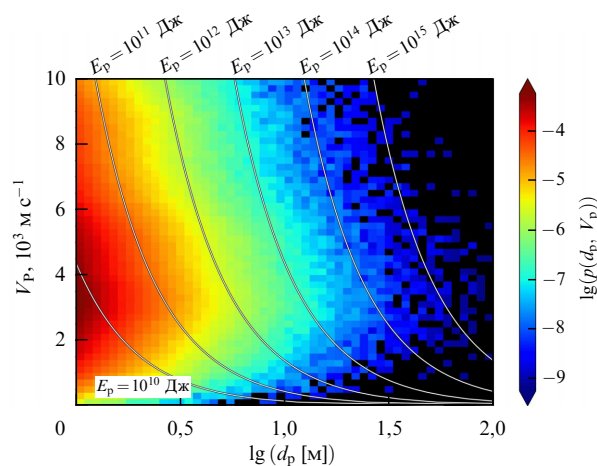
**3.3.3. Частота критических столкновений.** Вопрос о частоте достаточно эффективных столкновений сводится к вопросу о частоте столкновений с ударниками, кинетическая энергия которых превышает  $E_{p,crit}$  для данного астероида-мишени. Рисунок 25 характеризует распределение небольших (диаметр  $d_p < 100$  м) астероидов ГПА по размерам и скоростям сближений. Распределение по размерам таких астероидов получено по модельной зависимости (показана красной линией на рис. 22). Распределение относительных скоростей представлено на рис. 21. По этой информации получено распределение (точнее, плотность распределения) астероидов по диаметру и относительной скорости  $p(d_p, V_p)$  — нормированное на  $N_0$  — общее число астероидов) количество астероидов в ячейке размером  $1 \text{ м} \times 1 \text{ м с}^{-1}$ , центрированной на значения  $d_p, V_p$ . Собственно, данное распределение и показано на рис. 25. Также показаны изолинии для некоторых заданных значений кинетической энергии ударников. Интегрируя  $p(d_p, V_p)$  по области справа от указанных линий, получаем оценку доли  $\phi(> E)$  астероидов-ударников с энергией больше заданной. На рисунке 26 показан вид функции  $\phi$ . Показаны линии, на которых значение кинетической энергии ударника равно  $E_{p,crit} = 3,5 \times 10^{10}$  Дж и  $10^{13}$  Дж, что примерно соответствует критическим значениям энергии (для столкновительного и столкновительно-сублимационного механизмов активации соответственно), полученным для астероида 145 Адеона.

Согласно модели населения астероидов ГПА (снова обратимся к рис. 22), число астероидов в диапазоне диаметров 1–100 м составляет  $N_0 = 8,4 \times 10^{11}$ , а общее количество астероидов-ударников, имеющих энергию выше критической,  $N_{p,crit} = \phi N_0$ . Теперь, для конкретного астероида-мишени можно по аналогии с (2) определить темп столкновений с астероидами-ударниками, для которых выполняется условие  $E > E_{p,crit}$ , из выражения

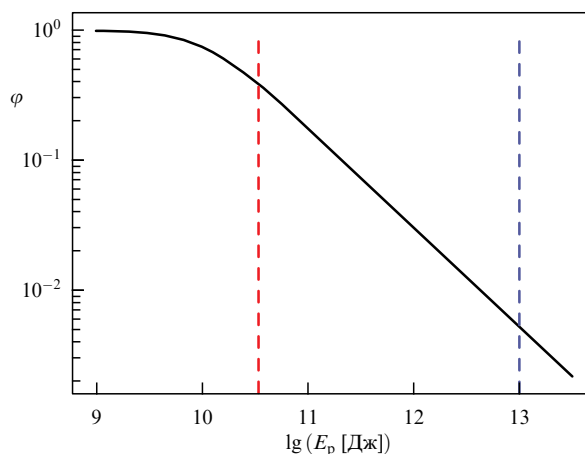
$$N_{col}(> E_{p,crit}) = \langle P_1 \rangle \pi r_t^2 N_{p,crit} = \langle P_1 \rangle \pi r_t^2 \phi N_0. \quad (10)$$

