

## ЭВОЛЮЦИЯ КОМЕТ

© 2021 г. А. В. Тутуков<sup>1</sup>, М. Д. Сизова<sup>1</sup>, С. В. Верещагин<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup> Институт астрономии РАН, Москва, Россия

\*E-mail: svvs@ya.ru

Поступила в редакцию 27.01.2021 г.

После доработки 24.03.2021 г.

Принята к публикации 30.04.2021 г.

Кометы, выброшенные в облако Оорта планетами-гигантами в ходе образования и эволюции планетных систем, со временем под действием гравитации тех же планет могут вновь попасть на близкие к Солнцу орбиты. Испарение кометных ядер потоком солнечного излучения ведет к освобождению кометами твердого пылевого компонента. В статье рассмотрена численная модель превращения комет в пылевые потоки вдоль их орбит вокруг Солнца. Оценено время жизни пылевых потоков, возникающих вдоль орбит порождающих комет. Основной причиной рассеяния и хаотизации этих потоков служат, вероятно, массивные планеты. Аналогичную эволюцию имеют кометы и в других планетных системах с планетами-гигантами, отвечающими условию  $\frac{m}{M} > \frac{r}{a}$ , где  $m$  и  $M$  – массы планеты и звезды,  $r$  – радиус планеты,  $a$  – большая полуось ее орбиты вокруг звезды. Анализ взаимодействия объектов облака Оорта и Солнца с пролетающими звездами и звездными скоплениями приводит к выводу о вероятном ограничении размеров плотной части облака Оорта, оценка которой также приводится.

Ключевые слова: Солнечная система, кометы, звезды, рассеянные звездные скопления

DOI: 10.31857/S0004629921090073

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение физики комет – одна из классических задач астрономии и астрофизики. В 1918 г. в начале XX в. уже было известно, что кометы принадлежат Солнечной системе (Стремгрен [1]). Почти тридцатью годами позже была указана роль больших планет, определяющих свойства кометных орбит [2]. В 1950 г. Оорт [3] предположил, что ядра комет образуют некое облако вокруг Солнечной системы, заполняющее сферу Роша Солнца, с размерами порядка  $10^{18}$  см. Далее термины “комета” и “ядро кометы” мы будем использовать как синонимы. Позднее было показано, что в процессе формирования всех планетных систем часть твердого астероидного материала и ядер комет (астероидов и пыли, замороженных в лед) оказывается выброшенной гравитационным полем больших планет из внутренних частей планетной системы на эллиптические орбиты с большими эксцентриситетами и даже на гиперболические орбиты (Чарнос, Морбиделли [4], Дыбчинский и др. [5]).

Выброшенные таким образом твердые тела образуют поле свободных планет Галактики. Численное моделирование системы Солнце–Юпитер подтвердило формирование облака Оорта

около Солнца и Юпитера с астероидно-кометно-планетным (АКП) компонентом и позволило оценить некоторые параметры этого процесса (Тутуков и др. [6]). Основные наблюдаемые свойства кометного облака Оорта Солнца приведены в обзоре Бое и др. [7] и книге Марова [8]. Суммарная масса комет облака Оорта может составлять около одной массы Земли, а число комет с размерами больше 1 км может составлять  $\sim 10^{12}$ . Характерные эксцентриситеты орбит заключены в пределах  $0.999 < e < 1$ , радиус АКП облака  $\sim 10^{18}$  см. Размеры облака Оорта ограничены приливным влиянием Галактики (Корреа-Отто и Каландра [9]).

Столь близкие к единице эксцентриситеты орбит и, главное, большие орбитальные периоды членов облака Оорта предполагают редкое и сравнительно краткое пребывание большинства комет вблизи Солнца, что обеспечивает им большое время жизни, превышающее, как правило, время жизни Солнца.

Отметим, что в процессе звездной эволюции облака Оорта звезд главной последовательности наследуются вырожденными карликами, образующимися с окончанием ядерной эволюции звезд с начальными массами  $0.8 M_{\odot}$ – $8.0 M_{\odot}$  (Парриот

и Алькок [10]). Последние наблюдения обнаруживают аккрецию твердого материала вырожденными карликами (Гонсалес-Эгеа и др. [11]). Источник этого вещества остается неясным, поскольку близкие окрестности белых карликов в пределах около 5 а.е. очищены от астероидов и комет на предшествующей стадии красного сверхгиганта. Для звезд солнечной массы далекие массивные планеты и, главное, облака Оорта, сохраняются после потери оболочки на стадии планетарной туманности. Поэтому массивные планеты сохраняют возможность пополнять окрестности и оболочку вырожденного карлика твердым материалом с наблюдаемым темпом аккреции. Кроме того, столкновительная эволюция астероидного компонента пояса Койпера может объяснить аккрецию твердого материала охлаждающимся вырожденным карликом (Ютзи и др. [12]). Темп аккреции пыли вырожденными карликами, согласно наблюдательным оценкам, достигает  $10^7$ – $10^{10}$  г/с (Гонсалес-Эгеа и др. [13]). Часть пыли около вырожденных карликов могла принадлежать молекулярным облакам, вещество которых они аккрецировали на своем пути.

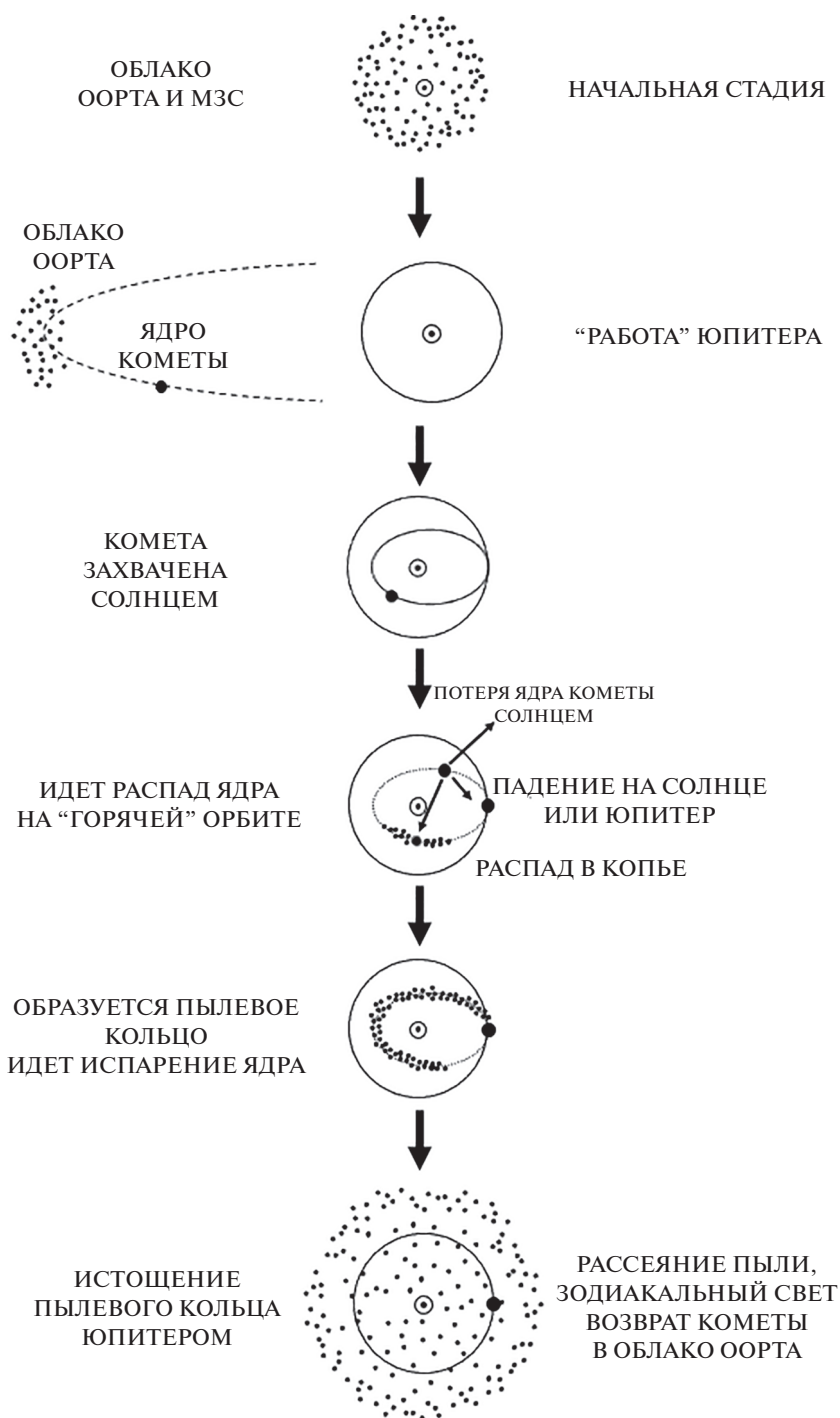
Периодические сближения с планетами-гигантами в перигелии орбит АКП переводит часть объектов облака Оорта на короткопериодические орбиты в “горячей” окрестности Солнца (рис. 1). Это обеспечивает постепенное испарение ледяного тела кометы, появление ее хвоста (привлекающего всеобщее внимание), а также освобождение вмороженных в ядро кометы твердых астероидов и пылинок. Все это, в итоге, приводит к полному разрушению ядра кометы (рис. 1). Примером кометы, взаимодействующей в настоящее время с Юпитером, является комета Хейла-Боппа (Секанина, Крахт [14]). Планеты-гиганты Солнечной системы таким образом создают “банк” ледяных ядер комет в облаке Оорта и переводят их со временем в короткопериодическое семейство испаряющихся комет. Солнечное излучение, испаряя ледяное ядро кометы и образуя ее яркий хвост, делает жизнь кометы на “горячей” орбите короткой по сравнению с продолжительностью жизни Солнца. Конечным продуктом эволюции кометы является астероидный поток вдоль орбиты кометы, что было впервые предложено Скиапарелли [15, 16]. Такова, в кратком изложении, история околозвездных комет (Кресак [17], Фладеланд и др. [18], Яксон, Зоок [19]). Целью настоящей работы является построение численной модели эволюции пылевого “копья” комет, создающего при пересечении с земной орбитой метеорные потоки.

## 2. ПРОИСХОЖДЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНЫХ КОМЕТ И АСТЕРОИДОВ

Практически все кометы, приближающиеся к Солнцу на горячих орбитах, появляются из облака Оорта и пояса Койпера (Вокрухлицкий и др. [20], Тутуков и др. [6]). И, хотя в ходе образования планетных систем до половины кометных ядер выбрасывается из родительской системы в общегалактическое поле, частота встреч Солнца со свободными ядрами этого поля очень мала. Оценка общего числа кометных ядер в облаке Оорта, имеющих размеры, превышающие 2–3 км, составляет  $10^{12}$  (Бассе, Морбиделли [21]). Если принять, что такое же число ядер комет выбрасывается из образующейся планетной системы в общее поле диска Галактики с объемом  $\sim 10^{11}$  пк, то характерное время между последовательными сближениями Солнца с этими ядрами на расстояние, меньшее 1 а.е., составит примерно 500 лет. При этой оценке принято, что скорость движения Солнца относительно свободных кометных ядер примерно равна 30 км/с и число звезд с планетами в Галактике близко к  $\sim 10^{11}$ . При всей неопределенности входящих в эту оценку факторов становится ясной причина редкости таких объектов, как межзвездная комета 2I/Borisov с гиперболической орбитой. Кроме того, некоторые из комет и астероидов с гиперболическими скоростями могут быть ускорены планетами-гигантами Солнечной системы при последнем сближении с ними.

## 3. СПЕКТР МАСС КОМЕТ

Ожидаемый спектр масс АКП объектов, вероятно, близок к стандартному,  $dN/dm = m^{-2}$  (Тутуков [22]). Действительно, для ядер комет, пересекающих орбиту Земли, было найдено, что  $dN/dm = m^{-1.9}$  (Фернандес, Соса [23]). Для комет с размерами больше 1 км семейства Юпитера спектр масс был оценен как  $dN/dm = m^{-1.67}$  (Сноудграсс и др. [24]). Уменьшение наклона наблюдаемой функции масс комет по сравнению со стандартным спектром может быть следствием их испарения в горячей околозвездной области. Наблюдаемый спектр масс комет в этой области есть произведение их исходной функции масс на время жизни кометы, которое можно принять пропорциональным ее размерам. В итоге получается выражение для функции масс  $dN/dM = M^{-2} M^{1/3} \sim \frac{1}{M^{5/3}}$ , что явно ближе к приведенным выше оценкам наблюдаемого спектра масс комет. Отметим, что наблюдаемый спектр размеров кометных ядер на интервале 1–10 км может быть представлен функцией  $dN/dR \sim R^{-3}$  (Лиссе



**Рис. 1.** Сценарий эволюции кометы (облако Оорта, горячая орбита, пылевые кольца). Показана наблюдаемая стадия падения кометы Шумейкеров–Леви (D/1993 F2) на поверхность Юпитера.

и др. [25]). Время жизни испаряемого ядра пропорционально его размерам, что приводит к  $dN/dR \sim R^{-4}$ , или  $dN/dR \sim M^{-2}$ . Для "неиспаряемых" каменных астероидов с размерами порядка 1 км показатель степени функции масс оказался близок к двум (Дурда и др. [26], Хагис [27]). Близок

к двум и показатель степени функции масс астероидов с размерами  $10-10^5$  см (Колас и др. [28]).

Испарение комет и столкновения астероидов между собой ведут к появлению околозвездной пыли и песка. Спектр масс пылинок, освобождаемых кометой, имеющих размеры до одного сан-

тиметра,  $dN/dm = m^{-1.8}$  (Ишигуро и др. [29]). Как видим из этой формулы, показатель степени близок к фундаментальному, равному 2. Данный факт свидетельствует об отсутствии выделенных масс при равномерном распределении по логарифму массы объектов.

#### 4. ВОЗМУЩЕНИЯ ВНЕШНИХ ЧАСТЕЙ ОБЛАКА ООРТА СБЛИЖЕНИЯМИ СО ЗВЕЗДАМИ ПОЛЯ

Рассматривая эволюцию АКП материала, можно заключить, что облака Оорта звезд создаются в ходе формирования планет-гигантов в околозвездных газово-пылевых дисках. АКП объекты облака Оорта переводятся на близкие к Солнцу “горячие” орбиты планетами-гигантами в перигелиях АКП объектов (рис. 1). Таково происхождение испаряемых Солнцем комет своего облака Оорта. Кроме того, облако Оорта с размерами около  $10^{18}$  см активно возмущается прохождением сквозь него соседними звездами, способными существенно возмущать пространственные скорости АКП объектов. Для членов солнечного облака Оорта параболическая скорость  $\sim 10^4$  см/с. Радиус зоны, в пределах которой звезда, проходящая сквозь облако Оорта с типичной скоростью  $\sim 30$  км/с, возмущает скорости АКП объектов, на величину, большую параболической скорости на краю облака Оорта, составляет  $\sim 10^{16}$  см. Число звезд, проходящих за время предшествующей жизни Солнца сквозь облако Оорта, — примерно  $10^4$ . В итоге, легко оценить, что существенная часть орбит АКП объектов облака Оорта оказывается заметно возмущенными. Итогом этого процесса будет заметное уменьшение числа АКП объектов облака Оорта, покидающих последнее в результате приобретения ими дополнительной энергии. Они пополняют межзвездное поле свободных АКП объектов.

Численное моделирование взаимодействия звезд диска Галактики с облаком Оорта Солнца (Кореа-Отто, Каландра [9]) подтвердило, что действительно половина объектов облака Оорта покидает его, пополняя общегалактическое поле таких объектов. Звезды поля могут полностью лишить облако Оорта его внешней части ( $R \geq 10^{17}$  см). Это справедливо для любой звезды за счет придания этой звезде дополнительной скорости около  $10^4$  см/с, которая превышает характерную скорость объектов периферийной части облака Оорта с размером  $\sim 10^{18}$  см. Итогом ускорения звезды-носителя облака Оорта будет ее уход от внешних частей своего облака. Таким образом, массивные планеты питают облако Оорта ядрами комет, а звезды поля, пролетающие через облака Оорта, переводят его объекты в свободное плавание по Галактике. И, главное, оценка скорости объектов

облака Оорта столь мала, что звезды фона, пролетая около Солнца и возмущая его скорость на величину больше указанной выше, “выбивают” его из внешних частей своего облака Оорта.

