

УДАРНЫЕ СОБЫТИЯ КАК ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ АКТИВАЦИИ СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВОЙ АКТИВНОСТИ АСТЕРОИДОВ ГЛАВНОГО ПОЯСА

© 2022 г. Б. М. Шустов^{1, *}, Р. В. Золотарёв¹, В. В. Бусарев^{2, 1}, М. П. Щербина^{1, 2}

¹ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

² Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: bshustov@inasan.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.

После доработки 30.08.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

В [1, 2] и в других работах этих авторов показано, что сублимационно-пылевая активность ряда астероидов примитивных типов Главного пояса (ГПА) коррелирует с положением астероидов на перигелийном участке орбиты. Это приводит к предположению о том, что такая активность обусловлена сублимационным (кометным) механизмом, т.е. выбросом пылевых частиц с поверхности испаряющихся льдосодержащих слоев. Предполагается, что эти слои обнажаются вследствие соударений между астероидами ГПА. Однако при соударениях может происходить и прямой выброс пылевого вещества (ударный механизм). В данной работе рассмотрены оба механизма. Получена количественная оценка частоты и эффективности соударений. Показано, что частота столкновений астероидов-ударников, обладающих кинетической энергией более $(1-3) \times 10^{10}$ Дж (достаточной для выброса значительного количества пыли), с астероидом-мишенью диаметром ~ 100 км (на примере астероида 145 Адеона) составляет до $\sim 2 \text{ год}^{-1}$. При характерном времени проявления пылевой активности 0.01 года в случае ударного механизма из примерно 300 крупных астероидов ГПА диаметром более 100 км в любой момент времени несколько астероидов может находиться в активном состоянии. Отмечено согласие этой оценки с наблюдениями. Для обеспечения эффективности кометного механизма столкновения должны быть мощнее (характерная энергия 10^{13} Дж), чтобы вскрывать льдосодержащие слои на достаточно большой площади (до 0.1 кв. км). Частота мощных столкновений мала, но участки вскрытых льдосодержащих слоев существуют долго. Всплески солнечной активности и нагрев при прохождении астероида по перигелийному участку орбиты могут обеспечить наблюдаемую частоту проявлений сублимационной активности крупных астероидов ГПА примитивных типов (их насчитывается около 200). Согласно нашей модели, в каждый момент времени ~ 1 крупный астероид находится в активном состоянии. Нужны подтверждения в дальнейших наблюдениях.

Ключевые слова: астероиды, столкновения астероидов, активные астероиды, сублимационно-пылевая активность

DOI: 10.31857/S0004629922110184

1. ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с общепринятыми представлениями астероиды (тела с преимущественно силикатным составом вещества) и ядра комет (тела с преимущественно ледяным составом) рассматриваются как объекты разных классов. На основе исследований метеоритов астероидного происхождения установлено (например, [3] и ссылки там же), что астероиды – это фрагменты более крупных родительских тел, раздробленных при взаимных столкновениях. Такие тела еще в процессе своего формирования (на протяжении нескольких первых миллионов лет) испытали глубокие внутренние изменения, включая высоко-

температурную дифференциацию вещества, основным источником энергии которой стал распад короткоживущих изотопов – ^{26}Al , ^{60}Fe и др. (см. [4, 5]). Родительские тела астероидов, которые изначально включали значительную долю льдов (в основном H_2O и CO_2 с учетом типичных гелиоцентрических расстояний астероидов) под влиянием указанного процесса испытали только водную дифференциацию (см., например, [6]). Значительные запасы льдов в 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 тепло-

проводности поверхностных слоев, как следует из моделирования [7] и радиометрических измерений характеристик поверхности астероида С-типа 162173 Рюгу с космического зонда “Хаябуса-2” [8]. Преимущественной областью образования астероидов является внутренняя Солнечная система, где они концентрируются в торообразной структуре — Главном поясе астероидов (ГПА). Астероиды представляют собой каменные тела, не проявляющие какой-либо заметной активности. С другой стороны, ядра комет — это многочисленное подмножество планетезималей (кометезималей), образовавшихся и существующих в основном в области, которая простирается от планет-гигантов до внешних границ Солнечной системы. Как следствие, существует значительная разница в содержании летучих веществ в объектах обоих классов. Этот факт обеспечил наиболее очевидное различие между представителями этих двух классов: комета — это твердое тело (ядро), окруженное комой, образующейся в результате выделения летучих веществ, вызванного нагревом при приближении ядра к Солнцу, в то время как астероиды не проявляют такой сублимационной активности даже при приближении к Солнцу (или эта активность не была обнаружена ранее по причине ее слабых/нерегулярных проявлений).

Обычно еще упоминают различие в орбитальных характеристиках: орбиты комет более вытянутые чем у астероидов. Но это различие не имеет абсолютного характера. Как показано, например, в [9–11], в населении астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), многие тела в процессе относительно быстрой динамической эволюции (с характерным временем несколько миллионов лет) выходят на крайне вытянутые орбиты и даже сталкиваются с Солнцем. Как показано в работе [11], 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, превышающем радиус границы льдов, находится множество ледяных (льдосодержащих) тел, которые не проявляют себя как кометы, поскольку всегда находятся достаточно далеко от Солнца.

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 этот критерий для разделения комет и небольших астероидов невозможно.

Что касается сублимационной активности тел на примерно одинаковых орбитах, то и в этом от-

ношении четкость 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, [12]).

Эта кора из тугоплавких частиц может в итоге стать настолько толстой, что подповерхностные летучие вещества не смогут быть нагреты до температуры сублимации даже при прохождении перигелия на близком расстоянии (суущественно внутри границы льдов) от Солнца. В работе [13] показано, что даже при продолжительном (более 100 лет) нахождении короткопериодической кометы (рассмотрен пример кометы 67P/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, которое сохраняется в течение всего периода обращения кометы по орбите. Аналогичный результат получен в работе [14], в которой промоделирована тепловая история поверхностных слоев объекта 11/2017 U1 (Оумуамуа) во время его облета Солнца и продемонстрирована высокая живучесть подповерхностного льда. Еще один важный результат этой работы — модельный максимум температуры на глубине 30 см отмечается не в перигелии, а существенно позже (через 100 дней) после прохождения перигелия, причем он так и не достиг температуры сублимации льда H_2O , хотя в перигелии на поверхности объекта температура превышала 600 К. Так что даже если Оумуамуа в конце концов “записали” в астероиды, это не значит, что под его поверхностью не может содержаться некоторое количество льдов.

Даже спектральные (фотометрические) критерии не всегда дают однозначный ответ на вопрос, что мы наблюдаем: астероид или ядро старой кометы вне активной фазы. Поэтому в последние годы все чаще прибегают к понятию “астероидно-кометный континуум”, понимая под этим отсутствие жестких границ между свойствами этих объектов. Впервые термин “Comet-Asteroid Continuum” (в последние годы чаще используется вариант “Asteroid-Comet Continuum”) введен в [15], популярном изложении результатов работы [16]. Еще до появления в печати этих результатов, исходя из кометоподобной активности нескольких небольших астероидов, в том числе двух членов динамического семейства Фемиды, делались предположения о присутствии льда на/близ поверхности этих тел. В [16] эти предположения были подтверждены для астероида 24 Фемиды с помощью спектральных инфракрасных наблюдений. Присутствие поверхностного льда на Фемиде было несколько неожиданным из-за относительно короткого времени существования открытого

льда на этом расстоянии (~3.2 а.е.) от Солнца. Тем не менее эти результаты хорошо согласуются с обнаружением у Фемиды сублимационно-пылевой активности в марте 2019 г. практически в точке перигелия [2]. В ряде работ (см., например, [17–19]) обсуждаются различные аспекты астероидно-кометного континуума. Историю вопроса можно проследить в недавнем обзоре [20].

В течение последнего десятилетия такие открытия стали почти рутинной и среди астероидов Главного пояса был выделен новый класс объектов – так называемые “активные астероиды” или “кометы Главного пояса” – КГП (см. исторический обзор в [20]). Это тела (их пока известно несколько десятков), у которых были зарегистрированы хотя бы один раз выраженные признаки кометной активности (образование комы или хвоста). Такая хорошо детектируемая активность может возникать, как правило, при столкновениях астероидов, ведущих к (частичной) дезинтеграции этих тел, или при интенсивной сублимации льдов, содержащихся в теле астероида и извлеченных на поверхность астероида вследствие удара. Обсуждаются и другие механизмы (см., [21]), но все они слабы и требуют для активации весьма специфических условий.

