

## THE ORIGIN AND EVOLUTION OF METEOROID STREAMS

Yu. V. OBRUBOV

*The theories of origin of meteoroid streams are discussed. The main perturbing forces determining the evolution of meteoroid stream are described. It was shown that one meteoroid stream can produce several pairs of meteor showers active in different seasons of the year. Data on established interrelations between asteroids, comets, and meteor showers are given.*

**Обсуждаются теории происхождения метеороидных роев. Описаны основные возмущающие силы, определяющие эволюцию метеороидных роев. Показано, что в результате эволюции один метеороидный рой может породить несколько пар метеорных потоков, действующих в разное время года. Приведены данные об установленных взаимосвязях комет, астероидов и метеорных потоков.**

© Обрубов Ю.В., 1999

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ МЕТЕОРОИДНЫХ РОЕВ

Ю. В. ОБРУБОВ

*Калужский филиал Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева  
Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана*

### ВВЕДЕНИЕ

В Солнечной системе кроме больших планет движется множество более мелких тел. Это астероиды, кометы и метеорные частицы или так называемые метеороиды. Считается, что астероиды являются каменными телами, а кометы представляют собой конгломерат замерзших газов и пылевых частиц. При приближении комет к Солнцу газы начинают испаряться и, покидая ядро, увлекают за собой пылевые частицы. Этот процесс приводит к образованию характерных хвостов комет. Скорости, с которыми твердые частицы покидают ядро родительской кометы, относительно малы. Поэтому они движутся по гелиоцентрическим орбитам, мало отличающимся от орбиты ядра. В некоторых случаях орбиты комет проходят очень близко от орбиты Земли, а иногда и пересекают ее. Если в этом районе оказывается и Земля, то метеороиды вторгаются в ее атмосферу со скоростями от 11 до 72 км/с. В результате наблюдается явление метеорного дождя (тысячи метеоров в час) или метеорного потока (десятки—сотни метеоров в час), возникающего из-за ионизации атмосферного столба вдоль траектории полета метеороидов. Со временем метеороиды рассеиваются вдоль всей орбиты кометы, и тогда ежегодно при прохождении Землей области пересечения орбит наблюдается явление метеорного потока. Известно около 20 ежегодных метеорных потоков с достаточно высоким часовым числом метеоров — от 20 до 140 метеоров в час. Эти потоки называют главными (табл. 1).

В табл. 1 дата — номер дня и месяца проявления максимальной активности потока,  $\alpha$  — прямое восхождение,  $\delta$  — склонение радианта в градусах,  $V$  — геоцентрическая скорость метеороидов (в км/с),  $N$  — число метеоров в час в максимуме активности по визуальным наблюдениям, для дневных потоков — по радиолокационным ( $D$  означает метеорный дождь, то есть  $N > 10\,000$ ). В графе “Родительское тело” даны название периодической кометы и ее условное обозначение, а для астероидов — название и (в скобках) порядковый номер по каталогу малых планет. Координаты радианта  $\alpha$  и  $\delta$  — координаты