Оценим темп соударений астероида 145 Адеона с телами (ударниками) с кинетической энергией, превышающей  $3,5 \times 10^{10}$  Дж. Для  $P_1 = 21,5 \times 10^{-18} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$  по формуле (10) получим, что Адеона испытывает  $\sim 0,28 \times \phi$  критических столкновений в год. Для  $E_{p,crit} = 3,5 \times 10^{10}$  Дж из зависимости, показанной на рис. 26, получаем  $\phi = 0,4$  и окончательно имеем для Адеона примерно 0,1 критических столкновений в год. В ГПА около 300 крупных астероидов размером крупнее 100 км, и поскольку частота критических столкновений для каждого из таких астероидов составляет  $\sim 0,1$  в год, в течение года критические столкновения испытывают как минимум несколько десятков объектов из этой группы астероидов. Для оценки частоты наблюдаемых проявлений СПА важное значение имеет время жизни феномена активности. По оценке (см. раздел 3.2) время жизни обнаружимой пылевой экзосферы для 100 км мишени составляет несколько суток ( $\sim 0,01$  год). То есть можно ожидать, что частота наблюдаемых проявлений СПА, вызванных столкновительным механизмом, может составлять  $\sim 0,3$  событий в год.

Теперь оценим темп соударений Адеона с телами (ударниками) с кинетической энергией, превышающей  $10^{13}$  Дж. Как отмечалось выше, темп критических стол-



**Рис. 25.** Распределение  $p(d_p, V_p)$  потенциальных ударников по размерам и скоростям. Показаны изолинии некоторых значений кинетической энергии ударников.



**Рис. 26.** Доля  $\phi$  астероидов с (кинетической) энергией, превышающей значение  $E_p$ . Красной штриховой линией отмечено значение критической энергии  $E_{p,crit} = 3,5 \times 10^{10}$  Дж. Синей штриховой линией отмечено значение критической энергии  $E_{p,crit} = 10^{13}$  Дж (пояснения в тексте).

кновений определяется значением фактора  $\phi$ . Из зависимости, показанной на рис. 26, получим  $\phi = 0,005$  и, соответственно, Адеона испытывает  $\sim 1,4 \times 10^{-3}$  таких критических столкновений в год. Это не так мало, если учесть, что длительность периода сублимации, т.е. период активности  $\Delta t \sim 1$  год. Так что если все крупные ( $D > 100$  км) астероиды примитивных типов (их около 200) содержат подповерхностные льды, то можно ожидать, что частота наблюдаемых проявлений СПА, вызванных столкновительно-сублимационным механизмом, может составлять  $\sim 0,3$  событий в год.

В абсолютных единицах такие показатели частоты наблюдаемых проявлений СПА выглядят заниженными по сравнению с наблюдениями (см. раздел 2.1). Это может быть связано с тем, что в обсуждаемой модели занижено число ударников. Как видно из рис. 22, для описания населения ударников взята самая нижняя кривая. По другим моделям число ударников может быть на пару порядков больше. И ещё раз напомним, что оценки наблюдаемых проявлений СПА получены лишь по

порядку величины, поскольку в модели использованы такие важные, но неточно известные параметры, как  $s_r$ , время жизни наблюдаемой пылевой экзосферы,  $\dot{m}_d$  и др. Тем не менее это первая попытка объяснить статистику наблюдаемых проявлений СПА на основе физических моделей.

Полагаем, для объяснения проявлений СПА применимы как столкновительный, так и столкновительно-сублимационный механизмы, однако данный вывод требует уточняющих подтверждений в дальнейших наблюдениях, поскольку статистика наблюдений пока ещё недостаточна, и, конечно, нужны более совершенные модели.