Как показано в [22–24], распространенной (хотя и относительно более слабой и не проявляющейся так явно, как у КГП) может быть сублимационно-пылевая активность астероидов примитивных типов, ведущая к образованию у них временной, достаточно разреженной ($\tau \leq 0.5$) пылевой экзосферы, которая может быть обнаружена спектральным методом. Наблюдения активности астероидов проводились, главным образом, в области перигелия. Особый интерес представляет обнаружение одновременной сублимационной активности на нескольких астероидах примитивных типов: 145 Адеона, 704 Интерамния, 779 Нина, 1474 Бейра, 24 Фемида и 449 Гамбурга [2]. В этих работах сделано предположение, что наблюдавшееся формирование пылевой экзосферы у этих астероидов может быть обусловлено временной сублимацией H_2O льда, содержащегося в этих астероидах, который, по-видимому, выносится на поверхность вследствие частых столкновений с мелкими телами. Сублимация может происходить как в силу приближения астероида к Солнцу на перигелийном участке орбиты, так и вследствие солнечных вспышечных событий. Хотя такие события имеют спорадический и неизотропный характер, в случае их совпадения по пространственным параметрам и времени с наблюдаемыми астероидами, они могут влиять на поверхность астероидов, вызывая появление сублимационно-пылевой экзосферы и, соответственно, влияя на спектральные характеристики рассматриваемых объектов, как это было отмечено в [2] по результатам наблюдений трех одновре-

менно активных астероидов и численного моделирования их спектров отражения с использованием теории рассеяния света агрегатами частиц субмикронных размеров различного состава.

Как отмечалось выше, выброс пыли может быть обусловлен двумя основными механизмами: выбросом пыли при ударе (ударным механизмом) и уже описанным сублимационным (кометным) механизмом. Первый механизм более универсален, он не требует наличия льдов. Но образующаяся при ударе пылевая экзосфера астероида, состоящая из мелких пылевых частиц, быстро диссипирует, поэтому такие структуры обнаружить не так просто. По нашему мнению, чтобы выяснить относительный вклад этих механизмов в сублимационно-пылевую активность астероидов, эти механизмы нужно сравнивать на количественном уровне. Это основная задача данной работы.

Для решения этой задачи нужно получить количественные оценки (ответы), рассмотрев следующие вопросы:

1. Частота столкновений астероидов в ГПА.
2. Параметры кратеров (выбросов), образующихся при столкновениях. Частота столкновений с энергией, превышающей критическое значение, т.е. значение энергии, необходимой для выброса при ударе достаточного количества пыли или для вскрытия льдосодержащих слоев достаточной площади.
3. Согласие полученных теоретических оценок частоты событий с наблюдениями конкретных астероидов с проявлениями сублимационно-пылевой активности.

В разделе 2 описаны методика и результаты, полученные при поиске ответа на вопрос 1. Раздел 3 посвящен результатам исследований по вопросу 2. В разделе 4 получены закономерности применения к конкретному астероиду с сублимационно-пылевой активностью 145 Адеона. Выводы приведены в разделе 5.

2. ЧАСТОТА И СКОРОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ АСТЕРОИДОВ В ГПА

Столкновения астероидов в ГПА – постоянно протекающий процесс, влияющий на формирование спектра размеров (масс) астероидов и их орбитальную эволюцию. Столкновительная эволюция населения астероидов рассматривалась многими авторами (см., например, [25–27]). Такие исследования весьма важны для понимания многих аспектов происхождения и эволюции Солнечной системы и, в частности, ГПА. Но в контексте поставленной в данной работе задачи эволюционный аспект не столь важен, нам нужно знать фактический темп столкновений между астероидами различных размеров в нашу эпоху.

Прямых наблюдений таких событий мало. Зафиксировать столкновение – это элемент случайной наблюдательной удачи, примером которой является объект P/2010 A2. Сразу после открытия 6 января 2010 г. на наземном телескопе LINEAR и выполненных вскоре наблюдениях на телескопе им. Хаббла этот необычный объект рассматривался либо как представитель нового на тот момент динамического класса КГП, либо как проявление столкновения двух астероидов семейства Флоры. Вторая интерпретация получила признание [28]. Но, конечно, оценки темпа столкновений объектов в ГПА основаны не на таких редких наблюдениях, а на теоретических моделях.

Базовая аналитическая теория для расчета частоты и скорости столкновений была разработана в работах [29] и [30] и применялась многими исследователями в последующие годы (см., например, [31–33]). В качестве альтернативы различные авторы (см., например, [33, 34] и ссылки в обзоре [35]) 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 Δt принято оценивать по формуле вида (см., например, [35, 36]):

$$\langle N_{\text{col}}(>r_p) \rangle = \langle P_i \rangle (r_t + r_p)^2 \Delta t N_p(>r_p), \quad (1)$$

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 расчеты проведены в [37]. 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 (зоны Кибелы, со значениями большой полуоси 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. Для астероидов средней зоны (2.5–2.823 а.е.), куда входит обсуждаемый в разделе 4 астероид Адеона (большая полуось 2.67 а.е.), общая вероятность столкновения с астероидами всех зон по результатам [37] оценена как $21.5 \times 10^{-18} \text{ км}^{-2} \text{год}^{-1}$.

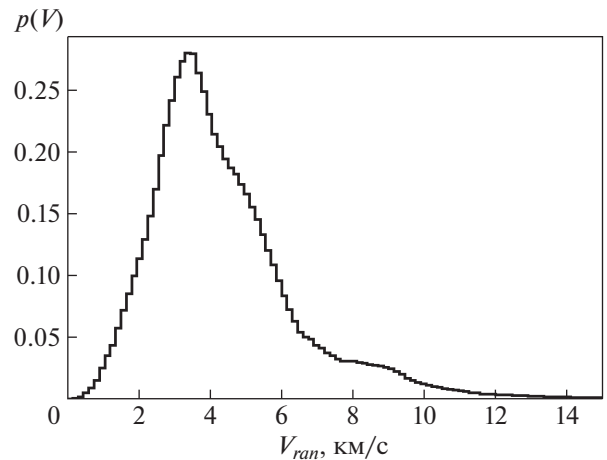


Рис. 1. Распределение случайных скоростей V_{ran} , рассчитанных по формуле (2), для астероидов ГПА.

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 достаточное количество пыли для проявления в наблюдениях или на астероиде-мишени будут обнажены подповерхностные (льдосодержащие) слои на достаточно большой площади. Для оценки скоростей сближений можно воспользоваться оценкой случайных (по отношению к круговому движению) скоростей. Согласно [38] случайная скорость V_{ran} оценивается из

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

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 км/с. Эта оценка хорошо согласуется с результатами динамического моделирования (численной модели сближений астероидов ГПА), представленными в [37].

Однако знание только лишь средней скорости сближения недостаточно для того, чтобы оценить последствия столкновений. Необходимо знать распределение скоростей. Чтобы выяснить форму этого распределения, мы выбрали из базы данных Центра малых планет (ЦМП) (<https://minorplanetcenter.net/>) данные об элементах орбит 1 178 752 астероидов ГПА и по формуле (2) определили соответствующие значения V_{ran} . Распределение $p(V)$ (относительного количества астероидов в интервалах скорости 1 км/с с центром на значении V_{ran}) показано на рис. 1.

Для оценки эффективности удара нужно знать не только скорость, но и размер (массу) ударника.