Для части АКП объектов облака Оорта в ходе взаимодействия с пролетающей звездой могут заметно измениться параметры орбиты. Эксцентриситеты орбит могут уменьшиться, а перигелийные расстояния увеличиться до многих сотен и тысяч а.е. Обнаружение таких спутников Солнца представляется пока невыполнимой задачей, но существование долгоживущих АКП объектов облака Оорта с большими полуосями  $\sim 10^{17}$ – $10^{18}$  см и сравнительно малыми эксцентриситетами орбит не вызывает сомнений.

#### 5. ОБРАЗОВАНИЕ ПЫЛЕВЫХ “КОПИЙ” КОМЕТ

Нагрев комет близким Солнцем на горячих орбитах вызывает испарение их ледяных ядер, а взаимодействие испаряемого газа кометы — кометного ветра — с солнечным ветром представляет собой редкое украшение земного ночного неба. Ядро кометы включает и не испаряемый при  $T < 1000$  К астероидно-пылевой компонент. Давление кометного ветра на астероидно-пылевой компонент ускоряет его члены до сравнительно высоких скоростей. Следует признать, что величина этой скорости остается пока неопределенной. Часть работ оценивает эту скорость для перигелийных комет в — 100 м/с (Верес и др. [30], Секхар, Ашер [31], Йе и др. [32], Фазнхам и др. [33]), другие авторы — в несколько м/с (Ишигуро и др. [34]). Одной из причин рассогласования может быть большая дисперсия размеров элементов астероидно-пылевой среды. Если мелкая пыль может быть ускорена испаряющейся ледяной оболочкой кометы до скорости звука —  $\sim 30 T_c^{1/2}$  м/с, где  $T_c$  — температура нагреваемой Солнцем поверхности кометы, — то астероидный компонент ускоряется только до долей этой скорости, что зависит от размера камней-астероидов и отношения массы льда к массе астероидного компонента ядра. Важно, что отношение скорости орбитального движения кометы к скорости астероидно-пылевого компонента, освобожденного испарением в перигелии ледяного ядра кометы,  $\sim 60 [a.e./R]^{1/4}$ , где  $R$  — расстояние кометы от Солнца, и оно достаточно велико,  $\sim 10^2$ . Это обстоятельство предопределяет появление сначала узкого астероидно-пылевого копыя кометы, которое со временем развивается в метеороидный поток вдоль начальной орбиты полностью испаренного ядра кометы. Наблюдение данного копыя в оптическом диапазоне осложнено низким альбедо его членов и ярким газовым хвостом кометы. Однако инфракрасные наблюде-

ния позволили увидеть пылевые “копья” комет (Каруга, Женит [35]).

Испарение ледяного ядра освобождает твердый компонент кометы, состоящий, вероятно, из камней и пыли со стандартным спектром масс  $dN/dM \sim M^{-2}$  (Шустов, Тутуков [36]). Этот компонент обилён, масса камней в кометных ядрах может в три раза превышать массу льда (Лиссе и др. [25]). Инфракрасные наблюдения позволили обнаружить симметричные “пылевые копья”, состоящие из миллиметровых частиц для 27 из 34 наблюдавшихся комет на космическом телескопе “Spitzer” (Лиссе и др. [25]). Эти копья расположены вдоль кометных орбит вокруг Солнца и прослежены на расстояния до  $10^6$  км. Очевидно, что найденные пылевые копья-хвосты комет представляют только центральные, наиболее плотные части симметричных относительно ядра пылевых копий, возникающих в перигелиях кометных орбит. Конечным продуктом испарения ледяного ядра кометы является образование пылевого потока вдоль ее орбиты, что предложил Скиапарелли еще в 1867 г. [37]. Современные исследования и рассматриваемая модель подтверждают этот сценарий.

Примером “истощенного” испарением ледяного ядра кометы может служить ядро старой кометы семейства Юпитера 209P/LINEAR (Йе и др. [38]). Радарные наблюдения позволили найти признаки пылевого хвоста этой кометы. Другой пример метеорного сопровождения кометы 96P/Machholz продемонстрирован недавно Неслусан и др. [39]. Авторы [39] пришли к выводу о том, что все метеорные потоки Солнечной системы являются остатками былых комет. Как часто случается в астрономии, наблюдательная селекция усложняет изучение картины формирования астероидно-пылевых копий комет. Несколько астероидно-пылевых копий было зарегистрировано под именами кометных пылевых струй (Крюгер и др. [40], Винсент и др. [41], Шу и др. [42], Лин [43], Бонхарт и др. [44]). Длина некоторых из наблюдаемых копий и струй достигает  $10^6$  км (Шу и др. [42]). Время жизни комет на “горячих” орбитах, близких в перигелиях к Солнцу, ограничено от нескольких десятков до тысяч орбитальных периодов (Несворны и др. [45]). Естественно, что время жизни комет существенным образом зависит от температуры ее поверхности в перигелии, задаваемой на этой стадии ее расстоянием от Солнца.

## 6. ЖИЗНЬ КОМЕТ СЕМЕЙСТВА ЮПИТЕРА ОКОЛО СОЛНЦА

Рассмотрим основные факторы, ограничивающие время жизни ледяных ядер короткопериодических комет семейства Юпитера. Очевидны

два фактора, один из них – испарение ледяного ядра кометы в перигелии, другой – “столкновения” с Юпитером, отправившим ядро из облака Оорта на “горячую” орбиту с близким к Солнцу перигелием. Выполним в рамках простой модели оценки времени жизни такого ядра на “горячей” стационарной орбите. Для изменения скорости ядра кометы семейства Юпитера на величину порядка самой скорости этого ядра в афелии его орбиты вокруг Солнца расстояние сближения ядра с

Юпитером должно быть меньше, чем  $\sim \frac{M_J}{M_{\text{Sun}}} a_J$ ,

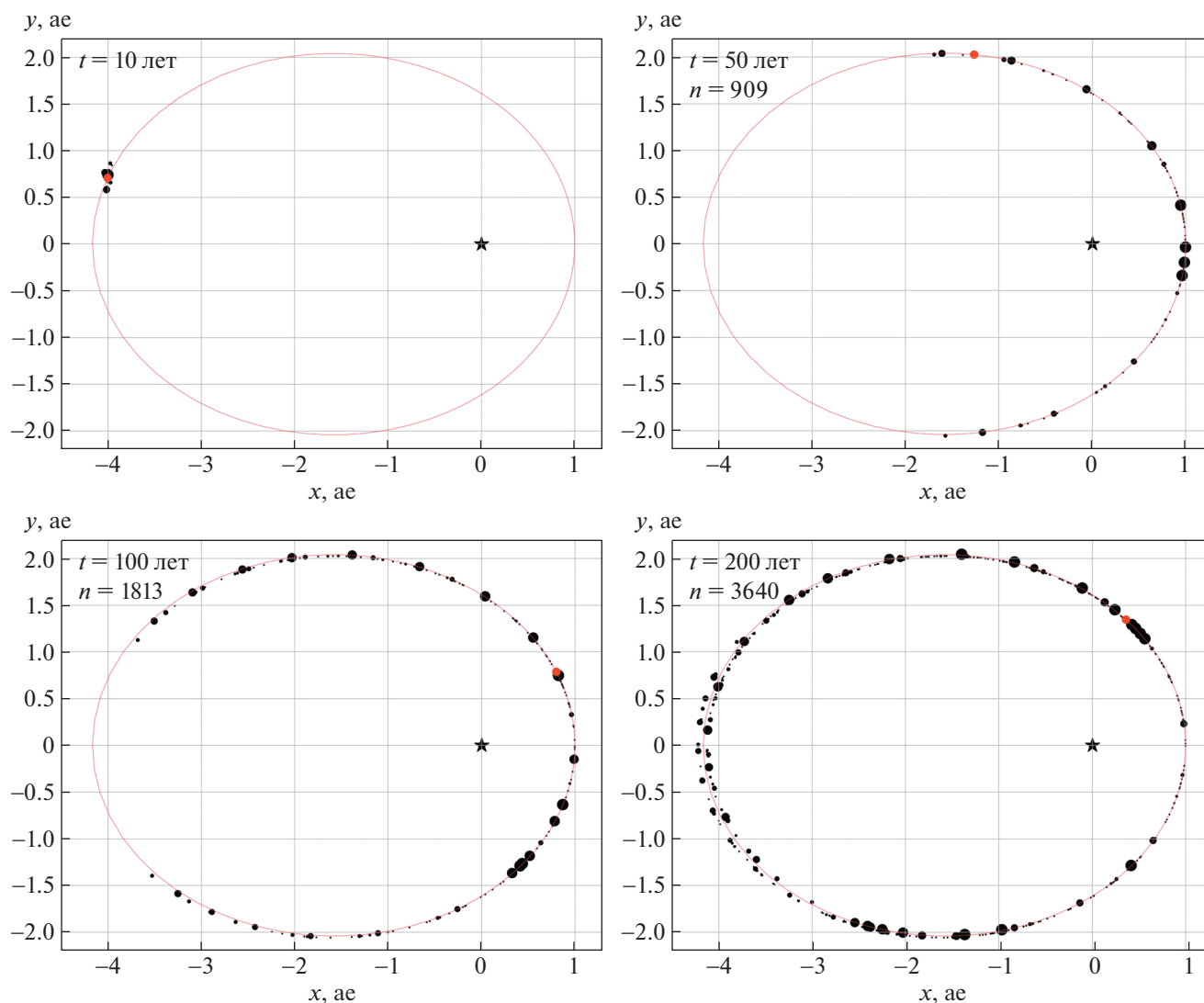
где  $a_J$  и  $M_J$  – большая полуось орбиты Юпитера и его масса. Следовательно, число возвращений кометы в афелий, сохраняющих орбиту неизменной, не превышает тысячи, что при орбитальных периодах объектов облака Оорта  $\sim 10^7$  лет приводит к Хаббловскому времени жизни.

