



УДК 523.6

## Модельная оценка угловых размеров области радиации молодых метеорных потоков

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

Институт астрономии РАН, Москва

*В работе рассматривается связь между метеорными потоками и кометами. Численное моделирование процесса распада кометных ядер было применено для получения теоретической оценки геометрических характеристик модельных метеорных потоков. В модели рассмотрен диапазон скоростей выброса тугоплавких частиц от 0,1 до 100 м/с. Для упрощения вычислений рассматривались выбросы частиц в трех точках орбиты: в афелии, в перигелии и на расстоянии 1 а.е. от Солнца. Обсуждается разница между модельными характеристиками метеорных потоков и их наблюдаемыми значениями.*

*МОДЕЛЬНА ОЦІНКА КУТОВИХ РОЗМІРІВ ОБЛАСТІ РАДІАЦІЇ МОЛОДИХ МЕТЕОРНИХ ПОТОКІВ, Багров А.В., Болгова Г.Т., Карташова А.П., Леонов В.А., Сорокин Н.А. — В роботі розглядається зв'язок між метеорними потоками і кометами. Чисельне моделювання процесу розпаду кометних ядер було застосовано для отримання теоретичної оцінки геометричних характеристик модельних метеорних потоків. В моделі розглянутий діапазон швидкостей викиду тугоплавких частинок від 0,1 до 100 м/с. Для спрощення підрахунків розглядалися викиди частинок в трьох точках орбіти: в афелії, в перигелії й на відстані 1 а.о. від Сонця. Обговорюється різниця між модельними характеристиками метеорних потоків та їх спостережуваними значеннями.*

*THE MODELED ESTIMATE OF ANGULAR SIZE FOR YOUNG METEOR SHOWERS RADIANT AREA, by Bagrov A.V., Bolgova G.T., Kartashova A.P., Leonov V.A., Sorokin N.A. — In this paper the connection between meteor showers and comets is considered. Numerical modeling of comet nuclei desintegration process was applied to get the theoretical estimates of geometry characteristics for modeled meteor showers. The model considered the range of particles escape velocities from 0.1 to 100 m/s. To simplify the calculations the particles escapes were considered at three points along the orbit: at aphelion, at perihelion and at 1 AU from the Sun. The difference between modeled characteristics of meteor showers and their observational values is discussed.*

**Ключевые слова:** численное моделирование распада ядер комет.

**Key words:** numeric modeling of comet nuclei desintegration.

подавляющее большинство известных метеорных потоков имеет родственную связь с кометами. Поскольку известно, что распадающиеся кометы формируют метеорные потоки [1], интересно рассмотреть процессы, происходящие при распаде кометных ядер, и получить модельные представления о параметрах образующегося метеорного потока. Мы исходим из гипотезы о двух типах кометных ядер [2].

Кометные ядра первого поколения представляют собой первичные планетезимали, состоящие исключительно из вещества протозвездного/протопланетного облака. Поскольку оно образовано простым сжатием межзвездной газопылевой материей, и эти планетезимали должны состоять исключительно из газов и межзвездных пылинок, причем из-за низкой температуры большинство летучих газовых соединений в протопланетном диске должно было конденсироваться в снежинки, а пылинки — являться центрами конденсации. Никаких камней и металлических слитков метеоритного вещества в первичном облаке не могло быть, так как в межзвездной среде нет условий для их формирования.

В результате аккреции вещества протопланетного облака в планетезимали образовались кометные ядра первого поколения. Эти тела формировались на круговых орбитах; вблизи центра планетной системы эти первичные планетезимали быстро объединялись в планеты [3], а на периферии, где подобные процессы идут очень медленно, некоторые первичные планетезимали сохранились до настоящего времени в первозданном виде.

Метеоритное вещество в виде слитков прошедшей стадию плавления и дифференциации материи могло сформироваться только в крупном теле планетного размера, способном сохранить тепло от распада радиоактивных соединений в своих недрах. Хотя некоторые исследователи полагают, что в самых крупных астероидах кора толщиной 400–500 км могла обеспечить разогрев в области ядра до температур плавления, и что у астероидов Главного пояса должно было быть несколько родительских тел [4, 5], проще предположить, что некогда в Солнечной Системе существовала еще одна большая планета. Она состояла, подобно Земле, из расплавленного вещества, и в момент разрушения ее фрагменты были разброшены по всей Солнечной Системе. Выброшенные на периферию системы рои мелких

