



УДК 523.6

Моделирование формирования широких метеорных потоков в результате многоэтапного распада кометных ядер

А.В. Багров, Г.Т. Болгова, А.П. Карташова, В.А. Леонов, Н.А. Сорокин

Институт астрономии РАН, Москва

Известно, что метеорные потоки происходят от распада комет, но моделирование распада показывает, что результирующие потоки должны быть узкими при разумных предположениях о скоростях выброса метеороидных частиц из кометных ядер. Реально наблюдаемые широкие метеорные потоки не удается объяснить даже результатом долгой эволюции орбит частиц под действием возмущений от больших планет. Предлагается механизм формирования широких метеорных потоков в результате многоэтапного распада ядра родительской кометы и эволюции орбит осколков в поле тяготения Земли при близких прохождении, из-за чего параметры орбит отдельных фрагментов могут различаться очень сильно. Результирующий метеорный поток является суперпозицией нескольких узких метеорных потоков, происходящих из распадов отдельных фрагментов родительской кометы. Наблюдаемые «родительские» кометы старых метеорных потоков следует рассматривать как дожившие до нашего времени фрагменты родительской кометы. Отсутствие «родительской кометы» у метеорного потока свидетельствует о ее полном распаде и не может быть поводом для поиска родительского тела среди астероидов.

МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМУВАННЯ ШИРОКИХ МЕТЕОРНИХ ПОТОКІВ В РЕЗУЛЬТАТІ БАГАТОЕТАПНОГО РОЗПАДУ КОМЕТНИХ ЯДЕР, Багров А.В., Болгова Г.Т., Карташова А.П., Леонов В.А., Сорокин Н.А. — Відомо, що метеорні потоки походять від розпаду комет, але моделювання розпаду показує, що результируючі потоки повинні бути вузькими при розумних припущеннях про швидкості викиду метеороїдних частинок з кометних ядер. Реально спостережувані широкі метеорні потоки не вдається пояснити навіть результатом довгої еволюції орбіт частинок під дією збурень від великих планет. Пропонується механізм формування широких метеорних потоків у результаті багатоетапного розпаду ядра батьківської комети і еволюції орбіт осколків у полі тяжіння Землі при близьких проходженнях, внаслідок чого параметри орбіт окремих фрагментів можуть розрізнятися дуже сильно. Результируючий метеорний потік є суперпозицією декількох вузьких метеорних потоків, що походять з розпадів окремих фрагментів батьківської комети. Спостережувані «батьківські» комети старих метеорних потоків варто розглядати як такі, що дожили до нашого часу фрагменти, батьківської комети. Відсутність «батьківської комети» у метеорного потоку свідчить про її повний розпад і не може бути приводом для пошуку батьківського тіла серед астероїдів.

MODELING OF THE ORIGIN OF WIDE METEOROID SHOWER PRODUCED BY MULTI-STAGE PARENT COMET DISASTER, by Bagrov A.V., Bolgova G.T., Kartashova A.P., Leonov V.A., Sorokin N.A. — The meteor showers are believed to be connected to comets as parent bodies, but theoretical modeling shows that primitive evaporation of volatiles from comet nucleus by solar radiation can push away heavy refractory particles with low velocities only. It leads to theoretical radiants that are too narrow for observable ones. The real dimensions of meteor showers can not be explained even by long evolution of the stream's orbit due to gravitational perturbations of large planets. A scenario of multi-stage decay of parent comet is proposed. At the first stage comet is splitting into several comet-like fragments, which orbits change widely during close passages near the Earth. The resulting meteor shower has to be a superposition of a set of narrow meteor showers produced by disaster of individual fragments of the parent comet. Observable «parent» comets of old meteor showers must be considered as survived up today fragments of real parent comet. An absence of «parent comet» for meteor shower should be explained as result of its total decay and cannot give rise to search parent body among asteroids.

Ключевые слова: кометы; распада ядер комет.

Key words: comets; comet nuclei desintegration.

Известно, что главные метеорные потоки происходят от распада комет, и для многих из них найдены родительские кометы. Некоторые потоки не удается связать ни с какими родительскими телами [1–3]. Это можно объяснить тем, что некогда существовавшие родительские тела к настоящему времени полностью распались и больше не существуют. То, что именно распад комет приводит к появлению метеорных потоков, имеет прямые наблюдательные подтверждения как самого распада кометных ядер, так и появлению прежде не наблюдавшихся метеорных потоков [4, 5].