В перигелии ледяное ядро кометы испаряется. Если принять, что на испарение одной молекулы воды из льда необходима энергия солнечного излучения порядка одного электрон-вольта, то за каждое прохождение через перигелий ее размер

уменьшается на  $\sim 10^3 \left( \frac{R_{\text{min}}}{\text{а.е.}} \right)^{1/2}$  см,  $R_{\text{min}}$  – минимальное расстояние кометы от Солнца в перигелии. Время жизни ядра кометы, соответственно,

становится равным  $10^{-2} \left( \frac{R_{\text{min}}}{\text{а.е.}} \right)^{1/2} d$  лет, где  $d$  – диаметр ядра кометы в см. При  $d \sim 10$  км это время порядка  $10^4$  лет. Следовательно, ядро кометы на “горячей” орбите с  $R_{\text{min}} \leq 10^{13}$  см, как правило, испарится прежде, чем Юпитер существенным образом изменит его орбиту. Из выполненных оценок ясно, что ядра более далеких от Солнца комет в их перигелиях, как правило, существенным образом изменят орбиту прежде, чем испарятся. Принятая скорость испарения ядра кометы существенным образом зависит от природы ядра. Приведенная выше оценка призвана только подчеркнуть, что время жизни кометных ядер около Солнца коротко.

Приведенное выше рассмотрение приводит к выводу о разрушении со временем всех комет с горячими перигелиями и превращению их в эллипсоидальные астероидные потоки. Рассмотрим эволюцию со временем этих потоков. Ширина цилиндрического потока может быть оценена как  $r = \frac{v_a}{v_{\text{orb}}} a$ , где  $v_a$  – характерная скорость астероидов, покидающих комету,  $v_{\text{orb}}$  – орбитальная скорость кометы,  $a$  – большая полуось кометы. Дополнительный вклад в расширение метеорных потоков вносит испарение ядра кометы, приводящее к реактивному эффекту, постепенно меня-



**Рис. 2.** Результат расчетов движения кометы вокруг Солнца со скоростью в перигелии 39.9 км/с. На каждом шаге интегрирования происходит испарение пыли в направлении на Солнце со скоростью пылинок, равной 126 м/с. Размеры черных точек, представляющих облака пыли, пропорциональны количеству выброшенных на каждом шаге пылинок. Последнее в свою очередь равно  $20/r^2$ , где  $r$  – расстояние кометы от Солнца. Картина показана в развитии во времени. Время интегрирования и число пылинок подписаны в левом верхнем углу каждой панели.

ошему ее орбиту вокруг Солнца. Для комет семейства Юпитера ширина потока на его орбите  $r \approx 10^{12}$  см. Указанное отношение скоростей определяет и продолжительность метеорных потоков на Земле, обычно составляющую несколько дней. Астероиды, покидающие кометное ядро со скоростью  $\sim 10^4$  см/с, как показано на рис. 2, заполняют орбиту кометы за несколько тысяч лет, превратив ее в сплошное кольцо вокруг Солнца, или метеорно-астероидный поток. Такие метеорные потоки, пересекающие земную орбиту, хорошо известны. Йе и др. [46], восстановив орбиты около десяти миллионов метеоров в земной атмосфере, смогли выделить восемь их семейств, орбиты

которых близки к орбитам комет семейства Юпитера. Тем самым подтверждаются генетическая связь метеорных потоков с кометами, их порождающими, и организующая роль Юпитера. Полный список известных метеорных потоков, пересекающих орбиту Земли, насчитывает сегодня 17 членов (Йе и др. [38]). Детальный анализ распределения радиантов метеоров на небесной сфере показал, что до половины всех метеоров сосредоточены в потоках шириной  $5^\circ-10^\circ$  (Колас и др. [28]). Все потоки являются продуктами распада комет и, возможно, прямых столкновений астероидов, ведущих к раздроблению последних.

Активное испарение кометы с эллиптической орбитой происходит, естественно, только в перигелии. Кроме того, ядра комет в силу их большой неоднородности часто делятся на части, создающие в конечном итоге уплотнения в пылевых потоках. Из-за этого распределение метеороидов по орбите кометы оказывается неравномерным. И, как следствие пространственной неоднородности метеорного потока, возникает переменность его интенсивности, наблюдаемой на Земле. Так, важным свойством хорошо исследованных метеорных потоков Эта-Аквариды и Ориониды является их неоднородность. Оба потока показали вариацию интенсивности со временем в пределах фактора два – три (Егал и др. [47]). Такая вариация интенсивности метеорного потока, как показывает наша модель, вполне естественна для молодых потоков (рис. 2). Она отражает интенсивную генерацию пыли и распад ядер в перигелиях их орбит. Отметим один возможный фактор, проявляющийся при разрушении комет. В ходе распада ледяного ядра кометы становится ясной его структура, возникающая в результате аккумуляции составных частей. Поэтому ядро кометы часто делится на части, из которых оно ранее сформировалось. Это увеличивает дисперсию скоростей пыли и ширину метеорных потоков. Интересно, что Ориониды проявили признаки периодичности интенсивности с периодом около 12 лет, что, возможно, является следствием соизмеримости орбитальных периодов Земли и породившей этот поток кометы. Рисунок 2 иллюстрирует неоднородность указанных потоков в пространстве, отражающую приведенный сценарий эволюции комет.

Итак, основным фактором, ограничивающим жизнь комет на “горячих” орбитах, является испарение их ледяных ядер. Определяющий вклад в разрушение последних могут вносить и прямые столкновения этих ядер с астероидами. Примером последнего явления может служить вспышка астероида из Главного пояса астероидов 596 Scheida (Неслусан и др. [48]). Этот астероид из Главного пояса астероидов с размером ~50 км испытал в 2010 г. вспышку, сопровождаемую появлением на несколько дней пылевого хвоста. Оценка массы, выброшенной при столкновении пыли, составляет  $\sim 3 \times 10^{10}$  г. Роль столкновительной эрозии астероидов и ядер комет кажется неизбежной в образовании пылевого окружения Солнца и его зодиакального света.

## 7. ПОЛОСЫ ЗОДИАКАЛЬНОГО СВЕТА

Исследование структуры зодиакального света позволило обнаружить в околосолнечном пространстве так называемые “пылевые полосы” (Несворны и др. [49]). Они, вероятно, являются частями пылевых околосолнечных колец – ме-

теорных потоков, или продуктов распада околосолнечных комет и астероидов в результате их испарения. Это возможно и в результате разрушительных столкновений астероидов. Характерное расстояние от Солнца в несколько а.е. и малые эксцентриситеты орбит объектов наблюдаемых пылевых полос исключают их столкновения с Землей. Поиск аналогичных пылевых колец с большими эксцентриситетами и углами наклона к плоскости эклиптики – возможных продуктов испарения комет – остается актуальной задачей.