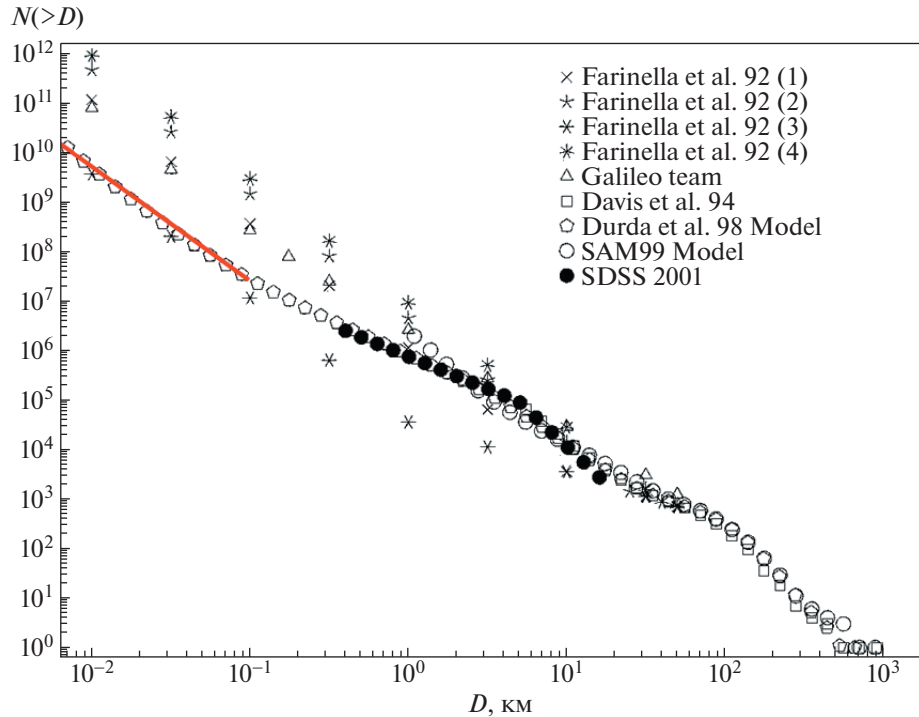


Рис. 2. Кумулятивное распределение астероидов ГПА по размерам (диаметру D). Красной прямой аппроксимировано модельное распределение астероидов $N(>D) \propto D^{-2.3}$ для значений $D < 100$ м.

Для статистических целей важно знать распределение астероидов по размерам и особенно астероидов малых размеров, которые рассматриваются нами как потенциальные ударники. 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 $D > 2$ км, для более мелких астероидов распределение по размерам остается предметом моделирования. Обычно распределение задают в степенном виде $N(>D) \propto D^{-q}$. До сих пор задача построения более-менее общепринятого распределения в этом диапазоне остается нерешенной и разнообразие моделей, к сожалению, означает разнообразие результатов. Согласно табл. 1 из [39] для астероидов меньшего размера у различных авторов q может принимать значения от 1.1 до 4.4! В дальнейшем мы принимаем для оценок показанное на рис. 2 распределение, приведенное в классическом обзоре [40]. Распределение астероидов диаметром менее 100 м аппроксимировано красной прямой, для которой $q = 2.3$ (конкретный вид зависимости $N(>D) = 8.4 \times 10^{11} D^{-2.3}$, где D измеряется в метрах). Интересно, что для астероидов, сближающихся с Землей, для всего диапазона D согласно [41] средний наклон распределения $N(>D)$ такой же.

Мы ограничились диапазоном $D = 1-100$ м. Количество астероидов N_0 в этом диапазоне по принятой модели составляет 8.4×10^{12} . По предварительным оценкам в этом диапазоне размеров многие ударники имеют кинетическую энергию, достаточную для выброса значительного количества пыли при ударе или вскрытия льдосодержащих слоев.

3. ЧАСТОТА СТОЛКНОВЕНИЙ С ЭНЕРГИЕЙ, ПРЕВЫШАЮЩЕЙ КРИТИЧЕСКУЮ, И ПАРАМЕТРЫ ОБРАЗУЮЩИХСЯ КРАТЕРОВ

Мы рассматриваем два основных пути появления пылевого вещества в окрестности астероида-мишени вследствие удара: 1) ударный механизм: выброс пыли при ударе и 2) кометный механизм: кометоподобная активность вскрытой при ударе льдосодержащей поверхности, когда астероид приближается к Солнцу на достаточное расстояние. Существенное различие этих вариантов состоит в том, что столкновение астероидов и соответствующие такому столкновению проявления происходят на любом участке орбиты. А вот кометообразная активность наиболее выражена в области перигелия. В [2, 24] и в других работах сублимационно-пылевая активность ряда астероидов отмечена на перигелийном участке орбиты,

что может означать, что эта активность обусловлена именно кометным механизмом, т.е. выбросом пылевых частиц с поверхности льдосодержащих слоев. Однако поскольку на других участках орбит спектральные наблюдения, позволяющие обнаружить разреженную пылевую экзосферу, вызванную сублимацией льдов [2], не проводились, назвать это предположение самым естественным нельзя, поскольку не исключено, что частота соударений с выбросом достаточного количества пыли при ударе относительно велика и статистически ударный механизм также пригоден для объяснения наблюдений. Собственно, это и есть основной предмет выяснения в данной работе.

Обсудим сначала параметры, от которых зависят диаметр и глубина образовавшегося при ударе кратера и, соответственно, количество выброшенной пыли. В наиболее общем и простом представлении размеры кратера зависят от характеристик ударника (размера, плотности, скорости удара), от характеристик астероида-мишени (плотности и прочности поверхностных слоев и силы тяжести на поверхности), а также от геометрических условий удара (угла соударения). В серии работ [42–44] проведен анализ законов масштабирования процессов кратерообразования. Придерживаясь изложенных в этих работах положений, рассмотрим два основных режима: образование кратеров на крупных телах, где существенную роль играет сила гравитации мишени (gravity-dominated, гравитационный режим), и образование кратеров на (относительно малых) телах, где роль гравитации по сравнению с ролью прочности верхних слоев мишени менее существенна (strength-dominated, прочностной режим). Обсудим различие между этими режимами подробнее, поскольку для оценки параметров образующихся ударных кратеров нам придется обосновать применение того или иного варианта.

В [42] приведен анализ условий реализации обсуждаемых режимов кратерообразования для Земли. Прочность поверхностных земных пород (обозначена Y) лежит в диапазоне от менее 0.01 МПа до десятков МПа и более (для монолитных камней без трещин). В дальнейшем под прочностью Y мы будем понимать ее существенную для мелкодисперсных сред (например, реголита) составляющую – когезионную прочность (когезию). С другой стороны, литостатическое (геостатическое) давление, определяемое весом столба вышележащих горных пород, обусловленное гравитационным полем Земли, при углублении на каждый метр растет на 0.03 МПа. Для земной почвы, состоящей из незатвердевшей глины ($Y \approx 0.1$ МПа), можно оценить, что если характерный размер области удара (размер ударника) менее ~ 1 м, то роль гравитационного поля можно пренебречь. Согласно [42] условие разграничения режимов $Y = \rho \times g \times l$, где ρ – плотность по-

роды, g – ускорение силы тяжести, l – характерный линейный масштаб (размер ударника). Если $Y/(\rho \times g \times l) > 1$, реализуется прочностной режим, если наоборот – гравитационный режим (см. о сравнении двух режимов в [45]). Приведем несколько примеров. Для лунного реголита когезия составляет 0.1–1 кПа [46], для аналогов верхних слоев марсианской почвы ~ 1 кПа [47]. В [48] проведен обзор свойств марсианской почвы. Механическая прочность для разных участков составила 1–15 кПа. И в случае Луны, и в случае Марса для ударников размером более ~ 1 м реализуется гравитационный режим. Для реголита астероида 162173 Югу прогнозировалось значение $Y \sim 0.1$ кПа, а ускорение силы тяжести на его поверхности примерно в 8000 раз меньше земного [49]. Так что, как ожидалось, ударный кратер, образовавшийся в проведенном на Югу эксперименте, должен был быть ограничен по размеру поверхностной прочностью, т.е. реализоваться прочностной режим. Однако в [50] по результатам видеофиксации процесса образования кратера сделан вывод, что все-таки характеристики кратера лучше согласуются с гравитационным режимом. Для того, чтобы в образовании кратера на Югу доминировала сила тяжести, эффективная прочность мишени должна быть менее 1.3 Па. Материалы почти без когезии, такие как песок, могут удовлетворить этому условию, так что поверхность Югу должна состоять из похожего на песок материала. Этот краткий экскурс приведен для того, чтобы показать, что, несмотря на общие правила масштабирования, в каждом конкретном случае нужно рассматривать свойства ударника и мишени.