### 3.4. Выводы по разделу

1. Выброс пыли при столкновениях астероидов, проявляющийся как СПА астероидов, может быть обусловлен как непосредственно соударением тел (столкновительным механизмом), так и сублимацией льдов с поверхности, вскрытых при ударе до льдосодержащих слоёв (столкновительно-сублимационным механизмом).

2. Представлены результаты первой попытки объяснить статистику наблюдаемых проявлений СПА на основе физических моделей. Модели требуют уточнения.

3. Статистика наблюдательных проявлений СПА астероидов пока ещё накоплена недостаточно для получения более точных моделей. Ключевым аспектом может стать долговременная программа регулярных наблюдений СПА астероидов.

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку работы (грант № РФФ 22-12-00115).

### Список литературы

- Бусарев В В, Барабанов С И, Пузин В В *Астрон. вестн.* **50** 300 (2016); Busarev V V, Barabanov S I, Puzin V V *Solar Syst. Res.* **50** 281 (2016)
- Busarev V V et al., in *48th Lunar and Planetary Science Conf., 20–24 March 2017, Texas, USA* (LPI Contribution, No. 1964) (Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 2017) p. 1919
- Бусарев В В и др. *Астрон. вестн.* **53** 273 (2019); Busarev V V et al. *Solar Syst. Res.* **53** 261 (2019)
- Щербина М П и др. *Науч. труды Ин-та астрономии РАН* **7** (1) 93 (2022)
- Farinella P et al. *Nature* **371** 314 (1994)
- Gladman B, Michel P, Froeschlé C *Icarus* **146** 176 (2000)
- Золотарев Р В, Шустов Б М *Астрон. журн.* **98** 518 (2021); Zolotarev R V, Shustov B M *Astron. Rep.* **65** 518 (2021)
- Murray C D, Dermott S F *Solar System Dynamics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000) <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174817>
- Sharp T G, de Carli P S "Shock effects in meteorites", in *Meteorites and the Early Solar System II* (Eds D S Lauretta, H Y McSween (Jr.)) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2006) p. 653
- Goswami J N *New Astron. Rev.* **48** 125 (2004)
- Ghosh A "Asteroidal heating and thermal stratification of the asteroidal belt", in *Meteorites and the Early Solar System II* (Eds D S Lauretta, H Y McSween (Jr.)) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2006) p. 555
- McCoy T J, Mittlefehldt D W, Wilson L "Asteroid differentiation", in *Meteorites and the Early Solar System II* (Eds D S Lauretta, H Y McSween (Jr.)) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2006) p. 733
- Schorghofer N *Astrophys. J.* **682** 697 (2008)
- Rusol A V, Dorofeeva V A *Open Astron.* **27** 175 (2018)
- Sugita S et al. *Science* **364** eaaw0422 (2019)
- Westphal A J et al. *Astrophys. J.* **694** 18 (2009)
- Filacchione G et al., arXiv:2210.02741; in *Comets III* (Eds K J Meech et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2024) p. 315
- Chandler C O et al. *Publ. Astron. Soc. Pacific* **130** 114502 (2018)
- Harris I, Daniel L *Popular Astron.* **58** 93 (1950)
- Elst E W et al. *IAU Circ.* (6456) 1 (1996)
- Hsieh H H et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **403** 363 (2010)
- Jewitt D, Hsieh H, Agarwal J "The active asteroids", in *Asteroids IV* (Eds P Michel, F E DeMeo, W F Bottke) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2015) p. 221