Скорости 11 известных потоков, пересекающих орбиту Земли (движущейся вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с), найдены Колас и др. [28], Дролсхагеном и др. [50] и заключены в пределах 12–72 км/с. Оба предела скоростей легко понять, если учесть, что параболическая скорость на уровне орбиты Земли ~42 км/с. Следовательно, максимальная скорость встречного потока пыли (метеоров) должна быть ~72 км/с, а попутного потока ~12 км/с, что и наблюдается! Средняя скорость метеорных потоков относительно Земли ~47 км/с, что говорит о близкой к случайной ориентации их орбит относительно Земли. Интересно указать, что средняя скорость “неорганизованных” в потоки метеоров ~20 км/с заметно меньше средней скорости известных метеорных потоков. Высокоскоростной хвост этого распределения, перекрывающийся со скоростями известных метеорных потоков, при  $v \geq 20$  км/с включает только ~20% всех метеоров. Это может означать, что рассеяние астероидно-пылевых потоков большими планетами и последующая столкновительная эволюция этого компонента в элементы зодиакального света приводят их вращению вокруг Солнца к движению, близкому к орбитальному вращению планет. Напомним, что зодиакальный свет образует довольно плоскую структуру, совпадающую с орбитальной плоскостью планет Солнечной системы. Следует отметить, что превращение пылевых потоков около Солнца в зодиакальный свет требует дополнительного и всестороннего изучения.

## 8. СУДЬБА ПЫЛИ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Распад комет в поле излучения Солнца ведет к появлению большого количества пыли в его окрестности. Рассмотрим судьбу пылинок зодиакального облака. Сравнение потоков импульса света Солнца ( $L \approx 4 \times 10^{33}$  эрг/с) и солнечного ветра, имеющего скорость  $\sim 5 \times 10^7$  см/с и интенсивность  $\sim 10^{-14} M_{\odot}/\text{год}$  (Сафранкова и др. [51]), показывает тысячекратное превосходство излучения. Рассмотрим условия существования пылинок в поле Солнечного излучения. Сравнивая давление излучения на пылинку с силой гравитации Солнца, находим, что пылинки с плотностью

$\sim 2 \text{ г/см}^3$  и размерами, меньшими  $\sim 10^{-5}$  см, удаляются из Солнечной системы давлением излучения за короткое время, сравнимое со временем движения солнечного ветра:  $\tau$  (лет)  $\approx 10^{-2} R/a.e.$  лет, где  $R$  – расстояние пылинки от Солнца. Пылинки с большими размерами тормозят свое орбитальное движение около Солнца за счет солнечного излучения (эффект Пойнтинга-Робертсона). За время порядка  $\tau$  (лет)  $\approx 10^8 a \left( \frac{R}{a.e.} \right)^2$  они существенно уменьшают свое расстояние от Солнца, приближаясь к зоне испарения с радиусом  $R \approx 0.1$  а.е. Ясно, что время существования мелкой пыли много меньше времени жизни Солнца. Следовательно, для поддержания зодиакального света Солнца требуется непрерывная подпитка околосолнечного пылевого компонента новыми кометами и мелкой пылью, возникающей при испарении их ядер и при столкновении астероидов и крупного песка в ходе их орбитального движения около Солнца.

## 9. РАЗРУШЕНИЕ ПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ

Возникает естественный вопрос о причинах разрушения пылевых потоков, наследующих кометные орбиты в Солнечной системе. Мелкая пыль, в принципе, могла быть удалена из такого потока давлением солнечного излучения и солнечного ветра (Кресак [17]). Под разрушением потока мы будем понимать кратное увеличение дисперсии скоростей его элементов в направлении, ортогональном направлению самого потока. Для крупных фрагментов потока главной причиной разрушения, вероятно, является планета-гигант, породившая своей гравитацией комету, “послав” ее из холодного облака Оорта во внутреннюю горячую часть Солнечной системы (рис. 1). Радиус зоны гравитационного влияния планеты определяется ее массой:  $r = \frac{M_J}{M_\odot} a$ . Для Юпитера  $r \sim 10^{11}$  см. Эта величина близка к приведенной выше оценке ( $\sim 10^{12}$  см) ширины метеороидно-астероидного кольца, наследника распавшейся кометы. Под радиусом влияния понимается расстояние АКП тела от Юпитера, на которое он должен сблизиться с последним для изменения скорости на величину порядка орбитальной скорости около Солнца. Такие сближения удаляют астероид из кольца, хаотизируют его орбиту, “послав” астероид либо в облако Оорта, либо даже удалив его из Солнечной системы. Таким образом, Юпитер, периодически попадая в своем орбитальном движении вокруг Солнца в кометное кольцо, будет со временем разрушать его, обогащая эволюционное дерево астероидно-пылевым кольцом наследников кометы, им же вначале и порожденной (рис. 1). Численное моделирование

эволюции орбит одного из астероидов семейства Юпитера показало, что планеты земной группы вносят свой вклад в изменение параметров орбиты, расширив в итоге метеороидный поток (Галушина, Самбаров [52]). Выделенные недавно метеороидные потоки (Эгал, Вейгарт и др. [53]) являются продуктами сравнительно недавно распавшихся комет, что помогает сохранить в течение некоторого времени их идентичность. Конечно, планеты-карлики также вносят свой вклад в разрушение астероидных колец, пересекающих их орбиты, но этот вклад скромнее, ибо радиусы их гравитационного влияния  $r$  согласно простым оценкам не превосходят их геометрических размеров.

Необходимо указать, что Юпитер непрерывно совершает свою “разрушительную” работу в отношении астероидно-пылевого косяка – кольца кометы. Итогом этого может быть даже удаление Юпитером кометы из своего “недостроенного” кольца. При этом комета может быть отправлена им в межзвездное пространство, обратно в облако Оорта или же переведена на новую, “горячую” орбиту, строить новое астероидное кольцо. То есть, одна комета в итоге может оставить после себя и два пылевых кольца около Солнца с апогеями, привязанными к орбите Юпитера (рис. 1). Естественно, что все приведенные выше сценарии приложимы ко всем планетным системам с достаточно массивными далекими от звезд планетами.

Итогом разрушения астероидно-пылевых потоков является образование околосолнечного пылевого диска, проявляющего себя в качестве зодиакального света (Несворны и др. [54]). Такими реликтовыми квазистационарными пылевыми дисками, вероятно, окружены все звезды, обладающие планетными системами. Пылевой компонент этих дисков непрерывно пополняется кометами из облака Оорта, направляемыми на горячие орбиты в Солнечную систему Юпитером и другими планетами-гигантами. Истощение пылевого компонента происходит за счет давления излучения и солнечного ветра, а также гравитационного взаимодействия и поглощения песка и пыли Солнцем и планетами. Последнее проявляется в качестве метеороидных явлений в земной атмосфере.

Представленная выше эволюция комет демонстрирует причину появления около Солнца сравнительно тонких пылевых “копий” – потоков – колец в результате испарения ледяного конгломерата кометных ядер. Относительная толщина этих объектов определяется отношением скоростей освобождающихся из ледяного плена пылинок к орбитальным скоростям ядер. Хорошо известно, что в околосолнечном пространстве много астероидов различной природы. Последние в



ходе орбитального движения в плотных около-солнечных областях подвергаются эрозии в результате взаимных столкновений. Скорости этих столкновений, эрозирующих астероиды, составляют величину порядка орбитальных скоростей последних. Поэтому копыя и потоки, порождаемые эрозией каменных и, вероятно, металлических астероидов, должны быть широки, с размерами порядка их больших полуосей. В итоге продукты распада астероидов будут пополнять сфероидальный компонент зодиакального света Солнца и формировать в конечном итоге пылевую корону Солнца. Таким образом, часть инфракрасного излучения звезд может быть результатом излучения их пылевой оболочки, образованной в результате разрушения комет.