**Таблица 1.** Главные ежегодные метеорные потоки, периодические метеорные дожди и их родительские тела

Название потока	Дата	$\alpha$	$\delta$	$V$ , км/с	$N$	Родительское тело
Квадрантиды	03.01	231°	+50°	41	140	Мачхолца 1986 VIII
Лириды	22.04	271	+34	48	12	Тэтчер 1861 I
$\eta$ -Аквариды	03.05	336	0	66	30	Галлея 1910 II
Дневные Ариетиды	07.06	43	+23	39	60	Мачхолца 1986 VIII
$\xi$ -Персеиды	07.06	62	+23	27	40	Энке 1971 II
$\beta$ -Тауриды	29.06	86	+19	30	30	Энке 1971 II
Южн. $\delta$ -Аквариды	29.07	333	-16	41	30	Мачхолца 1986 VIII
Сев. $\delta$ -Аквариды	12.08	339	-5	42	20	Мачхолца 1986 VIII
$\alpha$ -Каприкорниды	30.07	307	-10	23	30	Адонис (2101)
Южн. $\iota$ -Аквариды	05.08	333	-15	34	15	???
Сев. $\iota$ -Аквариды	20.08	327	-6	31	15	???
Персеиды	12.08	46	+57	59	70	Свифта–Туттля 1862
К-Цигниды	18.08	286	+59	25	5	???
Дневные Секстантиды	29.09	152	0	32	30	Фаэтон (3200)
Дракониды	09.10	262	+54	20	Д	Джиакобини–Циннера
Ориониды	21.10	94	+16	66	30	Галлея 1910 II
Южн. Тауриды	03.11	50	+14	27	7	Энке 1971 II
Сев. Тауриды	13.11	58	+22	29	7	Энке 1971 II
Леониды	17.11	152	+22	71	Д	Темпеля–Туттля 1866
Андромедида	27.11	25	+44	16	Д	Биэлы 1846 II
Дек. Фенициды	05.12	15	-55	12	20	Бланпейна 1819 IV
Геминиды	14.12	112	+32	34	70	Фаэтон (3200)
Урсиды	22.12	217	+76	33	20	Мачхолца 1986 VIII

точки на небесной сфере, в которой пересекаются видимые пути метеоров потока.

Менее интенсивные потоки называют малыми, и их число составляет по разным данным несколько тысяч.

Исследования метеорного вещества и метеорных явлений имеют и большое прикладное значение. Метеоры являются естественными зондами для изучения направления ветров и других параметров атмосферы на высотах 60–120 км. Ионизируя атмосферу, метеоры создают ночью плотный и тонкий ионосферный слой – так называемый спорадический слой Es в ионосфере Земли. Ионосферные неоднородности, создаваемые метеорами, используются в радиосвязи для передачи сигналов на сверхдальние расстояния. Нельзя забывать и об опасности, которую представляют метеорные частицы для космических аппаратов.

Научное значение метеорных потоков заключается в том, что они являются своеобразными каналами, по которым кометное вещество попадает на Землю и становится доступным для изучения. Так как считается, что кометы состоят из остатков протопланетного вещества, практически не изменившегося в их ядрах за миллиарды лет, то, исследуя химиче-

ский состав метеороидов, можно решать задачи, связанные с происхождением Солнечной системы.

### ТЕОРИИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ МЕТЕОРОИДНЫХ РОЕВ

Начиная с открытия Дж. Скиапарелли, установившего сходство орбит метеорного потока Персеид и кометы 1862 III, большинство исследователей считают, что метеороидные рои образуются при разрушении ядер комет. Эта точка зрения не изменилась до настоящего времени, хотя представления о составе и структуре кометных ядер пересматривались и уточнялись неоднократно. Основные положения теории происхождения метеороидных роев сформулированы известным русским ученым Ф.А. Брехиным [1] еще в прошлом веке:

- 1) метеороидные рои образуются при разрушении ядер комет;
- 2) выброс метеорных частиц происходит с ненулевой скоростью;
- 3) длительное время метеороидный рой и комета могут существовать совместно;
- 4) одна комета может образовать несколько метеорных потоков.

Эти положения соответствуют современным представлениям о структуре, происхождении и эволюции комет и метеороидных роев, хотя их содержание и смысл изменились существенно.

В зависимости от принятой модели кометного ядра рассматривались и различные процессы образования метеороидных роев. Согласно Дж. Скиапарелли, ядро кометы представляло собой скопление метеороидов, связанных гравитационным притяжением. Образование метеороидного роя (или разрушение кометы) происходило под действием приливных сил Солнца, то есть частицы покидали комету с нулевыми скоростями. Эта теория не объясняла многие наблюдаемые явления как в кометах (газовые и аномальные хвосты), так и в метеорных потоках (большие длительности действия и площади радиации).

Основываясь на наблюдениях, Ф.А. Бредихин предположил существование импульсов, под действием которых происходит выброс метеороидов из ядер комет (со скоростями до 3 км/с). При этом он не отвергал теории распада комет под действием приливных сил и считал, что в этом процессе кроме Солнца участвуют и большие планеты.