Почти все изученные в работах [2, 24] астероиды имеют размеры ~ 100 км и характерное ускорение свободного падения порядка 0.01 земного, так что ожидается, что при образовании ударных кратеров из-за столкновения с ударниками размером менее ~ 10 м и при $Y \sim 1$ кПа и более выполняются условия прочностного режима. Размеры таких кратеров (диаметр кратера D_c) можно оценить с использованием следующего выражения для размера переходного кратера [51]:

$$D_c = 2.06 r_p \left(\frac{\rho_t V_p^2}{Y} \right)^{0.205} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0.40} (\cos \theta)^{0.34}, \quad (3)$$

где r_p и V_p – радиус и скорость ударника, ρ_t и ρ_p – плотности астероида-мишени и ударника соответственно. Если выполняется условие гравитационного режима образования кратера, то согласно [51] (см. также близкие выражения в [42, 52]):

$$D_c = 2.06 r_p^{0.83} g^{-0.17} V_p^{0.34} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0.332} (\cos \theta)^{0.44}, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения на мишени, θ – угол падения, измеренный от зенита. Среднее значение θ для нормальной составляющей (ответственной за кратерообразование) в изотропном распределении скоростей составляет 45° .

Массу M_c выброшенного из кратера вещества можно оценить, предполагая коническую структуру кратера: $M_c = \pi/12 \times D_c^2 \times h_c \times \rho_t$, где h_c – глубина кратера. Для Земли глубина кратера связана с диаметром весьма простым соотношением $h_c/D_c = 0.18$ [52]. Это отношение можно использовать для предварительной оценки глубины свежих кратеров и на других телах, хотя согласно данным наблюдений отмечается довольно существенный разброс. Наблюдения ансамблей кратеров примерно одного возраста на одном и том же астероиде дают разброс, обусловленный прежде всего различием свойств различных участков поверхностей. Для 101955 Бенну $h_c/D_c = 0.06–0.27$ [53]. В [54] показано, что среднее значение, стандартное отклонение и наблюдаемый диапазон h_c/D_c для всего набора кратеров на Югу составляют 0.09, 0.02 и 0.03–0.15 соответственно. Согласно [55] распределение h_c/D_c для ансамбля из примерно 500 кратеров в диапазоне размеров от 3 до 63 км на астероиде 4 Веста соответствует распределению по Гауссу в диапазоне 0.05–0.4 с максимумом 0.18. Широкое распределение наблюдается для кратеров, меньших 30 км, в то время как для более крупных кратеров распределение имеет вид довольно узкого пика, центрированного на 0.18.

Естественен вопрос о том, каковы должны быть диаметр и глубина кратера, чтобы было выброшено достаточное количество пыли или чтобы площадь обнаженной льдосодержащей поверхности была достаточной для проявления заметной сублимационной активности. Понятно, что если толщина коры равна h , то для достижения льда под корой нам нужно, чтобы соблюдалось условие $h_c \geq h$. Толщина пылевой коры у комет может меняться в довольно широких пределах. По результатам космического эксперимента Deep Impact на поверхности кометы 9P/TEMPEL1 толщина пылевой мантии оценивается в 1–2 м, в которой преобладают компактные пылевые агрегаты размером более десятков микрометров [56]. Толщина пылевой мантии на ядре кометы 67P/Чурюмова-Герасименко может быть до 10 см [57, 58]. Скорее всего, для активных астероидов (спящих комет) толщина пылевой мантии должна быть не меньше нескольких метров. Как следует из обсуждения во Введении, глубина поверхностной коры, под которой льды, если они там были, сохраняются практически при любых условиях, составляет примерно 10 м. Таким образом, ударник, образующий кратер диаметром 50–100 м, пробивает корку толщиной 10 м.

Для любого выбранного астероида-мишени (т.е. объекта с фиксированными значениями Y , g и ρ_t) выражение (3) и (4) можно преобразовать к виду,

$$D_c \propto r_p^{0.385} E_p^{0.205} \quad \text{и} \quad D_c \propto r_p^{0.320} E_p^{0.17}, \quad (5)$$

где E_p – кинетическая энергия ударника. Видно, что самая сильная зависимость диаметра кратера – это зависимость от энергии ударника. Можно ввести понятие критического диаметра $D_{c, \text{crit}}$, т.е. значения D_c , обеспечивающего площадь вскрытой льдосодержащей поверхности, достаточную для заметного проявления кометной активности, и соответствующей критической энергии $E_{p, \text{crit}}$, т.е. кинетической энергии ударника, для которой $D_c = D_{c, \text{crit}}$. Можно аналогично ввести $D_{c, \text{crit}}$ для ударного механизма. Оценки критических значений $D_{c, \text{crit}}$ и $E_{p, \text{crit}}$ будут рассмотрены ниже.

Вопрос о частоте достаточно эффективных столкновений в контексте данной статьи таким образом сводится к вопросу о частоте столкновений с ударниками, кинетическая энергия которых превышает $E_{p, \text{crit}}$ для данного астероида-мишени. На рис. 3 показано распределение небольших (диаметр $d_p < 100$ м) астероидов ГПА по размерам и скоростям. Распределение по размерам этих астероидов получено по модели (показано красной линией на рис. 2). Распределение относительных скоростей представлено на рис. 1. По этой информации получено распределение (точнее плотность распределения) астероидов по диаметру и относительной скорости $p(d_p, V_p)$. $p(d_p, V_p)$ – это нормированное (деленное на N_0) количество астероидов в ячейке размером $1 \text{ м} \times 1 \text{ м/с}$, центрированной на значения d_p, V_p . Это распределение показано на рис. 3. Показаны изолинии для некоторых заданных значений кинетической энергии ударников. Интегрируя $p(d_p, V_p)$ по области справа от этих линий, получаем оценку доли $\phi(>E)$ астероидов с энергией больше заданной. Проверочное интегрирование по всему диапазону параметров, естественно, дает 1. Понятно, что ϕ является функцией E и меняется от 1 (при предельно малом E) до 0 при предельно большом значении E . На рис. 4 показан вид функции ϕ . Показаны линии, на которых значение кинетической энергии ударника равно $E_{p, \text{crit}} = 10^{10}$ Дж и 10^{13} Дж. Обоснование выбора этих значений $E_{p, \text{crit}}$ см. в разделе 4.

Напомним, что согласно модели (см. обсуждение рис. 2) число астероидов в диапазоне диаметров 1–100 м составляет $N_0 = 8.4 \times 10^{11}$, а общее количество астероидов, имеющих энергию выше критической, $N_{p, \text{crit}} = \phi N_0$. Теперь, для конкретного астероида-мишени мы можем по аналогии с (1) определить темп столкновений с астероида-

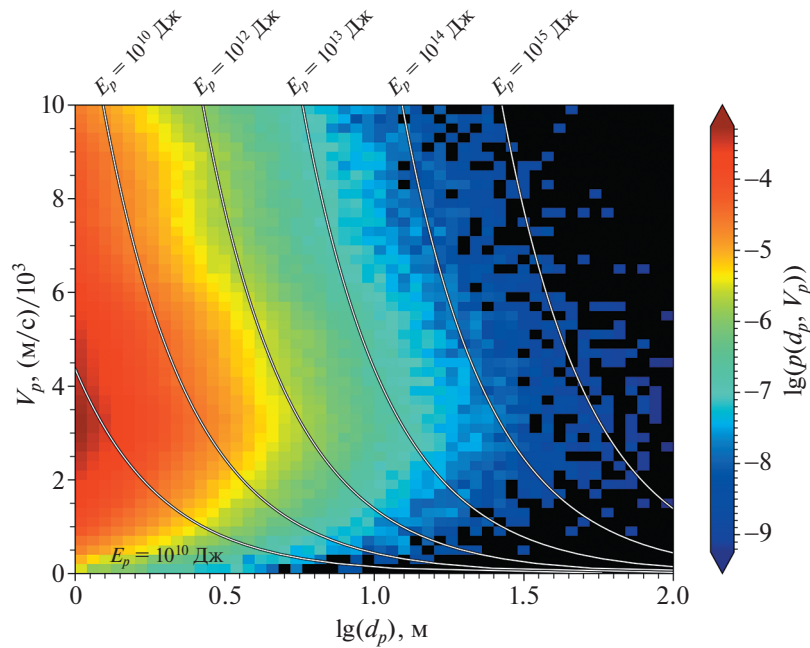


Рис. 3. Распределение $p(d_p, V_p)$ потенциальных ударников по размерам и скоростям. Показаны изолинии некоторых значений кинетической энергии ударников.