## 10. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПЫЛЕВОГО КОПЬЯ КОМЕТЫ И ПОТОКА МЕТЕОРОВ

Испарение ледяной части кометных ядер является сложным процессом, исследованию различных аспектов которого посвящено много статей (Маршал и др. [55], Жао и др. [56], Морено и др. [57], Кимура и др. [58]). В ходе обширной наблюдательной работы было выяснено, что в результате непрерывного испарения ледяной части неоднородного ядра кометы последнее, как правило, приобретает сложную форму, часто делится, обнажая следы аккумуляционного процесса его формирования. Естественно, что скорость испарения льда максимальна в перигелии горячей орбиты ядра кометы около Солнца. Взаимодействие испаряемого газа и мелкой пыли с излучением и звездным ветром Солнца создает условия для появления ярких кометных хвостов, направленных в основном от Солнца. Поведение крупной пыли, силикатного песка, недоступных влиянию отталкивающих сил радиации и солнечного ветра, целиком определяется гравитацией Солнца. Они, по сути, превращаются в самостоятельные небесные тела.

Исследованию структур, создаваемых в ходе испарения ядра со временем, посвящена настоящая статья. Для этого мы использовали следующую модель. Модель включает Солнце, комету и облако теряемых кометой частиц. Комета движется по кеплеровской орбите, расположенной в пространстве в пределах орбит Земли и Юпитера. Перигелий орбиты составляет около 1 а.е., афелий около 4.2 а.е. Комета начинает свое движение вокруг Солнца в перигелии.

Для расчетов использовался пакет программ REBOUND Рейн, Лиу [59], который представляет собой интегратор  $N$  тел, который может интегрировать движение частиц под действием силы гравитации. Частицы могут представлять звезды, планеты, спутники, кольца или частицы пыли.

Далее рассмотрены два варианта эволюции ядра, которые мы считаем основными. В первом (рис. 2) с началом движения кометы с орбитальной начальной скоростью в перигелии, равной 40.0 км/с, запускается процесс “потери” пылинок. Роль пылинок играют точечные объекты, их количество возрастает по мере движения ядра вокруг Солнца. Добавление в модель точек, которые представляют собой малые частицы, теряемые кометным ядром, происходит за счет нагрева солнечным излучением (рис. 2). Число частиц растет от нуля на начальном этапе до 3640 в конце интегрирования. Испаряющиеся фракции кометы увлекают за собой пылинки, которые в нашей модели движутся в первом случае (рис. 2) вдоль радиус-вектора, соединяющего ядро и Солнце. Число пылинок, теряемых на каждом шаге интегрирования (рис. 2), определяется по формуле:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{20}{x^2 + y^2},$$

где  $n$  — число пылинок,  $x$  и  $y$  — координаты места потери пылинок ядром кометы, а.е. Скорость вылетающих пылинок принята равной 126 м/с.

Расчет проведен на 200 лет по времени. Компоненты скорости частицы для рис. 2 в момент выброса вдоль направления на Солнце равны:

$$v_{p_x} = vc_x + 100 \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}},$$

$$v_{p_y} = vc_y + 100 \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}},$$

где  $vc_x$ ,  $vc_y$  — компоненты скорости кометы в соответствующий момент времени (км/с),  $x$ ,  $y$  — ее координаты (а.е.). Скорость кометы в перигелии составляет 40 км/с.

Потеря безмассовых пылинок происходит на каждом шаге интегрирования, имитируя непрерывную потерю частиц. Модель превращения ядра кометы со временем в метеорный поток иллюстрируется на рис. 2. Интересно отметить эксцентричное положение ядра на ранних стадиях его испарения. Испаряющаяся пыль получает орбитальную скорость, величина и направление которой зависит от положения самой кометы. Это обуславливает выход пыли, “ускоренной” испарением ядра, на орбиты с эксцентриситетом, большим эксцентриситета ядра, и с большим орбитальным периодом. “Заторможенная” испарением ядра пыль приобретает более короткие орбитальные периоды, что увеличивает длину лидирующей части пылевого копья ядра по сравнению с отстающей. Со временем копыя превращается в пылевое, метеорное кольцо вокруг Солнца, nasledующее орбиту ядра кометы. Представленная простая модель дает минимальную оценку ширины пылевого потока, поскольку испарение ядра в

силу реактивного эффекта меняет скорость ядра на величину порядка скорости потока оттекающего газа. Это увеличивает ширину пылевого потока примерно в два раза.

Результаты расчетов другого варианта эволюции кометного ядра представлены на рис. 3. Здесь происходит образование пылевых копий в результате разрушения ядра в процессе столкновения с астероидом (рис. 3). Для расчетов использовано облако, состоящее из 1000 точек, представляющих фрагменты распавшегося ядра. Разлет фрагментов, образовавшихся в результате рассматриваемого столкновения, происходит в различных направлениях, равномерно распределенных по сфере, скорость разлета относительно ядра составляет приблизительно 310 м/с.

Итак, на рис. 3 показана эволюция облака пыли и камней, возникшего в результате раздробления сталкивающихся кометного ядра и каменного астероида на окосолнечной орбите. Как и в случае испарения кометного ядра, в потоке на ранних стадиях расширения пылевого облака видна разница в орбитах ускоренных и заторможенных пылинок. Со временем это облако превращается в эллипсоидальный поток, форма которого указывает на место рождения, а ширина целиком определяется скоростью разлета его членов. Внутренняя часть потока образована самыми медленными, а внешняя — самыми быстрыми продуктами столкновения. Напомним, что эти скорости разные даже в предположении центрально симметричного разлета с одинаковыми скоростями из-за изменения орбитального движения продуктов столкновения.

Следует обратить особое внимание на тот факт, что длина копий различается. Опережающее комету копьё короче копья, следующего за кометой, иными словами облако метеоров не симметрично. Это связано с геометрией сложения вектора скорости ядра с векторами скорости пылинок. Скорость опережающих комету пылинок должна быть больше скорости кометы. На рис. 2 и рис. 3 мы видим, что потеря кометного вещества приводит к образованию вытянутых облаков пыли, растянутых вдоль орбиты кометы пылевых “копий”.

## 11. РОЛЬ ЗВЕЗД, ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ И ГИГАНТСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЛАКОВ В РАЗРУШЕНИИ ОБЛАКА ООРТА

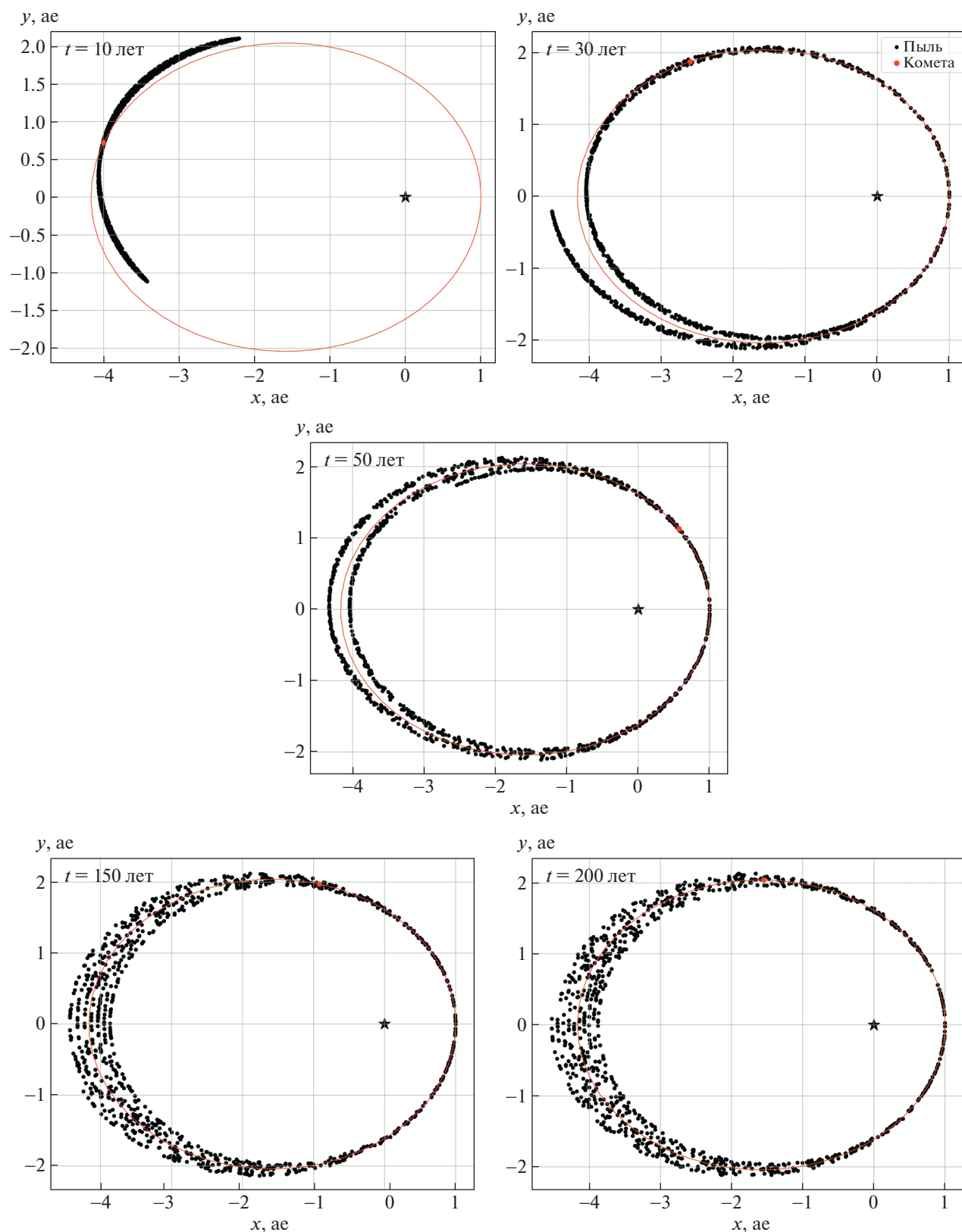
Размеры облака Оорта ограничены гравитацией Галактики. Сфера гравитационного влияния Солнца, вращающегося вокруг центра Галактики, называется сферой Роша или, другими словами, сферой Хилла. Ее размер для Солнца, расположенного в 8 кпк от центра Галактики,  $\sim 10^{18}$  см, а скорость движения комет по эллиптическим ор-