частиц, захватывая по пути снег из летучих соединений протопланетного диска, сформировали планетезимали второго поколения. Эти тела состояли из того же первичного вещества, что и кометные ядра (планетезимали) первого поколения, но они дополнительно содержали интрузии переплавленного тугоплавкого вещества. Помимо этого, планетезимали второго поколения должны были обладать еще одним отличительным свойством: их орбиты не были круговыми. Заметный эксцентриситет их орбит являлся следствием того, что эти тела интегрировали в себе момент вещества на далеких круговых орбитах, и фрагментов с небольшим моментом, летевших почти по радиусу от Солнца. В силу этой особенности вероятность захвата планетезималей второго поколения на кометные орбиты оказывается существенно выше, чем для планетезималей первого поколения, сохраняющихся до сих пор в поясе Койпера.

Кометные орбиты имеют афелий порядка сотни миллионов километров, то есть кометы подходят к Солнцу на расстояния, на которых равновесная температура поверхности их ядер заметно выше температуры испарения летучих соединений. Испаряющееся вещество образует голову и хвост кометы, которое быстро ускоряется давлением солнечного света и удаляется за пределы Солнечной системы. Такая же участь постигает и пылинки субмикронного размера, которые происходят из первичной межзвездной пыли. В случае кометных ядер первого поколения после испарения всей массы их летучих соединений от кометы ничего в Солнечной Системе не остается.

По своему строению кометные ядра второго поколения являются замороженной смесью летучих соединений и сравнительно крупных (относительно пылевых частиц) тугоплавких включений. Эти частицы имеют размеры и массы, при которых они надолго сохраняются в Солнечной системе, формируя метеорные потоки. Для нашего рассмотрения важно обозначить характер выброса метеорных частиц из родительского кометного ядра.

Источником энергии выброса вещества из ядра кометы является нагрев солнечными лучами. Испаряющиеся при нагреве летучие соединения свободно расширяются с тепловыми скоростями, попутно увлекая с собой тугоплавкие частицы. Тепловые скорости молекул газов лежат в широком диапазоне значений — от 600 м/с для водорода из расщепленных солнечным ультрафиолетом молекул воды до 160 м/с для молекул углекислого газа [6]. При таких высоких скоростях убегания молекул и ограниченном притоке солнечной энергии плотность газов даже у поверхности кометных ядер очень мала, поэтому и возможность придания тяжелым частицам существенных скоростей тоже невелики.

Испарение летучих идет только в областях кометного ядра, открытых солнечному свету и не закрытых пылевой коркой. Обычно открытая поверхность составляет 10...20% освещенной поверхности ядра [7, 8], выброс газов из которой идет преимущественно в сторону Солнца. Интенсивное испарение газов в открытых местах приводит к образованию каверн в поверхности ядра, которые со временем «зарастают» пылевой коркой [9], из-за чего форма кометного ядра искажена многочисленными неровностями [10].

Численное моделирование описанного процесса было применено для получения теоретической оценки геометрических характеристик модельных метеорных потоков. Мы пренебрегли очевидной анизотропностью выбросов тугоплавких частиц и рассмотрели переход метеороидных частиц с орбиты родительского тела (орбиты кометы) на близкую, отличающуюся от нее только небольшой добавкой скорости. Модель рассматривает прибавление скорости частиц в направлении вектора скорости кометы, в ортогональных к нему направлениях, и в направлении, обратном скорости кометы (этот вариант реализуется при движении кометы от Солнца). В модели рассмотрен диапазон скоростей выброса тугоплавких частиц от 0,1 до 100 м/с, хотя последнее значение близко к скоростям разлета осколков гранаты и никак не может достигаться при распаде кометных ядер. Для упрощения вычислений рассматривались выбросы частиц в трех точках орбиты: в афелии, в перигелии и на расстоянии 1 а.е. от Солнца.

Поскольку характер движения модельных частиц зависит от начальных значений скорости, в качестве наглядного примера рассмотрены начальные орбиты, совпадающие с орбитами некоторых известных метеорных потоков (табл. 1). Моделирование проводилось для орбит с большой полуосью 2,62 а.е. (Дельта Аквариды), 11,5 а.е. (Леониды) и 28 а.е. (Персеиды).