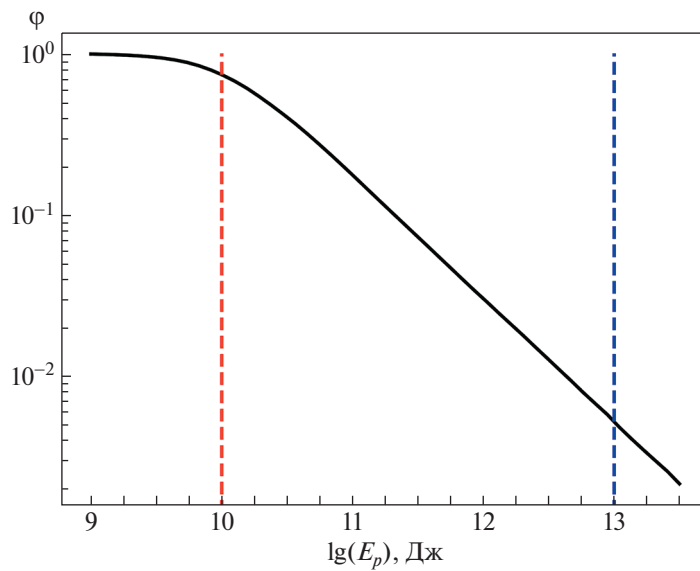


Рис. 4. Доля ϕ астероидов с (кинетической) энергией, превышающей значение E_p . Красной штриховой линией отмечено значение критической энергии $E_{p, \text{crit}} = 10^{10}$ Дж. Синей штриховой линией отмечено значение критической энергии $E_{p, \text{crit}} = 10^{13}$ Дж (пояснения в тексте).

ми-ударниками, для которых выполняется условие $E > E_{p, \text{crit}}$, из выражения

$$N_{\text{col}}(>E_{p, \text{crit}}) = \langle P_i \rangle \pi r_i^2 N_{p, \text{crit}} = \langle P_i \rangle \pi r_i^2 \phi N_0. \quad (6)$$

В следующем разделе проведены оценки частоты критических столкновений для конкретного астероида.

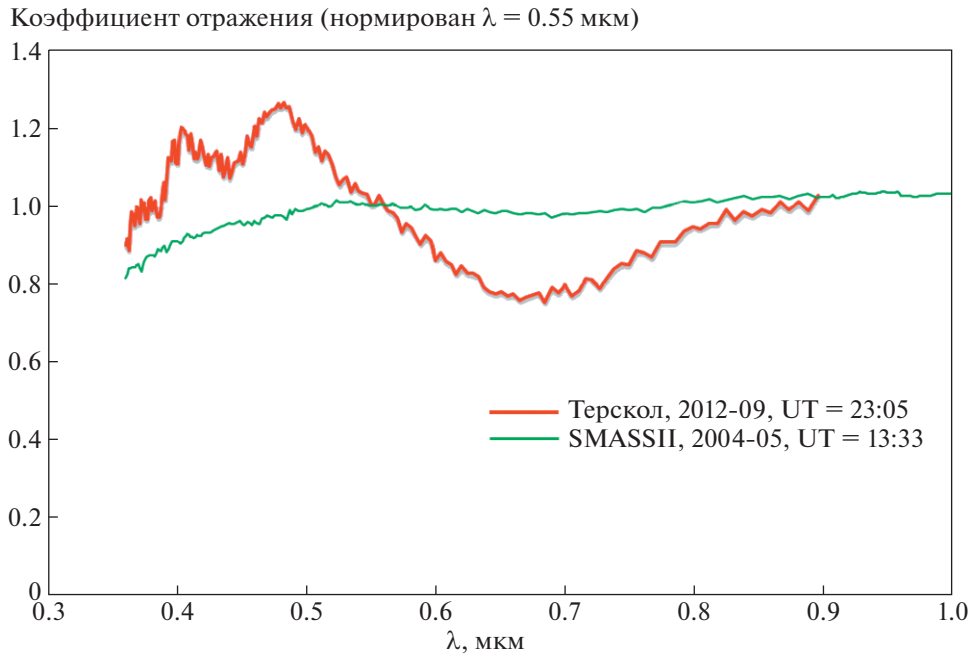


Рис. 5. Нормированный спектр отражения астероида 145 Адеона в период проявления активности (красная линия) и без признаков активности в 2004 г. (зеленая линия). Ссылки в тексте.

4. О ЧАСТОТЕ ПРОЯВЛЕНИЙ СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВОЙ АКТИВНОСТИ АСТЕРОИДОВ: ПРИМЕР — 145 АДЕОНА

Рассмотрим приложение результатов проведенного в разделах 2 и 3 анализа на конкретном примере астероида 145 Адеона таксономического класса С. По данным [59] диаметр этого астероида $D_t = 144$ км, плотность $\rho_t = 1520$ кг/м³, альbedo 0.048. Наличие сублимационно-пылевой экзосферы у астероида Адеона было обнаружено в сентябре 2012 г. за 1 год (или ~ 0.25 периода обращения) до прохождения перигелия [1]. Повышение отражательной способности Адеоны в сентябре 2012 г. по сравнению с ее спектром отражения в 2004 г. (SMASSII) составило: в полосе В (рассчитана свертка среднего спектра отражения астероида с функцией пропускания этой полосы) — 21.7%, во всем видимом диапазоне (0.38–0.77 мкм) — 12.5%, и в более широком диапазоне (0.38–1.65 мкм) — около 0.5%. Хотя вклад отражения от пылевой компоненты, как правило, оценивают по полосе R, использование полосы В для такой оценки позволило показать на качественном уровне преобладание мельчайших ледяных частиц в сублимационно-пылевой экзосфере 145 Адеоны.

По форме спектра отражения астероида можно отметить, что в 2004 г. у астероида отсутствовала пылевая экзосфера, а в период наблюдений 2012 г. (совпавшем с максимумом солнечной актив-

ности) она у него была. На рис. 5 представлен нормированный (на 0.55 мкм) спектр отражения астероида 145 Адеона (когда он был в активном состоянии). Спектр получен в сентябре 2012 г. в обсерватории на пике Терскол с помощью 2-м телескопа со спектрографом низкого разрешения ($R \sim 100$) [1]. Для сравнения также приведен спектр Адеоны, полученный в мае 2004 г., когда астероид был в неактивном состоянии (спектр взят из базы данных SMASSII <http://smass.mit.edu/data/smass/smass2/a000145.spfit.2.txt>).

Для дальнейшего рассмотрения введем фактор γ изменения освещенности, создаваемой на Земле астероидом в видимой части спектра, вследствие выброса пыли и образования отражающей пылевой экзосферы. Как отмечено выше, для Адеоны в оптическом диапазоне, включающем ближний ИК-диапазон, $\gamma \approx +0.1$. Это означает, что в околоастероидное пространство должно быть выброшено количество твердых частиц, обеспечивающих увеличение световой энергии в оптическом диапазоне, отраженной 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 и 2) кометоподобная активность вскрытых при ударе льдосодержащих слоев.

Проведем простую оценку массы выброса в ударном механизме, исходя из изменения оптических характеристик объекта. Введем понятие

оптического сечения астероида как величины, равной произведению геометрического сечения астероида на его отражающую способность (альбедо), т.е. $0.25\pi D_t^2 A_t$, 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. Для таких объектов при выполняющихся в нашей задаче условиях (согласно [60] это – малая оптическая толщина пылевого слоя (меньше 0.3) и “независимость” частиц, т.е. достаточно большое расстояние между частицами (больше 3 размеров частицы)) можно для расчета отраженного от пылевого облака потока излучения использовать оценки альbedo однократного рассеяния и неизотропности (асимметрии) рассеяния. И альbedo, и фактор асимметрии существенно зависят от размеров и оптических свойств частиц. Согласно [61] типичное значение альbedo для отражающих пылевых туманностей (основной вклад вносят пылинки размером ~ 0.1 мкм) в оптическом диапазоне ~ 0.6 . Среднее значение фактора асимметрии также близко к 0.6, т.е. межзвездные частицы рассеивают преимущественно вперед. Для мелкой пыли (радиус частицы 0.08 мкм) в протопланетных дисках альbedo в оптическом диапазоне ~ 0.4 , фактор асимметрии ~ 0.2 [62]. Для кометной пыли отражающую способность часто считают такой же, как у ядра кометы (т.е. низкую на уровне ~ 0.05), однако в [63] показано, что коэффициент отражения кометной пыли может быть в несколько раз больше стандартного. В целом отметим, что расчет A_d – непростая задача, мы планируем заняться ее решением позже. А пока используем параметрический подход, рассматривая отношение A_d/A_t как параметр. Как показал предварительный анализ, для дальнейшего рассмотрения можно принять, что значения A_d/A_t лежат в диапазоне 1–3.