битам с эксцентриситетами, близкими к единице, не превышает  $V_c \sim 10^2$  см/с. Кометы из облака Оорта со временем постепенно переводятся на гиперболические орбиты и теряются Солнцем за счет близких прохождений комет около планет-гигантов Солнечной системы и в результате близких прохождений звезд, соседних с Солнцем. Для потери кометы с внешнего края облака Оорта необходимо придать ей скорость, по величине превосходящую ее кеплеровскую скорость на периферии  $V_c \sim 10^4$  см/с. Чтобы придать комете такую скорость, соседняя звезда с массой  $M$  должна пролететь на расстоянии  $R$  со скоростью  $V$  около облака Оорта Солнца:  $R \leq GM/(V*V_c)$ , где  $G$  — гравитационная постоянная.

Приняв солнечную массу за характерную массу звезд, а за скорость приняв величину  $\sim 30$  км/с (Дехнен [60], Ю, Лиу [61]), найдем  $R < 10^{16}$  см. То есть, звезда поля должна пройти именно сквозь облако Оорта для ускорения его объектов. За время жизни Солнца через его облако Оорта пройдет около  $10^5$  звезд, покрыв  $\sim 10^{37}$  см<sup>2</sup> и, следовательно, заметно истощив его. В итоге, существенная часть объектов облака Оорта покинет его и Солнечную систему, перейдя в межзвездное пространство и “увеличив” перигелии до расстояний, недоступных влиянию планет-гигантов Солнечной системы.

Таким образом, в результате взаимодействия АКП объектов облака Оорта с близкими звездами появляются недоступные для наблюдаемой регистрации далекие кометы, не связанные с планетами-гигантами. Отметим, что радиусы зон влияния звездных скоплений значительно превосходят радиусы зон влияния звезд фона и близки к размерам облака Оорта. Но число скоплений невелико, поэтому частота столкновений с ними очень мала. Звезды поля оказываются более эффективными разрушителями облаков Оорта звезд, как своих, так и соседних.

Другим потенциальным разрушителем облаков Оорта звезд являются гигантские молекулярные облака (ГМО) диска Галактики (Якуби, Нелслусан [62]). Для оценки их роли сравним среднюю плотность облака Оорта с плотностью молекулярного облака. Средняя плотность облака Оорта Солнца около  $10^{-21}$  г/см<sup>3</sup>, а средняя плотность ГМО  $10^{-21}$ – $10^{-20}$  г/см<sup>3</sup> (Су и др. [63]). В итоге становится ясным, что попадание звезды в плотное ядро гигантского молекулярного облака может лишить ее внешних частей облака Оорта. Но столь плотные области занимают малую часть ( $10^{-3}$ ) объема диска Галактики, что делает такое явление весьма редким. Отметим, что наибольшая плотность ГМО имеется в спиральных рукавах Галактики, где вероятность встречи облаков Оорта с ними максимальна.



**Рис. 3.** Мгновенный распад ядра кометы в момент прохождения кометы перигелия в результате столкновения с другим астероидом. Частицы-обломки при столкновении разлетаются симметрично во всех направлениях по сфере. Скорость разлета  $\sim 2$  км/с. Красная точка – остаточное ядро кометы. Черные точки – распределение пылинок в потоке. Время интегрирования составляет от 10 до 200 лет. За 150 лет облака пыли успевают равномерно распределиться вдоль орбиты кометы. Начальная скорость ядра кометы 39.9 км/с.

Наконец, еще одним “врагом” облака Оорта являются звезды поля, случайным образом сближающиеся с Солнцем. Гравитационное взаимодействие с Солнцем таких звезд придает ему за сравнительно короткое время дополнительную скорость  $\delta$ . Поскольку скорости объектов внешних частей облака Оорта  $v_0$  малы, то при  $\delta > v_0$  они теряются Солнцем, поступая в кометное копые Солнца. Оценим величину изменения скорости в рамках простой модели:

$$\delta = \frac{GM}{rv_s},$$

где  $M$  – характерная масса звезды поля, принятая равной массе Солнца,  $v_s = 3 \times 10^6$  см/с – относительная скорость звезд фона,  $r$  – минимальное расстояние между Солнцем и звездой фона за время  $t$ . Последнее находим с помощью формулы:

$$r = \left( \frac{V}{\pi v_s t} \right)^{1/2},$$

где  $V \approx 10^{56}$  см<sup>3</sup> – объем пространства, приходящийся на одну звезду в окрестностях Солнца. Оценку скорости потери объектов облаком Оорта примем равной  $\sqrt{\frac{GM_\odot}{R_0}}$ . После простых преобразований получим условие сохранения объектов

облака Оорта Солнцем:  $\frac{r}{100 \text{ а.е.}} > \left( \frac{R}{10^5 \text{ а.е.}} \right)^{1/2}$ . Из

последнего условия следует, что время жизни комет в “классическом” облаке Оорта с размером  $\sim 10^5$  а.е. составляет  $10^{10}$  лет. В плотных скоплениях и ядрах галактик размеры облаков Оорта звезд могут быть значительно меньше обычных  $10^{18}$  см.

Отметим, что задача о диссипации облаков Оорта в результате столкновений требует численного моделирования, ибо условия потери Солнцем этих облаков зависят от параметров векторов скоростей облака Оорта и звезд поля, скоплений и структуры молекулярных облаков.

## 12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение эволюции комет облака Оорта Солнца и других звезд остается популярным направлением современной астрономии. Рассмотрению вопросов, затронутых нами, посвящено много обзоров, например [64].

Статья посвящена анализу сценария эволюции объектов облака Оорта, к числу которых отнесены ядра комет и астероиды Солнечной системы. Представлен сценарий эволюции кометы, включающий ее выброс из облака Оорта Юпитером на “горячую” орбиту, испарение ледяного компонента Солнцем, превращение пыли и мел-

ких частиц в поток. С помощью простой модели численно изучена эволюция комет и продуктов столкновения каменных астероидов в пылевые, метеорные потоки вокруг Солнца. Показано возможное превращение частиц в поток за счет близких прохождений звезд и звездных скоплений. Анализ гравитационного взаимодействия членов облака Оорта и самого Солнца со звездами диска Галактики позволяет оценить условия сохранения членов облака Оорта гравитационно связанными с Солнцем. В итоге размеры плотной части облака Оорта ограничены величиной в несколько тысяч астрономических единиц. Потерянные объекты из облака Оорта формируют кометное копые Солнца. Рассмотрен вариант распада ядра за счет столкновения с астероидом. Отмечена возможная роль звезд в потере Солнцем внешних частей облака Оорта. Численные расчеты эволюции орбит продуктов распада комет подтверждают представленную картину эволюции и распада комет.