- Campins H et al. *Nature* **464** 1320 (2010)
- Rickman H, Gustafson B Å S, Fernández J A, in *Asteroids, Comets, Meteors III. Proc. of a Meeting, AMC 89, Uppsala Univ., June 12–16, 1989* (Eds C I Lagerkvist, H Rickman, B A Lindblad) (Uppsala: Uppsala Univ., 1990) p. 423
- Fitzsimmons A et al. *Nat. Astron.* **2** 133 (2018)
- Whitchurch A *Nature Geosci.* **3** 309 (2010)
- Briani G, Morbidelli A, Gounelle M *Meteor. Planet. Sci. Suppl.* **73** 5241 (2010)
- Gounelle M, in *European Planetary Science Congress 2012, 23–28 September, 2012, Madrid, Spain*, id. EPSC2012-220
- Barucci M A, Michel P, in *EPSC-DPS Joint Meeting 2019, 15–20 September 2019, Geneva, Switzerland*, id. EPSC-DPS2019-202
- Jewitt D, Hsieh H H, arXiv:2203.01397; in *Comets III* (Eds K J Meech et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2024) p. 767
- Dones L et al. *Space Sci. Rev.* **197** 191 (2015)
- Jewitt D *Astron. J.* **137** 4296 (2009)
- Chandler C O "Chasing tails active asteroid, Centaur, and Quasi-Hilda discovery with astroinformatics and citizen science", Ph.D. Thesis (Flagstaff, AZ: Northern Arizona Univ., 2022); Northern Arizona Univ. ProQuest Dissertations Publ. 29324763 (2022)
- Greenberg R et al. *Icarus* **135** 64 (1998)
- Yamamoto T *Astron. Astrophys.* **142** 31 (1985)
- Snodgrass C et al. *Astron. Astrophys. Rev.* **25** 5 (2017) <https://doi.org/10.1007/s00159-017-0104-7>
- Cheng A F *Icarus* **169** 357 (2004)
- Bottke W F et al. "The collisional evolution of the main asteroid belt", in *Asteroids IV* (Eds P Michel, F E DeMeo, W F Bottke) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2015) p. 701
- Bottke W F, Jutzi M "Collisional evolution of the main belt as recorded by Vesta", in *Vesta and Ceres. Insights from the Dawn Mission for the Origin of the Solar System* (Cambridge Planetary Science, Eds S Marchi, C A Raymond, C T Russell) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2022) p. 250, <https://doi.org/10.1017/9781108856324.020>
- Jewitt D et al., in *American Astronomical Society, DPS Meeting #42* (2010) id. 53.03; *Bull. Am. Astron. Soc.* **42** 1072 (2010)
- Moreno F et al. *Astrophys. J.* **738** 130 (2011)
- Bodewits D et al. *Astrophys. J. Lett.* **733** L3 (2011)
- Chapman C R, Mosher J A, Simmons G J. *Geophys. Res.* **75** 1445 (1970)
- Schorghofer N *Icarus* **276** 88 (2016)
- Grundy W M, Stansberry J A *Icarus* **148** 340 (2000)
- Lauretta D S et al. *Science* **366** eaay3544 (2019)
- Bottke W F et al. *J. Geophys. Res.* **125** e2019JE006282 (2020)
- Lowry S C et al. *Science* **316** 272 (2007)
- Granvik M et al. *Nature* **530** 303 (2016)
- Wiegert P et al., in *American Astronomical Society Meeting #236* (2020) id. 326.03; *Bull. Am. Astron. Soc.* **52** (3) (2020)
- Ryabova G O, in *European Planetary Science Congress 2008, 21–26 September, Münster, Germany* (2008) id. 226
- Ohtsuka K et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **61** 1375 (2009)
- Li J, Jewitt D *Astron. J.* **145** 154 (2013)
- Hui M-T, Li J *Astron. J.* **153** 23 (2017)
- Ozaki N et al. *Acta Astronautica* **196** 42 (2022)
- Rennilson J J, Criswell D R *Moon* **10** 121 (1974)
- Nimmo F et al. *Nature* **447** 289 (2007)