Результаты моделирования сведены в табл. 2–5. Полученные пучки орбит оказались очень узкими. При пересечении с земной орбитой они дают площади радиации в доли градуса, что никак не соответствует наблюдаемым метеорным потокам. Во всех исследованных потоках размеры радиантов составляют более градуса в диаметре, при этом период  $\Delta T$  прохождения Земли через полосу метеорного роя составляет несколько суток (и сопровождается «дрейфом» радианта). Самый «узкий» из наблюдаемых потоков — Леониды — Земля пересекает всего за 2 часа, что на несколько порядков превышает модельное время для всех разумных скоростей выброса частиц из родительского тела.

Приведенные расчеты показывают, что с ростом скоростей выброса быстро растут как размер радианта потока, так и продолжительность его прохождения Землей. Они подтверждают вычислительные эксперименты Н.В.Куликовой и др. [4], согласно которым наблюдаемые характеристики некоторых метеорных потоков могут быть объяснены, если скорости выброса частиц составляют сотни метров в

**Таблица 1.** Параметры начальных орбит

Поток	$a$ (а.е.)	$e$	$I$ (°)	$\Omega$ (°)	$\omega$ (°)	$q$ (а.е.)
Персеиды	28	0,965	113,8	139	151,5	0,953
Леониды	11,5	0,915	162,6	234,5	162,6	0,9775
$\delta$ -Дракониды	2,77	0,64	37,5	13,7	171,1	0,996
$\delta$ -Леониды	2,62	0,75	6	338	259	0,655

**Таблица 2.** Модельные характеристики потока Персеиды

	Скорость выброса $\Delta V$ (м/сек)			
	0,1	1,0	10,0	100,0
Выброс частиц вдоль направления движения				
$\Delta\varphi_n$ (°) — в перигелии орбиты	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,14 \cdot 10^{-1}$	0,14
$\Delta\varphi_r$ (°) — на расстоянии 1 а.е.	$0,28 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-2}$	$0,28 \cdot 10^{-1}$	0,28
$\Delta\varphi_a$ (°) — в афелии орбиты	$0,76 \cdot 10^{-2}$	$0,76 \cdot 10^{-1}$	0,31	7,58
$\Delta T$ (сут) — продолжительность прохождения Земли через рой	$0,6 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-1}$
Выброс частиц поперек направления движения				
$\Delta\varphi_n$ (°) — в перигелии орбиты	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-2}$	$0,26 \cdot 10^{-1}$	0,26
$\Delta\varphi_r$ (°) — на расстоянии 1 а.е.	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-2}$	$0,26 \cdot 10^{-1}$	0,26
$\Delta\varphi_a$ (°) — в афелии орбиты	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-2}$	$0,26 \cdot 10^{-1}$	0,26
$\Delta T$ (сут) — продолжительность прохождения Земли через рой	$0,6 \cdot 10^{-10}$	$0,6 \cdot 10^{-8}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$0,6 \cdot 10^{-4}$

**Таблица 3.** Модельные характеристики потока Леониды

	Скорость выброса $\Delta V$ (м/сек)			
	0,1	1,0	10,0	100,0
Выброс частиц вдоль направления движения				
$\Delta\varphi_n$ (°) — в перигелии орбиты	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,14 \cdot 10^{-1}$	0,14
$\Delta\varphi_r$ (°) — на расстоянии 1 а.е.	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-2}$	$0,29 \cdot 10^{-1}$	0,29
$\Delta\varphi_a$ (°) — в афелии орбиты	$0,31 \cdot 10^{-2}$	$0,31 \cdot 10^{-1}$	0,31	3,1
$\Delta T$ (сут) — продолжительность прохождения Земли через рой	$0,15 \cdot 10^{-8}$	$0,15 \cdot 10^{-6}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-2}$
Выброс частиц поперек направления движения				
$\Delta\varphi_n$ (°) — в перигелии орбиты	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,14 \cdot 10^{-1}$	0,14
$\Delta\varphi_r$ (°) — на расстоянии 1 а.е.	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,14 \cdot 10^{-1}$	0,14
$\Delta\varphi_a$ (°) — в афелии орбиты	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,14 \cdot 10^{-1}$	0,14
$\Delta T$ (сут) — продолжительность прохождения Земли через рой	$0,76 \cdot 10^{-10}$	$0,77 \cdot 10^{-8}$	$0,77 \cdot 10^{-6}$	$0,77 \cdot 10^{-4}$

секунду и даже больше.