Идея монолитного ядра кометы, вероятно, впервые была высказана Б.Ю. Левиным [2] в 1943 году. Он считал, что ядрами комет могут быть твердые глыбы, пропитанные газами, которые выделяются при нагревании ядра вблизи Солнца. Эта модель не могла объяснить ни относительно большие потери массы кометой при каждом прохождении перигелия, ни образование метеороидных роев. Тем не менее вопрос о ядре как множестве гравитационно связанных тел был снят.

Наблюдения и исследования комет показали, что в их состав входят замерзшие газы  $CN$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $CH$ ,  $OH$ ,  $NH$ ,  $CH_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  и им подобные, а также пылевые частицы различных размеров. На этом основании Ф. Уиппл [3] разработал модель ядра кометы как конгломерата легкоплавких льдов и пылевых частиц. Под действием солнечного излучения происходит нагревание и испарение льдов, а потоки сублимирующих газов выносят в голову кометы и ее хвосты пылевую материю. Некоторые из частиц не могут покинуть поверхность ядра или возвращаются на нее под действием притяжения ядра и со временем образуют пылевую корку. Она препятствует проникновению тепла внутрь и ослабляет скорость пыле- и газовой выделению. По этой причине “старые” кометы (в основном движущиеся по короткопериодическим орбитам,  $P < 300$  лет), многократно побывавшие вблизи Солнца, в среднем намного слабее “новых” долгопериодических комет.

Спокойный распад кометных ядер при сублимации льдов — наиболее вероятный путь образования метеороидных роев. Но нельзя, конечно, исключать образование роя при катастрофических процессах распада ядра кометы под действием приливных,

центробежных или иных сил и при возможных столкновениях с астероидами или метеороидами.

По мнению Ф.А. Бредихина, сомнения в кометном происхождении метеорных потоков появились из-за огромной разницы между числом известных тогда комет (310) и числом метеорных потоков (3000). Поэтому появились работы, в которых происхождение метеорных потоков приписывалось другому источнику. Б.Ю. Левин вообще считал сопоставление общего числа комет и метеорных потоков непредставляющим интереса. Он напоминает, что три слабые кометы, связанные с метеорными потоками Лирид, Персеид и Леонид, наблюдались только в 1861–1866 годы, и если бы их появление было упущено наблюдателями, то эти интереснейшие потоки остались бы без комет-родоначальниц.

Кометные ядра возникли миллиарды лет назад в период формирования Солнечной системы, тогда как метеороидные рои могут существовать не более десятков или сотен тысячелетий. Поэтому невозможно допустить совместное происхождение комет и метеороидных роев. Метеороидные рои образуются при распаде кометных ядер и сейчас, о чем свидетельствуют наблюдения кометных явлений.

Вопрос о возможности образования метеороидных роев при разрушении астероидов поднимался неоднократно. Несомненно, что при столкновениях астероидов между собой, а также с метеорными телами происходит их разрушение и часть вещества в виде пыли и более крупных осколков продолжает существовать самостоятельно, двигаясь вокруг Солнца по различным орбитам. Вопрос заключается в том, насколько могут быть близки орбиты частиц, покинувших астероид, и достаточно ли их будет, чтобы при пересечении такого роя Землей в ее атмосфере наблюдался метеорный поток. Первая часть вопроса заключается в определении скоростей выброса частиц при ударном взаимодействии, а вторая — в энергии удара. И наконец, еще один немаловажный вопрос: как часто происходят столкновения, при которых возможно образование достаточно плотного роя? Если из наблюдений комет хорошо известна скорость потери их массы, то еще не было случая наблюдений дробления астероида. Существующие оценки частоты столкновений и прогнозирование их результатов являются в основном теоретическими или основаны на лабораторных экспериментах.

Как показано в работе [7], нередко астероиды, кометы и метеорные потоки образуют довольно сложные комплексы, возможно связанные генетически. В этих комплексах очень трудно определить, какие потоки и какими именно телами образованы. Предполагается, что все крупные объекты комплекса произошли после дробления ядра гигантской кометы.