58. Nathues A et al. *Nat. Astron.* **4** 794 (2020)
59. Hamilton V E et al. *Nat. Astron.* **3** 332 (2019)
60. Hainaut O R et al. *Astron. Astrophys.* **563** A75 (2014)
61. Kelley M S P et al. *Nature* **619** 720 (2023)
62. Garrod R T *Astrophys. J.* **884** 69 (2019)
63. Chandler C O et al. *Astrophys. J. Lett.* **892** L38 (2020)
64. Palmer E M et al. *Planet. Sci. J.* **2** 182 (2021)
65. Busarev V V et al. *Icarus* **262** 44 (2015)
66. Housen K R et al. *Icarus* **39** 317 (1979)
67. Busarev V V et al. *Icarus* **369** 114634 (2021)
68. Бусарев В В и др. *Астрон. вестн.* **57** 439 (2023); Busarev V V et al. *Solar Syst. Res.* **57** 449 (2023)
69. Sanchez J A et al. *Planet. Sci. J.* **2** 205 (2021)
70. Vachier F, Carry B, Berthier J *Icarus* **382** 115013 (2022)
71. Lazzaro D et al. *Icarus* **172** 179 (2004)
72. Bendjoya P *Astron. Astrophys. Suppl.* **102** 25 (1993)
73. Arredondo A et al. *Icarus* **358** 114210 (2021)
74. Zappalà V et al. *Icarus* **116** 291 (1995)
75. Belskaya I et al. *Astron. Astrophys.* **663** A146 (2022)
76. Avdellidou C et al. *Astron. Astrophys.* **665** L9 (2022)
77. Belskaya I et al. *Icarus* **284** 30 (2017)
78. Tholen D, in *Asteroids II. Proc. of the Conf., Tucson, AZ, March 8–11, 1988* (Eds R P Binzel, T Gehrels, M S Matthews) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 1989) p. 1139
79. Bus S J, Binzel R P *Icarus* **158** 146 (2002)
80. Bottke W F (Jr.) et al., in *Asteroids III* (Eds W F Bottke (Jr.) et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2002) p. 3
81. Burns R G *Mineralogical Applications of Crystal Field Theory* (Cambridge Topics in Mineral Physics and Chemistry, Vol. 5) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993) <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524899>
82. Nesvorný D, Brož M, Carruba V, in *Asteroids IV* (Eds P Michel, E DeMeo, W F Bottke) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2015) p. 297
83. Novaković B et al. *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **134** 34 (2022)
84. Dermott S F, Nicholson P D *Highlights Astron.* **8** 259 (1989)
85. Nesvorný D, Vokrouhlický D *Astron. J.* **132** 1950 (2006)
86. Durda D D, Dermott S F *Icarus* **130** 140 (1997)
87. Licandro J et al. *Astron. Astrophys.* **525** A34 (2011)
88. Rivkin A S, Emery J P *Nature* **464** 1322 (2010)
89. Usui F et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **71** 1 (2019)
90. McKay A J, Bodewits D, Li J-Y *Icarus* **286** 308 (2017)
91. Landis M E et al. *Bull. Am. Astron. Soc.* **53** 180 (2021) <https://doi.org/10.3847/25c2feb.ebd48157>
92. Бусарев В В и др. *Астрон. вестн.* **56** 92 (2022); Busarev V V et al. *Solar Syst. Res.* **56** 84 (2022)
93. Бусарев В В и др. *Астрон. вестн.* **58** 317 (2024); Busarev V V et al. *Solar Syst. Res.* **58** 315 (2024)
94. Lee P *Icarus* **124** 181 (1996)
95. Zank G P, Matthaeus W H *J. Geophys. Res.* **97** 17189 (1992)
96. Kellogg P J, Horbury T S *Ann. Geophys.* **23** 3765 (2005)
97. Malaspina D M et al. *Astrophys. J.* **711** 322 (2010)
98. Бусарев В В и др. *Астрон. вестн.* **58** 724 (2024); Busarev V V et al. *Solar Syst. Res.* **58** 715 (2024)
99. Bradley J P, Sandford S A, Walker R M "Interplanetary dust particles", in *Meteorites and the Early Solar System* (Eds J F Kerridge, M S Matthews) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 1988) p. 861
100. Bradley J "The astromineralogy of interplanetary dust particles", in *Astromineralogy* (Lecture Notes in Physics, Vol. 609, Ed. T K Henning) (Berlin: Springer, 2003) p. 217
101. Kolokolova L et al. "Physical properties of cometary dust from light scattering and thermal emission", in *Comets II* (Eds M C Festou, H U Keller, H A Weaver) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2004) p. 577
102. Güttler C et al. *Astron. Astrophys.* **630** A24 (2019)
103. Petrova E V, Jockers K, Kiselev N N *Icarus* **148** 526 (2000)