Высокие скорости выброса не могут быть приняты по физическим соображениям. Не существует механизма разгона тугоплавких частиц до скоростей, превышающих скорость звука расширяющейся газовой среды, увлекающей частицы. Поэтому рассмотренные в [4] скорости выброса частиц из кометного ядра от сотен метров в секунду до десятков километров в секунду (!) можно считать моделированием неосуществимых явлений. Реально скорости выброса едва ли превышают 1 м/с, поэтому возникает вопрос: чем можно объяснить столь серьезные расхождения между модельными характеристиками метеорных потоков и их наблюдаемыми значениями?

Во-первых, можно предположить, что на процессы формирования наблюдаемых метеорных потоков существенное влияние оказывала Земля. Если предположить, что распад родительского кометного ядра проходил в несколько этапов, то уже на стадии распада первичного ядра на несколько фрагментов каждый из них мог изменить свою орбиту при близком прохождении возле Земли. Рассмотрению этого подхода был посвящен наш доклад на международной конференции «The Solar system bodies: from optics to geology» [11].

Во-вторых, многократное пересечение роя частиц в потоке должно приводить в действие механизм гравитационного маневра частиц в поле тяготения Земли, поскольку он приводит к отклонению вектора скорости частиц на угол до нескольких градусов. Сильно отклоненные частицы оказываются на орбитах, на которых они могут считаться спорадическими. Пролетающие на расстоянии 5...20 радиусов от центра Земли, частицы сохраняют свою близость к родительскому потоку, но расширяют видимую область его радиации. Поскольку гравитация заметно действует только в пределах области Хилла, и деформируемая притяжением Земли часть потока составляет ничтожную долю всего его объема, требуются сотни и тысячи периодов обращения потока вокруг Солнца, чтобы расширить радиант до обычно наблюдаемых размеров. В результате этого механизма профиль сечения потока должен представлять собой узкий максимум с шириной, определяемой скоростью выброса частиц из родительского тела, и с симметричными

**Таблица 4.** Модельные характеристики потока  $\delta$ -Дракониды

	Скорость выброса $\Delta V$ (м/сек)			
	0,1	1,0	10,0	100,0
Выброс частиц вдоль направления движения				
$\Delta\varphi_n(^{\circ})$ — в перигелии орбиты	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-2}$	$0,15 \cdot 10^{-1}$	0,15
$\Delta\varphi_r(^{\circ})$ — на расстоянии 1 а.е.	$0,38 \cdot 10^{-3}$	$0,38 \cdot 10^{-2}$	$0,38 \cdot 10^{-1}$	0,38
$\Delta\varphi_a(^{\circ})$ — в афелии орбиты	$0,68 \cdot 10^{-3}$	$0,68 \cdot 10^{-2}$	$0,68 \cdot 10^{-1}$	0,68
$\Delta T$ (сут) — продолжительность прохождения Земли через рой	$0,8 \cdot 10^{-8}$	$0,8 \cdot 10^{-6}$	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$
Выброс частиц поперек направления движения				
$\Delta\varphi_n(^{\circ})$ — в перигелии орбиты	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-2}$	$0,15 \cdot 10^{-1}$	0,15
$\Delta\varphi_r(^{\circ})$ — на расстоянии 1 а.е.	$0,38 \cdot 10^{-3}$	$0,38 \cdot 10^{-2}$	$0,38 \cdot 10^{-1}$	0,39
$\Delta\varphi_a(^{\circ})$ — в афелии орбиты	$0,68 \cdot 10^{-3}$	$0,68 \cdot 10^{-2}$	$0,68 \cdot 10^{-1}$	0,68
$\Delta T$ (сут) — продолжительность прохождения Земли через рой	$0,8 \cdot 10^{-8}$	$0,8 \cdot 10^{-6}$	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$