### ВЫБРОС МЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ РОДИТЕЛЬСКИХ ТЕЛ И ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Согласно ледяной модели кометного ядра, метеороиды выбрасываются из него силой давления сублимирующих газов. В этом случае скорости выброса частиц будут зависеть от их массы и плотности. Для качественных исследований достаточно использовать формулу Ф. Уиппла. Скорость выброса  $C$  метеороида плотностью  $\delta$  г/см<sup>3</sup> и радиусом  $\rho$  см из ядра кометы радиусом  $R_c$  км на расстоянии  $r$  а.е. оценивается выражением

$$C = 3,28 \cdot \left[ \frac{4R_c}{n_s \rho \delta r^{9/4}} \right]^{1/2} \text{ м/с,}$$

где  $n_s$  – эффективность сублимации.

Эксперименты по косому удару поликарбонатного цилиндрического снаряда в базальтовую сферу со скоростью 2,7 км/с показали, что движение осколков происходит симметрично относительно оси, соединяющей точку удара и центр мишени. Исключение составляют лишь 20% (по массе) осколков, вылетающих непосредственно из точки удара. Наиболее быстрые фрагменты вылетают под наименьшими углами к оси конуса выброса частиц. Эксперименты по удару со скоростями от 3 до 10 км/с установили, что 95% осколков выбрасываются со скоростью менее 1 км/с. При скоростях столкновений от 3 до 6 км/с большая часть осколков вылетает со скоростями менее 0,5 км/с. На основании этих данных можно предположить, что и при столкновениях астероидов фрагменты разлетаются с относительно небольшими скоростями.

Допустим, что разрушается астероид-мишень, масса которого значительно больше массы астероида-снаряда. Массу  $m$  снаряда можно вычислить по формуле

$$m = \frac{2Qk}{\alpha V},$$

где  $\alpha$  – относительная доля энергии снаряда, идущая на выброс вещества в рой,  $Qk = 9 \cdot 10^{22}$  эрг – постоянная величина,  $V$  – скорость столкновения. Для астероида-мишени ( $a = 2-3$  а.е.,  $e = 0,5-0,7$ ) и астероида-снаряда ( $a = 3$  а.е.,  $e = 0$ ) из основного пояса скорость столкновения может быть от 5 до 20 км/с. На испарение каменистого вещества расходуется  $8 \cdot 10^{10}$  эрг/г, на фрагментацию –  $1 \cdot 10^{10}$  эрг/г. Так, если  $\alpha = 0,1$ , а  $V = 5$  км/с, то масса снаряда должна быть около  $8 \cdot 10^{12}$  г, что при плотности  $3,5$  г/см<sup>3</sup> соответствует радиусу астероида-снаряда 90 м. Если же  $\alpha = 0,01$ , то радиус снаряда должен быть около 200 м. Из приведенных оценок следует, что метеороидный рой может образоваться только при столкновении относительно крупных тел, а вероятность такого столкновения мала. Если же допустить, что с поверхности астероида частицы вылетают в результате столкновений с метеороидами крупнее  $10^{-6}$  г, то тогда для образования роя потребуются миллионы

или десятки миллионов лет. В этом случае рой распадется, не успев образоваться.

Вопрос о возможности связи метеороидных роев с астероидами групп Аполлона, Амура и Атона (AAA), орбиты которых могут пересечь орбиту Земли, решается на основе гипотезы Эпика. Согласно этой гипотезе, хотя бы некоторые из астероидов AAA являются “угасшими” кометами, то есть кометами, ядра которых покрыты толстой (до 10 м) пылевой корой. В этом случае предполагается, что метеороидные рои образовались во время существования таких астероидов в активной, кометной стадии в соответствии с рассмотренным выше механизмом выброса пылевых частиц потоками газов.

На метеорные частицы сразу после их отделения от родительского тела начинает действовать давление света. Сила этого давления направлена по орбитальному радиусу-вектору частицы и обратно пропорциональна квадрату расстояния. Так как сила солнечного притяжения изменяется по такому же закону, но направлена в противоположную сторону, то давление света вызывает действие, эквивалентное уменьшению массы Солнца.