104. Kimura H, Kolokolova L, Mann I *Astron. Astrophys.* **407** L5 (2003)
105. Петрова Е В, Тишковец В П, Йокерс К *Астрон. вестн.* **38** 354 (2004); Petrova E V, Tishkovets V P, Jockers K *Solar Syst. Res.* **38** 309 (2004)
106. Lasue J et al. *Icarus* **199** 129 (2009)
107. Lumme K, Penttilä A *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112** 1658 (2011)
108. Dlugach J M, Mishchenko M I, Mackowski D W *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112** 1864 (2011)
109. Dlugach J M et al. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **205** 80 (2018)
110. Zubko E, Shkuratov Yu, Videen G *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **150** 42 (2015)
111. Liu L, Mishchenko M I *Remote Sens.* **10** 1634 (2018)
112. Kolokolova L, Nagdimunov L, Mackowski D *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **204** 138 (2018)
113. Hansen J E, Travis L D *Space Sci. Rev.* **16** 527 (1974)
114. Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002)
115. Ysard N et al. *Astron. Astrophys.* **617** A124 (2018)
116. Tishkovets V P, Petrova E V *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **252** 107116 (2020)
117. Петрова Е В, Бусарев В В *Астрон. вестн.* **57** 166 (2023); Petrova E V, Busarev V V *Solar Syst. Res.* **57** 161 (2023)
118. Mannel T et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **462** S304 (2016)
119. Mackowski D W *Appl. Opt.* **34** 3535 (1995)
120. Mackowski D W, Mishchenko M I *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 2266 (1996)
121. Mackowski D W, Mishchenko M I *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112** 2182 (2011)
122. Warren S G, Brandt R E *J. Geophys. Res.* **113** D14220 (2008)
123. Dorschner J et al. *Astron. Astrophys.* **300** 503 (1995)
124. Li A, Greenberg J M *Astron. Astrophys.* **323** 566 (1997)
125. Mishchenko M I, Travis L D *J. Geophys. Res.* **102** 16989 (1997)
126. Bockelée-Morvan D et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **462** S170 (2016)
127. Busarev V V et al. *Icarus* **304** 83 (2018)
128. Hendrix A R, Vilas F *Geophys. Res. Lett.* **46** 14307 (2019)
129. Ivanova O et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **525** 402 (2023)
130. Zubko E *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **492** 810 (2020)
131. Петрова Е В *Астрон. вестн.* **58** 198 (2024); Petrova E V *Solar Syst. Res.* **58** 196 (2024)
132. Mishchenko M I et al. arXiv:1010.1171; *Polarimetric Remote Sensing of Solar System Objects* (Kyiv: Akadempriodyka, 2010)
133. Marsch E *Living Rev. Solar Phys.* **3** (1) 1 (2006) <https://doi.org/10.12942/lrsp-2006-1>
134. Pinto R F, Brun A S, Rouillard A P *Astron. Astrophys.* **592** A65 (2016)
135. Ópik E J *Proc. R. Irish Acad. A* **54** 165 (1951)
136. Wetherill G W *J. Geophys. Res.* **72** 2429 (1967)
137. Farinella P, Davis D R *Icarus* **97** 111 (1992)
138. Vedder J D *Icarus* **131** 283 (1998)
139. Zain P S, de Elia G C, Di Sisto R P *Astron. Astrophys.* **639** A9 (2020)
140. Yoshikawa M, Nakamura T, in *Asteroids, Comets, Meteors 1993, IAU Symposium 160, June 14–18, 1993, Belgirate, Italy* (LPI Contribution, 810) (Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 1993) p. 322
141. Campo Bagatin A, in *Asteroids, Comets, Meteors, Proc. of the 229th Symp. of the Intern. Astronomical Union, Rio de Janeiro, Brasil August 7–12, 2005* (Proc. of the Intern. Astronomical Union, Vol. 1, Eds D Lazzaro, S Ferraz-Mello, J A Fernández) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006) p. 335
142. Díaz C G, Gil-Hutton R *Astron. Astrophys.* **487** 363 (2008)
143. Cibulková H, Brož M, Benavidez P G *Icarus* **241** 358 (2014)
144. Nagasawa M, Ida S, Tanaka H *Earth Planets Space* **53** 1085 (2001)
145. Шустов Б М и др. *Астрон. журн.* **99** 1058 (2022); Shustov B M et al. *Astron. Rep.* **66** 1098 (2022)
146. Peña J et al. *Astron. J.* **159** 148 (2020)