Конечно, представленная в статье картина является только описанием сценария возможной эволюции кометных ядер в окрестности планетных систем, не исчерпывающим все возможные варианты их эволюции. Приведенные аналитические оценки пока осложнены недостаточной информацией о входящих в них параметрах. Представленный сценарий эволюции комет, как обычно, служит эффективным средством постановки новых принципиальных задач, решение которых послужит уточнению картины эволюции кометных систем звезд Солнечного типа. Задача о взаимодействии продуктов распада ядер комет с радиацией и солнечным ветром требует дополнительного и всестороннего исследования.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Для расчетов использовался пакет программ REBOUND, авторы благодарны Рейн, Лиу [59], предоставивших его в открытый доступ. Авторы благодарны рецензенту за замечания и советы, Д.З. Вибе за полезную дискуссию.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы признательны правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *E. Stromgren*, Popular Astronomy **26**, 509 (1918).
2. *E. Stromgren*, Publikationer og mindre Meddelel fra Kobenhavns Observatorium **144**, 1 (1947).
3. *J. H. Oort*, Bull. Astron. Inst. Netherlands **11**, 91 (1950).

4. *S. Charnoz and A. Morbidelli*, *Icarus* **188**, 468, (2007).
5. *P. Dybczynski, G. Leto, M. Jakubik, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **487**, 345 (2008).
6. *A. V. Tutukov, G. N. Dremova, and V. V. Dremov*, *Astronomy Reports* **64**, 936 (2020).
7. *B. Boe, R. Jedicke, K. Meech, et al.*, *Icarus* **333**, 252 (2019).
8. *М. Я. Маров*, *Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной* (М.: Физматлит, 2017).
9. *J. Correa-Otto and M. Calandra*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **490**, 2495 (2019).
10. *J. Parriott and Ch. Alcock*, *Astrophys. J.* **501**, 357, (1998).
11. *E. González Egea, R. Raddi, D. Koester, L. K. Rogers, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **501**, 3916 (2021).
12. *M. Jutzi, P. Michel, and D. Richardson*, *Icarus* **317**, 215 (2019).
13. *E. González Egea, R. Raddi, R. F. Marocco, B. Burningham, and D. Koester*, Contributions to the XIV.0 Scientific Meeting (virtual) of the Spanish Astronomical Society, held 13–15 July 2020, online at <https://www.sea-astronomia.es/reunion-cientifica-2020>, id.100 (2020).
14. *Z. Sekanina and R. Kracht*, *astro-ph/1703.00928* (2017).
15. *G. Schiaparelli*, Firenze: Stamperia Reale (1867).
16. *G. Schiaparelli*, Roma, Tipografia delle scienze matematiche e fisiche (1866).
17. *L. Kresak*, *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia* **27**, 35 (1976).
18. *L. Fladeland, A. Boley, and M. Byers*, *astro-ph/1911.12840* (2019).
19. *A. Jackson and H. Zook*, Abstracts of the 24th Lunar and Planetary Science Conference, held in Houston, TX, 15-19 March 1993, p. 707 (1993).
20. *D. Vokrouhlicky, D. Nesvorny, and L. Dones*, *Astrophys. J.* **845**, 27 (2017).
21. *R. Brasser and A. Morbidelli*, *Icarus* **225**, 40 (2013).
22. *A. Tutukov*, *Astronomy Reports* **63**, 79 (2019).
23. *J. Fernandez and A. Sosa*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **423**, 167 (2012).
24. *C. Snodgrass, A. Fitzsimmons, and S. Weissman*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **414**, 458 (2011).
25. *C. Lisse, J. Bauer, D. Cruikshank, et al.*, *Nature Astronomy* **4**, 930 (2020).
26. *D. Durda, R. Greenberg, and R. Jedicke*, 29th Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 16–20, 1998, Houston, TX, abstract no. 1680 (1998).
27. *D. Hughes*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **199**, 1149 (1982).
28. *F. Colas, B. Zanda, J. Bouley, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **644**, A53 (2020).
29. *M. Ichiguro, D. Kuroda, H. Hanayama, et al.*, *Astrophys. J.* **798**, 34 (2015).
30. *P. Veres, I. Kornos, and J. Toth*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **412**, 511 (2011).
31. *A. Sekhar and D. Asher*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **437**, 71 (2014).
32. *Q. Ye, P. Brown, C. Bell, et al.*, *Astrophys. J.* **814**, 79 (2015).
33. *T. L. Farnham, M. M. Knight, D. G. Schleicher, L. M. Feaga, et al.*, [arXiv:2012.01291](https://arxiv.org/abs/2012.01291) (2020).
34. *M. Ishiguro, D. Kuroda, H. Hanayama, et al.*, *Astrophys. J.* **798**, 34 (2015).
35. *T. Kasuga and D. Jewitt*, *astro-ph/2010.16079* (2020).
36. *B. M. Shustov and A. V. Tutukov*, *Astronomy Reports* **62**, 724 (2018).
37. *G. Schiaparelli*, Note e Alla Teoria Stelle Cadenti, Firenze, Stamperia Reale (1867).
38. *G. Ye, M. T. Hui, and X. Gao*, *Icarus* **254**, 48 (2018).
39. *L. Neslusan, M. Hajdukova, D. Tomko, Z. Kanuchova, and M. Jakubik*, *astro-ph/1410.1307* (2014).
40. *H. Krüger, P. Strub, M. Sommer, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **643**, A96 (2020).
41. *J. Vincent, N. Oklay, M. Pajola, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **587**, 14 (2016).
42. *L. Chu, K. Meech, T. Farnham, et al.*, *Icarus* **338**, 113532 (2020).
43. *Z. Lin, I. Lai, C. Su, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **588**, L3 (2016).
44. *H. Boehnhardt, A. Riffeser, C. Ries, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **638**, A8 (2020).
45. *D. Nesvorny, D. Vokrouhlicky, L. Dones, et al.*, *Astrophys. J.* **845**, 27 (2017).
46. *Q.-Z. Ye, P. G. Brown, and P. Pokorný*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **462**, 3511 (2016).
47. *A. Egal, P. Brown, J. Rendtel, M. Campbell-Brown, and P. Wiegert*, *Astron. and Astrophys.* **640**, A58 (2020).
48. *L. Neslusan, O. Ivanova, M. Husarik, J. Svoren, and Z. Seman Krisandova*, *Planetary and Space Science* **125**, 37 (2016).
49. *D. Nesvorny, W. F. Bottke, D. Vokrouhlický, M. Sykes, and D. J. Lien, J. Stansberry*, *Astrophys. J. Lett.* **679**, L143 (2008).
50. *E. Drolshagen, T. Ott, D. Koschny, et al.*, *Planetary and Space Science* **184**, 104869 (2020).
51. *J. Safrankova, Z. Nemecek, F. Nemecek, et al.*, *Astrophys. J.* **870**, 40 (2019).
52. *T. Galushina and G. Samlarov*, *Planetary and Space Science* **142**, 38 (2017).
53. *A. Egal, P. Weigart, P. Broun, M. Campbell-Brown, and D. Vidaet*, *Astron. and Astrophys.* **642**, A120 (2020).
54. *D. Nesvorny, P. Jenniskens, H. Levison, et al.*, *Astrophys. J.* **213**, 816 (2010).
55. *R. Marschall, Y. Liao, N. Thomas, et al.*, *Icarus* **346**, 113742 (2020).
56. *Y. Zhao, L. Rezac, P. Hartogh, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **494**, 2374 (2020).
57. *F. Moreno, O. Munoz, P. Gutierrez, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **469**, 186 (2017).
58. *H. Kimura, I. Mann, D. Biesecker, and E. K. Jessberger*, *Icarus* **159**, 529 (2002).
59. *H. Rein and S.-F. Liu*, *Astron. and Astrophys.* **537**, A128 (2012).
60. *W. Dehnen*, *Astron. J.* **115**, 2384 (1998).
61. *J. Yu and Ch. Liu*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **475**, 1033 (2018).
62. *M. Jakubik and L. Neslusan*, *CoSka* **38**, 33 (2008).
63. *Y. Su, S. Zhang, X. Shao, et al.*, *Astrophys. J.* **811**, 134 (2015).
64. *D. Jewitt*, *astro-ph/2103.10577* (2021).