Разработке теории распада кометных ядер с образованием метеороидов посвящено много работ (напр., [6]). Было показано, что простое испарение летучих из ядер комет вследствие нагрева солнечными лучами могут выбросить из него тугоплавкие частицы только с малыми скоростями [7]. Это приводит к теоретическим размерам радиантов потоков существенно меньших, чем наблюдается. Даже ежегодное прохождение Земли поперек трубки орбит потока не может гравитационным рассеянием расширить ее настолько, чтобы позволить наблюдать поток неделями. Кроме того, невысокая энергетика выбросов метеорных частиц и кометных ядер не позволяет объяснить значительную разницу между

орбитальными параметрами «родительской» кометы и связанного с ней метеорного потока [8]. Приемлемого согласования удается добиться лишь при допущении нереальных скоростей выброса до нескольких километров в секунду [8], или непонятного с энергетической точки зрения разового выброса всей массы метеорных частиц и последующей эволюции орбиты метеорного потока вследствие гравитационных возмущений со стороны больших планет [9].

С другой стороны, отсутствие близкой к метеорному потоку по орбитальным параметрам кометы привело к допущению рождения метеороидных потоков как результата столкновений тел в поясе астероидов [10]. Сомнительность подобного подхода следует хотя бы из того, что при ударном разрушении сталкивающихся тел осколки разлетаются в очень широком диапазоне углов, а наблюдение метеоров как узкого потока автоматически предполагает, что большая часть осколков в рое не может наблюдаться. Следовательно, полная масса частиц в таком потоке должна на несколько порядков быть выше, чем масса предполагаемого «родительского» астероида. Кроме того, растущий банк прямых фотографий поверхности астероидов пока ни разу не подтвердил наличия на них хотя бы заметных «сколов» [11]. По-видимому, происхождение метеорных потоков никак не связано с астероидами, — по крайней мере с теми из них, которые по структуре и составу вещества являются аналогами метеоритов.

При разработке теории происхождения метеорных потоков необходимо исходить из трех основополагающих утверждений:

1. Метеорные потоки являются следствием распада кометных ядер в результате потери ими летучих соединений;

2. Метеорные потоки порождаются кометами, содержащими тугоплавкие интрузии метеоритного вида;

3. Тугоплавкие интрузии выбрасываются из кометного ядра струями испаряющихся газов, то есть со скоростями менее единиц метров в секунду.

Первое положение является наблюдательным фактом, что должно быть обязательно отражено в теории образования метеорных потоков.

Второе положение также является наблюдательным фактом, вытекающим из длительности существования метеорных частиц на одной и той же орбите. Теория сублимации показывает, что ледяные частицы сантиметрового размера испаряются в поле солнечной радиации на расстоянии 1 а.е. от Солнца за несколько десятков секунд, а метеорные потоки наблюдаются годами и веками. Только тугоплавкие частицы могут существовать так долго. Кометное же вещество считается сохранившейся до наших дней материей протопланетного диска, то есть состоящим исключительно из первичного вещества — пыли и летучих [12–14]. Поскольку нельзя предположить механизма формирования монолитных тугоплавких частиц непосредственно во время распада кометного ядра, приходится исходить из гипотезы о существовании тугоплавких интрузий в теле кометных ядер.

Третье положение основано на физических представлениях о процессе сублимации летучих с поверхности кометных ядер под действием солнечной радиации. Тепловая энергия расходуется на испарение летучих и на выброс испаренных молекул с тепловыми скоростями. Все тугоплавкое вещество покидает кометное ядро исключительно в результате увлечения частиц испаряющимися в вакуум газами. Мелкие легкие пылинки с фрактальной структурой [15] и низким отношением «масса/площадь сечения» могут увлекаться со скоростями, сопоставимыми со скоростями газовых струй. Плотные и тяжелые метеороидные частицы практически не увлекаются газовыми потоками крайне низкой плотности, и на них нельзя распространять результаты измерений скорости пылинок, проведенные космическими аппаратами.