147. Davis D R et al. "Collisional evolution of small-body populations", in *Asteroids III* (Eds W F Bottke (Jr.) et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2002) p. 545
148. Золотарёв Р В, Шустов Б М *Астрон. журн.* **100** 879 (2023); Zolotarev R V, Shustov B M *Astron. Rep.* **67** 1019 (2023)
149. Harris A W, Harris A W *Icarus* **126** 450 (1997)
150. Hahn G et al., Technical Note, ESA/ESTEC Contract No. 4000106274 (2014)
151. Granvik M et al. *Icarus* **312** 181 (2018)
152. Nesvorný D et al. *Astron. J.* **166** 55 (2023)
153. Nesvorný D et al. *Icarus* **411** 115922 (2024)
154. Nakamura A, Fujiwara A *Icarus* **92** 132 (1991)
155. Адушкин В В, Христофоров Б Д *Физика горения и взрыва* **40** (6) 71 (2004); Adushkin V V, Khristoforov B D *Combust. Explos. Shock Waves* **40** 694 (2004)
156. Melosh H J *Impact Cratering: a Geologic Process* (New York: Oxford Univ. Press, 1989)
157. Vincent J-B et al., in *43rd Lunar and Planetary Science Conf., March 19–23, 2012, Woodlands, Texas* (LPI Contribution No. 1659) (Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 2012) p. 1415
158. Li J-Y et al. *Nature* **616** 452 (2023); arXiv:2303.01700
159. Housen K R, Holsapple K A *Icarus* **211** 856 (2011)
160. Holsapple K A, Housen K R *Icarus* **187** 345 (2007)
161. Sánchez P, Scheeres D J *Meteor. Planet. Sci.* **49** 788 (2014)
162. Terik Daly R et al. *Nature* **616** 443 (2023); arXiv:2303.02248
163. Moreno F et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **515** 2178 (2022)
164. Новиков Л С *Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты* (М.: Университетская книга, 2009)
165. Mandeville J-C, Vedder J F *Earth Planet. Sci. Lett.* **11** 297 (1971)
166. Dohnanyi J S J. *Geophys. Res.* **74** 2531 (1969)
167. Takasawa S et al. *Astrophys. J. Lett.* **733** L39 (2011)
168. Deller J "Hyper-velocity impacts on rubble pile asteroids", Ph.D. Thesis (Canterbury: Univ. of Kent, Intern. Max Planck Research School for Solar System Science, 2015); <https://kar.kent.ac.uk/54352>
169. Ševeček P et al. *Icarus* **296** 239 (2017)
170. Brykina I G, Egorova L A *Adv. Astron.* **2021** 9914717 (2021)
171. Drolshagen G et al. *Planet. Space Sci.* **143** 21 (2017)
172. Graykowski A et al. *Nature* **616** 461 (2023); arXiv:2303.05548
173. Vernazza P et al. *Astron. Astrophys.* **654** A56 (2021)
174. Zubko E, Videen G, Shkuratov Yu, in *47th Lunar and Planetary Science Conference, March 21–25, 2016, Woodlands, Texas* (LPI Contribution No. 1903) (Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 2016) p. 1145
175. van de Hulst H C *Light Scattering by Small Particles* (New York: John Wiley and Sons, 1957)
176. Fulle M et al. *Astrophys. J.* **821** 19 (2016)
177. Zubko E et al. *Astrophys. J.* **895** 110 (2020)
178. Pozuelos F J et al. *Astron. Astrophys.* **568** A3 (2014)
179. Pozuelos F J et al. *Astron. Astrophys.* **571** A64 (2014)
180. Moreno F et al. *Astrophys. J.* **826** 137 (2016)
181. Combi M R et al. *Icarus* **317** 610 (2019)
182. Bodewits D et al. *Astrophys. J.* **786** 48 (2014)
183. Bodewits D et al. *Astrophys. J. Lett.* **802** L6 (2015)
184. Xing Z et al. *Astrophys. J. Lett.* **893** L48 (2020)