**Таблица 5.** Модельные характеристики потока  $\delta$ -Леониды

	Скорость выброса $\Delta V$ (м/сек)			
	0,1	1,0	10,0	100,0
Выброс частиц вдоль направления движения				
$\Delta\varphi_n(^{\circ})$ — в перигелии орбиты	$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-2}$	$0,12 \cdot 10^{-1}$	0,12
$\Delta\varphi_r(^{\circ})$ — на расстоянии 1 а.е.	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,27 \cdot 10^{-2}$	$0,27 \cdot 10^{-1}$	0,27
$\Delta\varphi_a(^{\circ})$ — в афелии орбиты	$0,82 \cdot 10^{-3}$	$0,82 \cdot 10^{-2}$	$0,82 \cdot 10^{-1}$	0,82
$\Delta T$ (сут) — продолжительность прохождения Земли через рой	$0,2 \cdot 10^{-9}$	$0,2 \cdot 10^{-7}$	$0,2 \cdot 10^{-5}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Выброс частиц поперек направления движения				
$\Delta\varphi_n(^{\circ})$ — в перигелии орбиты	$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-2}$	$0,12 \cdot 10^{-1}$	0,12
$\Delta\varphi_r(^{\circ})$ — на расстоянии 1 а.е.	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,27 \cdot 10^{-2}$	$0,27 \cdot 10^{-1}$	0,27
$\Delta\varphi_a(^{\circ})$ — в афелии орбиты	$0,82 \cdot 10^{-3}$	$0,82 \cdot 10^{-2}$	$0,82 \cdot 10^{-1}$	0,82
$\Delta T$ (сут) — продолжительность прохождения Земли через рой	$0,2 \cdot 10^{-9}$	$0,2 \cdot 10^{-7}$	$0,2 \cdot 10^{-5}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$

относительно максимума крыльями. Распределение частиц в крыльях определяется начальной пространственной плотностью частиц в потоке и продолжительностью их рассеивания (суммарной продолжительностью взаимодействия потока с гравитационным полем Земли). Было бы интересно исследовать какой-нибудь сильный и узкий метеорный поток и проанализировать его профиль на репрезентативном наблюдательном материале.

В то же время различия в скоростях частиц в потоке приводит к определенным различиям их периодов обращения, так что со временем частицы первоначально компактного роя заполняют всю трубку орбит потока. Например, сейчас рой частиц потока Леониды с периодом обращения 14 244 суток Земля пересекает всего за два часа, но вытянут настолько, что звездные ливни из него наблюдаются по три года подряд. Сопоставление длины и ширины роя приводит к оценке возраста Леонид примерно  $5 \cdot 10^5$  лет. Следует подчеркнуть, что полученные результаты модельных расчетов будут справедливы для метеорных потоков, проходящих вдали от больших планет, и не испытывающих расширяющего воздействия планетной гравитации. Такие межпланетные метеорные потоки должны очень долго сохранять свою компактность и представлять очень большую угрозу для осуществления межпланетных полетов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грантами 06-02-08313 и 06-02-16365.

1. *Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В.* Метеороидные рои: Образование, эволюция, связь с кометами и астероидами // *Астрон. вестн.* — 1991. — **25**, № 4. — С. 387–407.
2. *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.
3. *Багров А.В.* Быстрая шкала времени формирования планетной системы на досолнечной стадии эволюции протосолнечного облака. / Тезисы докладов на Восьмом съезде Астрономического Общества и Международном симпозиуме АСТРОНОМИЯ–2005: Состояние и перспективы развития // *Труды Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга*, Т. 78. — М., 2005. — С.86.
4. *Куликова Н.В., Мышев А.В., Пивненко Е.А.* Космогония малых тел. — М.: Космосинформ, 1993. — 176 с.
5. *Симоненко А.Н.* Метеориты — осколки астероидов. — М.: Наука, 1979. — 224 с.
6. *Бисикало Д.В., Шематович В.И.* Кинетическая модель внутренней комы комет // *Астр. Цирк.* — 1987. — № 1507. — С. 1–3.
7. *Greenberg J.M., Li A.* All comets are born equal: infrared emission by dust as a key to comet nucleus composition // *Planetary and Space Science.* — 1999. — **47**. — P. 787–795.

8. *Шульман Л.М.* Ядра комет. — М.: Наука, 1987. — 229 с.
9. *Иванова А.В., Шульман Л.М.* Тепловой баланс кратерной структуры на поверхности кометного ядра для различных геометрических форм // конференция «Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее», Санкт-Петербург, 26–30 июня 2006 г.
10. *Newburn R.Jr., Acton C.H.Jr., Bhaskaran S., et al.* Stardust Imaging of Comet Wild 2: First Look // *Lunar and Planetary Science XXXV* (2004) 1437.
11. *Багров А.В., Болгова Г.Т., Карташова А.П., Леонов В.А. Сорокин Н.А.* Моделирование формирования широких метеорных потоков в результате многоэтапного распада кометных ядер // Доклад на конф. «The Solar System Bodies: From Optics to Geology» — Харьков, 2008.

Поступила в редакцию 24.10.2011