Как показывают оценки [16], малые скорости выброса метеороидов из родительского тела в любых точках его орбиты приводят к образованию очень узких метеорных потоков, которые Земля должна пересекать за несколько минут. Соответственно, площадь радиации модельных потоков получается также крайне малой, — в десятки раз меньше, чем у реально существующих метеорных потоков. Такое расхождение теории и наблюдений должно быть объяснено.

Мы предлагаем сценарий, в соответствии с которым может быть объяснено происхождение широких метеорных потоков в рамках сформулированных основных положений. Оставляя за рамками данной работы вопрос о происхождении метеоритного вещества в кометных ядрах, мы рассматриваем к качеству родительских тел метеорных потоков планетезимали второго поколения [17]. Эти планетезимали могут иметь вид грозди отдельных «снежков», слабо связанных друг с другом взаимным тяготением и несильной адгезией. Распад таких комет проходит в несколько стадий. Первоначальное кометное ядро может разделиться на вытянутую вдоль орбиты цепочку отдельных фрагментов под действием приливных или иных сил. Такие события уже неоднократно наблюдались [18, 19], так что эта стадия выглядит вполне обычно. Скорости «разбегания» фрагментов трудно даже оценить, так как неизвестны силы, разрушившие связь между фрагментами. В случае распада кометы Шумейкеров–Леви-9 сформировалась явно линейная цепочка фрагментов с незначительными отклонениями их положений от родительской орбиты (рис. 1), а фрагменты кометы 73/P Швассмана–Вахмана-3 образовали широкий рой (рис. 2).

В зависимости от промежутка времени, прошедшего с момента первой стадии распада, длина цепочки фрагментов может составить широкий диапазон расстояний. Когда такая цепочка крупных фрагментов проходит близко к Земле, та своим тяготением изменяет их орбиты, причем тем сильнее, чем ближе фрагмент проходит от планеты. Приращение скорости при таком воздействии описывается формулой:

$$\Delta V = \frac{2GM_{\oplus}}{Vr_0}$$

где M_{\oplus} — масса Земли, V — скорость, и r_0 — минимальное расстояние сближения.

Приращение скорости фрагмента вызывает изменение параметров орбиты фрагмента. Части одной родительской кометы имеют практически одинаковую скорость движения, но вариации пролетных расстояний могут позволить получить веер орбит ансамбля фрагментов любой ширины. Если окончательный распад кометных фрагментов до стадии формирования метеороидного роя происходит без пертурбационного воздействия земного тяготения, то метеорные тела из всех фрагментов родительской кометы сохранятся вблизи родительской орбиты, и сам метеорный рой получится «узким» (ширина роя будет определяться только начальным разбросом кометных фрагментов на первом этапе распада). Если же формированию потоков метеороидных частиц предшествовало растаскивание кометных фрагментов по



Рис. 1. Цепочка фрагментов кометы Шумейкерв-Леви-9 была вытянута в одну линию



Рис. 2. Фрагменты распавшейся кометы 73/P Швассмана-Вахмана-3 образовали широкий рой далеко отошедших от орбиты родительской кометы частей