### Novel views of asteroid activity: observations, models, forecasts

**B.M. Shustov**<sup>(1,a)</sup>, **V.V. Busarev**<sup>(1,2,b)</sup>, **E.V. Petrova**<sup>(3,c)</sup>, **M.P. Shcherbina**<sup>(1,d)</sup>, **R.V. Zolotarev**<sup>(1,e)</sup>

<sup>(1)</sup> *Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences,*

*ul. Pyatnitskaya 48, 119017 Moscow, Russian Federation*

<sup>(2)</sup> *Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute,*

*Universitetskii prosp. 13, 119234 Moscow, Russian Federation*

<sup>(3)</sup> *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,*

*ul. Profsoyuznaya 84/32, 117810 Moscow, Russian Federation*

*E-mail:* <sup>(a)</sup> [bshustov@inasan.ru](mailto:bshustov@inasan.ru), <sup>(b)</sup> [busarev@sai.msu.ru](mailto:busarev@sai.msu.ru), <sup>(c)</sup> [epetrova@cosmos.ru](mailto:epetrova@cosmos.ru),

<sup>(d)</sup> [morskayaa906@yandex.ru](mailto:morskayaa906@yandex.ru), <sup>(e)</sup> [rv\\_zolotarev@mail.ru](mailto:rv_zolotarev@mail.ru)

Concepts of the fundamental difference between comets and asteroids have recently been significantly adjusted. Several dozen Main Belt asteroids have exhibited signs of cometary activity (comas, tails), earning the name “Main Belt comets.” Using ground-based instruments, such active asteroids were detected primarily by imaging, so only the most pronounced manifestations of the activity of Main Belt asteroids have been observed. Undoubtedly, the number of asteroids with more moderate activity is incomparably larger. Detecting weak activity with ground-based instruments requires innovative approaches. The conventional method of broadband photometry and low-resolution spectroscopy turned out to be just such an effective tool. The use of this technique in [1–4] enabled a mass-scale study of a weak form of the activity of primitive-type asteroids, called sublimation-driven dust activity (SDA). SDA results in the formation of a temporary, fairly rarefied dust exosphere around the asteroid, detectable by broadband photometry. Modern concepts of active asteroids are reviewed. Attention is focused on manifestations of SDA and models of light scattering in dusty exospheres of asteroids. The mass character of SDA and its possible driving mechanisms are discussed.

**Keywords:** asteroids, active asteroids, sublimation activity, light scattering on dust particles, asteroid collisions

PACS number: 96.30.Ys

Bibliography — 184 references

*Received 20 June 2024, revised 22 July 2024*

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **195** (4) 344–376 (2025)

*Physics – Uspekhi* **68** (4) (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.08.039746>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.08.039746>