В дальнейшем принимаем, что частицы распределены по закону $N(a) \propto a^{-n} da$, где a – радиус частицы. Дальнейшее рассмотрение выполнено в предположении, что $n = 4$. “Философское” обоснование такого распределения и обзор некоторых наблюдений см. в [64]. Определенную поддержку “философского” обоснования можно найти и в других работах. Например, в [65] по наблюдениям кометы 67P/Чурюмова-Герасименко получено, что $n = 4$ для крупных частиц и принимает меньшие значения для мелких частиц. Отметим, однако, что на мелких частицах намного сильнее про-

являются динамические эффекты, искажающее начальное (в момент ухода из ядра кометы) распределение по размерам (см. [66]).

Общую площадь S_d оптического сечения всех пылинок в диапазоне размеров $a_{\min} - a_{\max}$ при $a_{\min} \ll a_{\max}$ можно найти из выражения

$$S_d = C \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^{-4} A_d \pi a^2 da = C A_d \frac{\pi}{a_{\min}}. \quad (7)$$

Интервал рассматриваемых размеров частиц $a_{\min} - a_{\max}$ зададим из следующих соображений. Спектральные особенности в спектрах астероидов с сублимационно-пылевой активностью свидетельствуют о том, что в период активности в экзосфере астероидов появляется значительное количество именно мелкой пыли. Из выражения (7) видно, что основной вклад в S_d дают мелкие (параметр $x = 2\pi a/\lambda \approx 1$), но не очень мелкие ($x \ll 1$) пылинки. Очень мелкой пыли много и ее общая площадь значительна, но поскольку размеры таких пылинок существенно меньше длины волны, эффективность рассеяния на них в видимом диапазоне спектра очень мала (см., например, [67]) и вкладом этого компонента пыли в оптике можно пренебречь. Таким образом, приемлемая оценка для размеров мелкой пыли $a_{\min} = 0.1$ мкм. Для a_{\max} достаточным приближением является значение 0.5 м (соответствует минимальному размеру ударника, см. ниже). Согласно (7) крупные частицы практически ничего не вносят в площадь оптического сечения ансамбля пылинок. Да и зависимость (7) от a_{\max} слабая, так что результаты мало зависят от выбора этого параметра.

Оценим массу выброшенной пыли M_d , необходимую для того, чтобы обеспечить заданное отношение γ общей площади оптического сечения пылинок к площади оптического сечения астероида. Из соотношения $S_d = \gamma \times 0.25\pi A_t D_t^2$ найдем C :

$$C = \frac{1}{4} \gamma \frac{A_t}{A_d} D_t^2 a_{\min}$$

и затем

$$M_d = C \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^{-4} \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_t da = \frac{\pi}{3} \gamma \frac{A_t}{A_d} D_t^2 a_{\min} \rho_t \ln \left(\frac{a_{\max}}{a_{\min}} \right). \quad (8)$$

Приняв $A_d/A_t = 1/3$, по формуле (8) получим для Адеоны $M_d \approx 1695$ т. Кстати, если бы вся пыль была одного размера ($a = 0.1$ мкм), то хватило бы лишь 86 т. Объем выброшенного вещества соответствует объему кратера конической формы диаметром 27.5 м и глубиной 5.5 м. Согласно (3) при принятом для Адеоны “среднемарсианском” значении $Y = 5$ кПа получим, что для образования та-

кого кратера необходимо, например, соударение с ударником диаметром 1 м на скорости 4.5 км/с при плотности ударника 2000 кг/м^3 . Кинетическая энергия такого ударника 10^{10} Дж. Именно поэтому в разделе 3 мы задали значение критической энергии ударника 10^{10} Дж.

Не все это вещество (1695 т) покидает астероид, т.к. крупные фрагменты могут вернуться на поверхность астероида под действием гравитации, но мелкие частицы, имеющие большие скорости разлета и дополнительное существенное воздействие солнечного излучения, улетают и образуют динамическую пылевую экзосферу астероида. Согласно предварительным расчетам, выполненным по аналогии с [66], временная шкала жизни такой экзосферы не превышает несколько суток.

Оценим темп соударений Адеоны с телами (ударниками), с кинетической энергией, превышающей 10^{10} Дж. Для $P_i = 21.5 \times 10^{-18} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ по формуле (6), получим, что Адеона испытывает $\sim 0.28 \times \phi$ критических столкновений в год. Для $E_{p, \text{crit}} = 10^{10}$ Дж из зависимости, показанной на диаграмме 4, получаем $\phi = 0.75$ и окончательно имеем для Адеоны примерно 0.21 критических столкновений в год. Этот довольно высокий темп столкновений дает статистический аргумент в пользу ударного механизма. В ГПА около 300 крупных астероидов размером крупнее 100 км, и частота критических столкновений для каждого из таких астероидов составляет ~ 0.2 и более в год, следовательно, в год критические столкновения испытывают как минимум несколько десятков объектов из этой группы астероидов. Заметим, что мы взяли минимальную оценку числа астероидов размером < 100 м (см. рис. 2). Пока нет достаточных данных наблюдений, приходится опираться на модели, а по моделям, как видно из рис. 2, можно получить на порядок-два большее количество малых астероидов (потенциальных ударников). Отметим, что в работе [68] количество астероидов диаметром более 1 м оценено в 10^{13} , т.е. более чем на порядок больше принятого нами. Поэтому частоту критических столкновений для каждого из крупных астероидов ~ 2 и более в год нельзя считать нереалистичной. Для анализа частоты наблюдаемых проявлений обсуждаемой здесь активности астероидов важное значение имеет время жизни феномена активности. У астероида P/2010 A2 образовавшаяся вследствие удара обширная пылевая структура, состоящая из довольно крупных частиц, наблюдалась около года [28]. Рассматриваемая нами пылевая экзосфера состоит из мелких частиц (десятые доли мкм), она сохраняется в течение гораздо меньшего промежутка времени Δt . В течение этого промежутка астероид выглядит активным объектом. По предварительным расче-

там $\Delta t \approx 0.01$ года. Тогда в каждый момент времени проявление текущей пылевой активности можно ожидать у нескольких объектов из ансамбля крупных астероидов. Эта оценка по порядку величины согласуется со статистикой наблюдений. Согласно предварительному анализу наблюдательных данных, полученных в Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ в период 12/21–03/22 [69], из ~ 50 наблюдавшихся астероидов два проявили явные признаки активности, еще два – вероятные признаки.

Проведем аналогичную оценку частоты проявления активности крупных астероидов, приняв минимальное значение параметра $A_d/A_t = 1$. Поскольку необходимый объем пыли, выброшенной при ударе, увеличивается в три раза, нужны более энергичные, а значит и более редкие столкновения. Повторение выполненного выше расчета при $A_t/A_d = 1$ показало, что частота столкновений с энергией, превышающей критическую, уменьшается примерно в 2 раза. Тем не менее и эта оценка все еще находится в допустимых (для столь скудной наблюдательной статистики) пределах.

Как отмечалось выше, в пользу кометного (сублимационного) механизма свидетельствует некоторая корреляция активности с положением на орбите в области перигелия. Количество перигелийных обращений, на которых астероид сохраняет активность, может быть больше одного (для Адеоны сублимационно-пылевая активность наблюдалась в трех прохождениях области перигелия [1, 24]). Рассмотрим сублимационный вариант несколько подробнее.

Оценим размер кратера, точнее площадь вскрытой ударом льдосодержащей поверхности, обеспечивающей кометный механизм выброса пыли в околоастероидное пространство. Для этого нужно знать темп выброса пыли с такой поверхности. Наиболее подходящий аналог – кометы, у которых перигелийные расстояния близки к перигелийному расстоянию для Адеоны (2.28 а.е.) и, следовательно, условия инсоляции сходны. В [70, 71] приводятся данные о темпе потери пыли для десятка таких комет. Средний темп потери пыли варьируется от 2.1 кг/с для кометы 115P/Maury до 87.5 кг/с для кометы 81P/Wild 2. Пиковые значения темпа потери пыли (на перигелийном участке орбиты) на порядок выше. Если принять, что активна лишь половина площади ядра кометы (обычно доля активной площади много ниже, см. обсуждение в [66]), то удельный темп потери \dot{m}_d для этих комет в пиковом значении варьируется от 1 до 30 $\text{кг с}^{-1} \text{ км}^{-2}$.