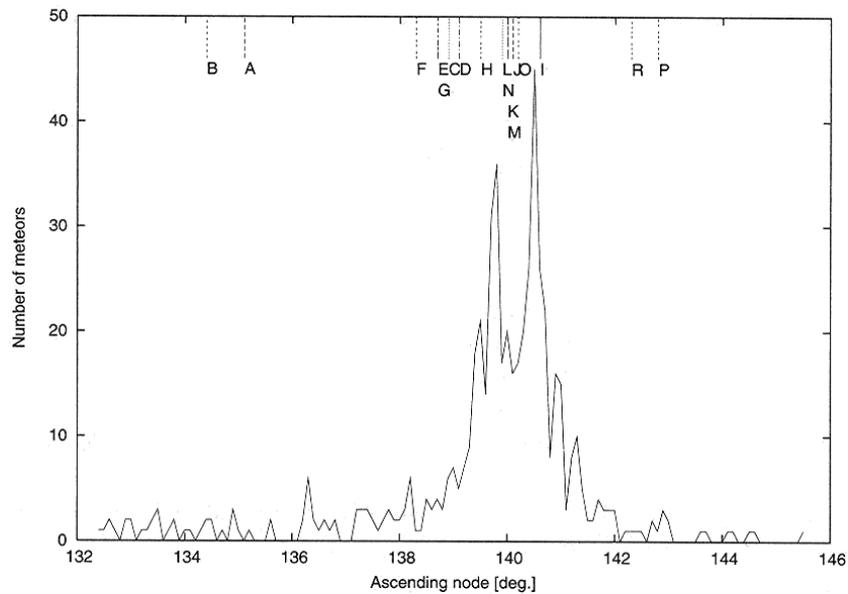


Рис. 3. Профиль активности метеорного потока Персеиды [20], на котором ясно выделяется множество отдельных пиков

различающимся орбитам, то и сформированные из них метеорные рои будут иметь различные, но близкие орбитальные параметры. Каждый рой будет иметь свой узкий радиант и наблюдаться при своем значении долготы Солнца, но ансамбль этих роев, имеющих общее происхождение, будет иметь вид широкого потока с заметной величиной суточного дрейфа положения радианта.

Ни откуда не следует, что все фрагменты родительской кометы должны полностью дезинтегрировать одновременно. Вполне допустим вариант, при котором какие-то фрагменты «угаснут», зарастут теплозащитной пылевой коркой и перестанут проявлять кометную активность. Толщина пористой пылевой корки, при которой кометное ядро сможет выдержать даже нагрев солнечной радиации на расстоянии 0,4 а.е. от Солнца, составляет всего 1,5 метра, поэтому вполне возможно существование среди элементов метеорного роя тел кометного строения диаметром несколько метров и больше. Потухшие кометные ядра в составе метеорных роев не могут быть активированы столкновениями с метеорными частицами своего роя, так как взаимные скорости движения в них составляют единицы метров в секунду. Для того, чтобы разрушить полуметровую пылевую кору и обнажить испаряемое вещество ядра, требуется удар с намного большей скоростью. Вероятность соударений малых тел в Солнечной системе невелика, и некоторые фрагменты родительской кометы могут существовать неразрушенными неопределенно долго.

В качестве примера предложенного подхода рассмотрим формирование широкого метеорного потока Персеиды. Сам факт существования метеорного потока свидетельствует о том, что орбита его родительского тела пересекала орбиту Земли, и отсюда есть основания предположить, что гравитационные отклонения орбит фрагментов родительской кометы проходили в плоскости начальной кометной орбиты. При орбитальной скорости Земли 30 км/с и орбитальной скорости фрагментов 40 км/с скорость сближения $V = 60$ км/с, и для такой модели необходимо сближение до $r_0 = 2.6 \cdot 10^6$ км, чтобы получить расширение пучка орбит фрагментов до размера 40 млн. км вдоль орбиты Земли ($\Delta V = 7.7$ км/с). Это как раз размер той области, в которой наблюдается действие потока Персеиды. Таким образом, наблюдаемые параметры потока Персеиды можно объяснить близким прохождением возле Земли цепочки родительских кометных тел. Её длина может быть оценена из следующих соображений. Наблюдаемый сейчас поток Персеиды медленно усиливает свою активность в течение почти трех недель, а после максимума активности резко падает. Чтобы получить такую картину, необходимо предположить, что Земля прошла мимо конца цепочки (края роя) на расстоянии 2,6 млн. км, а другой конец (край) прошел от нее на расстоянии порядка 5 млн. км (иначе ход изменения активности не был бы близким к линейному). Земля проходит мимо роя такого размера за $8 \cdot 10^5$ с, что дает оценку длины роя в 4,8 млн. км.

Сам метеорный поток Персеид является суперпозицией множества отдельных узких роев (рис. 3) со своими узкими максимумами. Детальное изучение тонкой структуры потока Персеиды могло бы позволить полнее восстановить картину формирования этого потока и уточнить ее отдельные этапы.