Очень близкие параметры орбиты с орбитой Адеоны имеет активный астероид/комета P/2015 X6 [72]. Это небольшой астероид ($D \approx 1$ км), который в пике активности терял пыль с темпом

1–1.6 кг/с. Кстати, в работе [72] предпочтение отдается сублимационному механизму из-за корреляции активности P/2015 X6 с его положением на перигелийном участке орбиты.

При обсуждении формулы (8) было сделано заключение, что для обеспечения увеличения потока отраженного от астероида Адеона видимого солнечного излучения на фактор γ нужно в экзосферу астероида выбросить около 90 тонн мелкой пыли. Поскольку характерное динамическое время существования пылевой экзосферы ~ 0.01 г., темп выброса пыли должен быть ~ 0.3 кг/с. При значениях удельного темпа потери пыли вследствие сублимации $\dot{m} \approx 1\text{--}30$ кг с⁻¹ км⁻² площадь активной поверхности должна быть 0.3–0.01 км² и, соответственно, диаметр вскрытой поверхности (кратера) для обеспечения такого темпа должен быть довольно большим $D_c \sim 0.62\text{--}0.13$ км. Для образования кратера “среднего” размера ($D_c = 250$ м) ударник при скорости 4.5 км/с должен быть относительно крупным ($r_p \approx 5$ м). Соответствующее значение критической энергии 10^{13} Дж.

Теперь оценим темп соударений Адеоны с телами (ударниками), с кинетической энергией, превышающей 10^{13} Дж. Как отмечалось выше, темп столкновений определяется значением фактора ϕ . Из зависимости, показанной на рис. 4, получим $\phi = 0.005$ и, соответственно, Адеона испытывает 0.84×10^{-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 (см. обсуждение в начале раздела 4). Так что, если все крупные ($D > 100$ км) астероиды примитивных типов (их около 200) содержат подповерхностные льды, то можно ожидать, что в каждый данный момент один из этих астероидов находится в состоянии сублимационной активности. Пока что данных наблюдений недостаточно для получения уверенных статистических выводов. Нужны подтверждения в дальнейших наблюдениях.

5. ВЫВОДЫ

Выброс пыли при столкновениях астероидов в ГПА может быть обусловлен двумя основными механизмами: выбросом пыли при ударе (ударный механизм) и кометным механизмом, т.е. выбросом пылевых частиц в результате сублимации льдов с поверхности вскрытых при ударе льдосодержащих слоев. Мы рассмотрели и сравнили оба механизма. Поскольку оба из них активируются достаточно энергичными ударами (столкновениями) астероидов, мы оценили статистику таких столкновений.

Показано, что частота столкновений астероидов-ударников, обладающих достаточной кинетической энергией (10^{11} Дж) для выброса значи-

тельного (т.е. дающего заметные проявления в наблюдаемых спектрах) количества пыли, с астероидом-мишенью диаметром ~ 100 км составляет ~ 2 события в год. При характерном времени проявления пылевой активности, вызванной ударным механизмом, ~ 0.01 года из примерно 300 астероидов ГПА диаметром более 100 км в любой момент времени несколько астероидов находится в активном состоянии. Это заключение согласуется с наблюдениями, хотя статистика активности пока еще накоплена недостаточная. Ключевым аспектом для уточнения этого заключения может стать долговременная программа регулярных наблюдений обсуждаемых астероидов.

Для обеспечения эффективности кометного механизма столкновения должны быть мощнее (характерная энергия 10^{13} Дж), чтобы вскрывать льдосодержащие слои на достаточно большой площади. Показано, что этот механизм также может объяснить проявление сублимационно-пылевой активности астероидов ГПА, несмотря на меньшую частоту мощных столкновений. Если рассчитанная частота проявлений сублимационной активности крупных астероидов (в каждый момент времени ~ 1 астероид в активном состоянии) будет подтверждена в дальнейших наблюдениях, то в этом случае многие (если не все) астероиды примитивных типов можно условно рассматривать как объекты промежуточного типа между классическими астероидами с высокотемпературным составом вещества и кометами, т.е. объектами, являющиеся важной составляющей астероидно-кометного континуума.

Полученные оценки существенно зависят от принятых в модели значений параметров: распределения астероидов по размерам N_0 и q ; доли γ , на которую изменяется блеск астероида в заданном диапазоне длин волн; темпа выброса пыли \dot{m}_d в сублимационном варианте; от длительности Δt периода активности и, конечно, от физических и оптических свойств пыли. Здесь нужны дополнительные исследования. Важно получить ответы на следующие вопросы: как на количественном уровне связать наблюдаемые особенности спектров активных астероидов со следующими параметрами, в неполный список которых входят: размеры (распределение по размерам) пылинок, состав и оптические свойства пыли, геометрия расположения пыли при выбросе, динамическая эволюция пыли, единственность решения. Эти исследования запланированы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Е.В. Петровой за полезное обсуждение работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-12-00115.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. V. Busarev, S. I. Barabanov, V. S. Rusakov, V. B. Puzin, V. V. Kravtsov, *Icarus* **262**, 44 (2015).
2. V. V. Busarev, E. V. Petrova, T. R. Irmambetova, M. P. Shcherbina, S. I. Barabanov, *Icarus* **369**, 114634 (2021).
3. T. G. Sharp, P. S. de Carli, *Meteorites and the Early Solar System II* (edited by D. S. Lauretta and H. Y. McSween, 653, 2006).
4. J. N. Goswami, *New Astronomy Reviews* **48**, 125 (2004).
5. A. Ghosh, S. J. Weidenschilling, J. McSween, H. Y., A. Rubin, *Meteorites and the Early Solar System II* (edited by D. S. Lauretta and H. Y. McSween, 555, 2006).
6. T. J. McCoy, D. W. Mittlefehldt, L. Wilson, *Meteorites and the Early Solar System II* (edited by D. S. Lauretta and H. Y. McSween, 733, 2006).
7. N. Schorghofer, *Astrophys. J.* **682**, 697 (2008).
8. S. Sugita, R. Honda, T. Morota, S. Kameda, H. Sawada, E. Tatsumi, M. Yamada, C. Honda, Y. Yokota, T. Kouyama, et al., *Science* **364**, eaaw0422 (2019).
9. P. Farinella, C. Froeschle, C. Froeschle, R. Gonczi, G. Hahn, A. Morbidelli, G. B. Valsecchi, *Nature (London)* **371**, 315 (1994).
10. B. Gladman, P. Michel, C. Froeschl'e, *Icarus* **146**, 176 (2000).
11. R. V. Zolotarev, B. M. Shustov, *Astronomy Reports* **65**, 518 (2021).
12. H. Rickman, B. A. S. Gustafson, J. A. Fernández, *Asteroids, Comets, Meteors III* (edited by C. I. Lagerkvist, H. Rickman, B. A. Lindblad, 423, 1990).
13. A. V. Rusol, V. A. Dorofeeva, *Open Astronomy* **27**, 175 (2018).
14. A. Fitzsimmons, C. Snodgrass, B. Rozitis, B. Yang, M. Hyland, T. Secull, M. T. Bannister, W. C. Fraser, R. Jedicke, P. Lacerda, *Nature Astronomy* **2**, 133 (2018).
15. A. Whitchurch, *Nature Geoscience* **3**, 309 (2010).
16. H. Campins, K. Hargrove, N. Pinilla-Alonso, E. S. Howell, M. S. Kelley, J. Licandro, T. Mothé-Diniz, Y. Fernández, J. Ziffer, *Nature (London)* **464**, 1320 (2010).
17. G. Briani, A. Morbidelli, M. Gounelle, *Meteoritics and Planetary Science Supplement* **73**, 5241 (2010).
18. M. Gounelle, *European Planetary Science Congress, EPSC2012–220* (2012).
19. M. A. Barucci, P. Michel, *EPSC-DPS Joint Meeting 2019, EPSC–DPS2019–202* (2019).
20. D. Jewitt, H. H. Hsieh, arXiv e-prints arXiv:2203.01397 (2022).
21. D. Jewitt, H. Hsieh, J. Agarwal, *Asteroids IV* (221, 2015).
22. V. V. Busarev, S. I. Barabanov, V. B. Puzin, *Solar System Research* **50**, 281 (2016).
23. V. V. Busarev, S. I. Barabanov, M. P. Scherbina, V. B. Puzin, 48th Annual Lunar and Planetary Science Conference, 1919 (2017).
24. V. V. Busarev, M. P. Shcherbina, S. I. Barabanov, T. R. Irmambetova, G. I. Kokhirova, U. K. Khamroev, I. M. Khamitov, I. F. Bikmaev, R. I. Gumerov, E. N. Ir-tuganov, et al., *Solar System Research* **53**, 261 (2019).
25. A. F. Cheng, *Icarus* **169**, 357 (2004).
26. W. F. Bottke, M. Brož, D. P. O'Brien, A. Campo Bagatin, A. Morbidelli, S. Marchi, *Asteroids IV* (701, 2015).
27. W. F. Bottke, M. Jutzi, *Vesta and Ceres. Insights from the Dawn Mission for the Origin of the Solar System* (250, 2022).
28. D. Jewitt, H. Weaver, J. Agarwal, M. Mutchler, M. Drahus, *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts* **42**, 53.03 (2010).
29. E. J. Opik, *Proc. R. Irish Acad. Sect. A* **54**, 165 (1951).
30. G. W. Wetherill, *J. Geophys. Res.* **72**, 2429 (1967).
31. P. Farinella, D. R. Davis, *Icarus* **97**, 111 (1992).
32. J. D. Vedder, *Icarus* **131**, 283 (1998).
33. P. S. Zain, G. C. de Elía, R. P. Di Sisto, *Astron. and Astrophys.* **639**, A9 (2020).
34. M. Yoshikawa, T. Nakamura *Asteroids, Comets, Meteors* (LPI Contributions, vol. 810, p. 322, 1993).
35. *A. Campo Bagatin Asteroids, Comets, Meteors* (edited by D. Lazzaro, S. Ferraz-Mello, J. A. Fernández, vol. 229, pp. 335–350, 2006).
36. C. G. Díaz, R. Gil-Hutton, *Astron. and Astrophys.* **487**, 363 (2008).
37. H. Cibulková, M. Brož, P. G. Benavidez, *Icarus* **241**, 358 (2014).
38. M. Nagasawa, S. Ida, H. Tanaka, *Earth, Planets and Space* **53**, 1085 (2001).
39. J. Peña, C. Fuentes, F. Förster, J. Martínez-Palomera, G. Cabrera-Vives, J. C. Maureira, P. Huijse, P. A. Estévez, L. Galbany, S. González-Gaitán, et al., *Astron. J.* **159**, 148 (2020).
40. D. R. Davis, D. D. Durda, F. Marzari, A. Campo Bagatin, R. Gil-Hutton, *Asteroids III* (pp. 545–558, 2002).
41. M. Granvik, A. Morbidelli, R. Jedicke, B. Bolin, W. F. Bottke, E. Beshore, D. Vokrouhlicky, D. Nesvorný, P. Michel, *Icarus* **312**, 181 (2018).
42. K. A. Holsapple, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **21**, 333 (1993).
43. K. Holsapple, I. Gliblin, K. Housen, A. Nakamura, E. Ryan *Asteroids III* (pp. 443–462, 2002).
44. A. I. Suzuki, C. Okamoto, K. Kurosawa, T. Kadono, S. Hasegawa, T. Hirai, *Icarus* **301**, 1 (2018).
45. T. J. Ahrens, S. G. Love, *Lunar and Planetary Science Conference* **27**, 1 (1996).
46. J. E. Colwell, S. Batiste, M. Horányi, S. Robertson, S. Sture, *Reviews of Geophysics* **45**, RG2006 (2007).
47. J. Hanley, M. T. Mellon, R. E. Arvidson, *Eighth International Conference on Mars* (LPI Contributions, vol. 1791, p. 1470, 2014).
48. N. E. Demidov, A. T. Bazilevskii, R. O. Kuz'min, *Solar System Research* **49**, 209 (2015).
49. K. Wada, M. Grott, P. Michel, K. J. Walsh, A. M. Barucci, J. Biele, J. Blum, C. M. Ernst, J. T. Grundmann, B. Gundlach, et al., *Progress in Earth and Planetary Science* **5**, 82 (2018).

50. *M. Arakawa, T. Saiki, K. Wada, K. Ogawa, T. Kadono, K. Shirai, H. Sawada, K. Ishibashi, R. Honda, N. Sakatani, et al.*, *Science* **368**, 67 (2020).
51. *K. A. Holsapple, K. R. Housen*, *Icarus* **187**, 345 (2007).
52. *H. J. Melosh*, *Impact cratering: a geologic process* (1989).
53. *R. T. Daly, E. B. Bierhaus, O. S. Barnouin, M. E. Perry, C. M. Ernst, E. E. Palmer, R. W. Gaskell, J. R. Weirich, H. C. M. Susorney, C. L. Johnson, et al.* *Asteroid Science in the Age of Hayabusa2 and OSIRIS-REx* (LPI Contributions, vol. 2189, p. 2030, 2019).
54. *R. Noguchi, N. Hirata, N. Hirata, Y. Shimaki, N. Nishikawa, S. Tanaka, T. Sugiyama, T. Morota, S. Sugita, Y. Cho, et al.*, *Icarus* **354**, 114016 (2021).
55. *J. B. Vincent, M. Hoffman, A. Nathues, H. Sierks, R. W. Gaskell, S. Marchi, D. O'Brien, P. Schenk, M. Fulchignoni, H. U. Keller, et al.*, 43rd Annual Lunar and Planetary Science Conference, 1415 (2012).
56. *S. Yamamoto, H. Kimura, E. Zubko, H. Kobayashi, K. Wada, M. Ishiguro, T. Matsui*, *Astrophys. J.* **673**, L199 (2008).
57. *M. Hoang, P. Garnier, J. Lasue, H. Réme, M. T. Capria, K. Altwegg, M. Läufer, T. Kramer, M. Rubin*, *Astron. and Astrophys.* **638**, A106 (2020).
58. *E. D. Rosenberg, D. Prialnik*, *Icarus* **201**, 740 (2009).
59. *P. Vernazza, M. Ferrais, L. Jorda, J. Hanuš, B. Carry, M. Marsset, M. Brož, R. Fetick, M. Viikinkoski, F. Marchis, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **654**, A56 (2021).
60. *H. C. van de Hulst*, *Light Scattering by Small Particles* (1957).
61. *K. D. Gordon*, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* **309**, 77 (2004).
62. *G. D. Mulders, M. Min, C. Dominik, J. H. Debes, G. Schneider*, *Astron. and Astrophys.* **549**, A112 (2013).
63. *E. Zubko, G. Videen, Y. Shkuratov*, 47th Annual Lunar and Planetary Science Conference, 1145 (2016).
64. *B. M. Shustov*, *INASAN Science Reports* **4**, 356 (2019).
65. *M. Fulle, F. Marzari, V. Della Corte, S. Fornasier, H. Sierks, A. Rotundi, C. Barbieri, P. L. Lamy, R. Rodrigo, D. Koschny, et al.*, *Astrophys. J.* **821**, 19 (2016).
66. *B. M. Shustov, R. V. Zolotarev*, *Astronomy Reports* **66**, 179 (2022).
67. *N. Ysard, A. P. Jones, K. Demyk, T. Boutéraon, M. KoeHLer*, *Astron. and Astrophys.* **617**, A124 (2018).
68. *W. F. Bottke, D. D. Durda, D. Nesvornyy, R. Jedicke, A. Morbidelli, D. Vokrouhlicky, H. F. Levison*, *Icarus* **179**, 63 (2005).
69. *M. P. Shcherbina, V. V. Busarev, M. A. Burlak, N. P. Ikonnikova*, *INASAN Science Reports* **7**, 93 (2022).
70. *F. J. Pozuelos, F. Moreno, F. Aceituno, V. Casanova, A. Sota, J. J. López-Moreno, J. Castellano, E. Reina, A. Diepvens, A. Betoret, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **568**, A3 (2014).
71. *F. J. Pozuelos, F. Moreno, F. Aceituno, V. Casanova, A. Sota, J. J. López-Moreno, J. Castellano, E. Reina, A. Climent, A. Fernández, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **571**, A64 (2014).
72. *F. Moreno, J. Licandro, A. Cabrera-Lavers, F. J. Pozuelos*, *Astrophys. J.* **826**, 137 (2016).