Поскольку минимальное время, необходимое для наблюдаемого в настоящее время равномерного заполнения всей трубки орбит частицами потока Персеид с дифференциальной скоростью порядка 1 м/с, занимает около $3 \cdot 10^5$ лет, трудно предположить, что за это время родительская комета смогла пережить примерно 5 тысяч оборотов вокруг Солнца. Поэтому комета 109P/Свифта–Туттля, которая признается сейчас родительской кометой потока Персеиды, по-видимому, является сохранившимся по какой-то

причине фрагментом распавшегося общего родительского тела, лишь недавно ставшим снова проявлять кометную активность.

Работа поддержана грантами РФФИ №06-02-08313 и №06-02-16365.

1. *Астапович И.С.* Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Физматгиз, 1958. — 640 с.
2. *Бабаджанов П.Б.* Метеоры и их наблюдение. — М.: Наука, 1987. — 192 с.
3. *Астапович И.С.* Двадцать шесть метеорных потоков, связанных с кометами // Астр. цирк., 1953. — № 142. — С. 6–10.
4. *Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В.* Метеороидные рои: Образование, эволюция, связь с кометами и астероидами // Астрон. вестн. — 1991. — **25**, № 4. — С. 387–407.
5. *Wiegert P.A., Brown P.G., Vaubaillon J., Schijns H.* The τ Herculid meteor shower and Comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2005. — **361**. — P. 638–644.
6. *Рябова Г.О.* Моделирование выброса крупных пылевых частиц из ядра кометы Галлея // Астрон. вестник РАН. — 1997. — **31**, № 4. — С. 314–326.
7. *Куликова Н.В.* Метеорный рой Драконид (моделирование) // Астр. вестн. — 1989. — **23**, № 4. — С. 289–296.
8. *Куликова Н.В., Мышев А.В., Пивненко Е.А.* Космогония малых тел. — М.: Космосинформ, 1993. — 176 с.
9. *Ryabova G.O.* Mathematical model of the Geminid meteor stream formation // Proceedings of the Meteoroids 2001 Conference, Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden, 6–10 August 2001 / ESA SP-495, November 2001. — P. 77–82.
10. *Ryabova G.O.* Asteroid (1620) Geographos as a possible parent body for a meteor stream // Proceedings of the Meteoroids 2001 Conference // ESA SP-495, November 2001. — P. 63–70.
11. *Багров А.В.* Astronomical problems of the Earth protection against dangerous asteroids // Proceedings of IV ISTC Scientific Advisory Committee Seminar on “Basic Science in ISTC Activities”, Academgorodok, Novosibirsk, April 23–27, 2001. — Novosibirsk: Budker Inst. of Nuclear Physics SB RAS, 2001. — P. 285–291.
12. *Левин Б.Ю.* О происхождении комет // Вопросы космогонии. — 1963. — **9**. — P. 215–231.
13. *Макалкин А.Б., Зиглина И.Н.* Образование планетезималей в транснептуновой области протопланетного диска // Астрон. Вестник. — 2004. — **38**, № 4. — P. 330–343.
14. *Сафронов В.С.* Аккумуляция малых тел на внешней границе планетной системы // Астрон. вестн. — 1996. — **30**. — С. 291–298.
15. *Бисикало Д.В., Шематович В.И.* Кинетическая модель внутренней комы комет // Астр. Цирк. — 1987. — № 1507. — С. 1–3.
16. *Багров А.В., Болгова Г.Т., Карташова А.П., Леонов В.А., Сорокин Н.А.* Модельная оценка угловых размеров области радиации молодых метеорных потоков // Вісник Астрономічної школи. — 2011. — **7**, № 2. — С. 161–165.
17. *Багров А.В.* Два поколения кометных ядер и наблюдательные различия в последствиях их распада // Околоземная Астрономия–2003. Труды конференции. т.1. Терскол, 8–13 сент. 2003. Институт астрономии РАН. — СПб.: ВВМ, 2003. — С. 125–133.
18. *Sekanina Z.* The problem of split comets in review / Comets (ed. L.L. Wilkening). — 1982. — P. 251–287.
19. *Hughes D.W., McBride N.* Short-period comet splitting // J.Br.Astron.Assoc. — **102**, № 5. — P. 265–268.
20. *Kanuchova Z., Svoren J., Neslusan L.* The observed structures in the meteoroid stream of Perseids in the range of photographic meteors // Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso 35, 135–162, (2005).

Поступила в редакцию 24.10.2011