Формулы, по которым можно определить элементы орбиты  $a$ ,  $e$  и  $p$  отделившегося от родительского тела с нулевой скоростью метеороида, изменившиеся из-за давления света, записываются в виде

$$e = \frac{\beta h^2 V_0^2 (1 - \mu(rV_0^2))}{e_0 \mu},$$

$$a = \beta a_0 \left( \frac{2a_0}{r-1} \right),$$

$$p = \beta p_0,$$

где индексом 0 отмечены элементы орбиты родительского тела в момент отделения частицы ( $e$  – эксцентриситет орбиты,  $a$  и  $p$  – большая полуось и параметр),  $\beta$  – отношение силы давления света к силе притяжения Солнцем,  $h$  – удвоенная секториальная скорость,  $r$  – расстояние от Солнца в момент отделения частицы.

Выброс метеорных частиц из родительских тел с ненулевыми скоростями и давление света обуславливают начальную дисперсию орбит частиц. Дисперсия больших полуосей орбит метеороидов определяет время, в течение которого частицы роя распределяются вдоль всей орбиты родительского тела.

Результаты моделирования выброса частиц из родительских тел позволили получить представление о пространственной форме молодых метеороидных роев. Было показано, что молодой метеороидный рой является плоским, узким в перигелии и широким в афелии.



## ПЛАНЕТНЫЕ И НЕГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Силы, обуславливающие движение небесных тел, чрезвычайно многочисленны и разнообразны по характеру и происхождению. Законы, определяющие их изменение, в некоторых случаях известны приблизительно, а в некоторых совершенно неизвестны. Изучение движения с абсолютной точностью и во всех подробностях невозможно. Поэтому точная задача всегда заменяется приближенной, учитывающей наиболее значительные из известных сил.

Основной возмущающей силой в движении малых тел Солнечной системы является притяжение больших планет. Планетные возмущения изменяют все элементы орбит. Степень действия планетных возмущений зависит от условий движения возмущаемых тел (в данном случае астероидов, комет и метеороидов) относительно больших планет.

Одним из высокоточных методов исследования эволюции орбит тел Солнечной системы под действием гравитационных возмущений является метод Э. Эверхарта. Этот метод разработан специально для решения задач небесной механики. Следует отметить, что исследования на больших интервалах времени носят характер математического моделирования и представляют одну из возможных моделей движения, дающую особенности эволюции орбиты рассматриваемого объекта.

Наряду с численными методами решения точных уравнений небесной механики большое распространение получили и качественные методы вычисления только вековых возмущений первого порядка.

В 1818 году К.Ф. Гаусс предложил метод вычисления вековых возмущений первого порядка, который не требует разложения возмущающей функции в ряды по степеням эксцентриситетов или взаимных наклонов. Х. Альфан на основе применения гипергеометрических рядов создал изящный математический аппарат, реализующий идеи Гаусса. Однако допущенные им ошибки долгое время препятствовали применению метода. Томский ученый Н.Н. Горячев, детально разобравшись в работе Альфана, устранил ошибки и на примере вычисления вековых возмущений астероида Церера показал практическую ценность метода.

Кроме притяжения Солнца и больших планет метеороиды испытывают влияние сил различной негравитационной природы. В литературе описано более двух десятков эффектов, которые могут изменять как физические характеристики метеороидов, так и оказывать влияние на их движение.

Наиболее существенное влияние на движение метеороидов крупнее  $10^{-3}$  г могут оказать эффекты, связанные с солнечным излучением, а на изменение их масс — столкновения с микрометеороидами спорадического фона.

Эффектом Пойнтинга–Робертсона называют тормозящую силу, возникающую при поглощении и переизлучении метеороидом солнечной энергии и пропорциональную его орбитальной скорости.

Действие этого эффекта можно представить с помощью следующей механической модели. Пусть по прямолинейным горизонтальным рельсам без трения по инерции движется плоская круглая тележка. Тележка имеет определенную массу, некоторую скорость и, следовательно, обладает некоторым моментом движения. На эту тележку вертикально падает снег, который счищается с нее равномерно во все стороны. Масса тележки и лежащего на ней снега не изменяется. Естественно, что после падения снег получает часть момента движения тележки. Этот момент уносится вместе со счищаемым снегом. В результате момент движения убывает, а так как масса не изменяется, то это выражается в замедлении движения.

Аналогичное торможение возникает и при взаимодействии протонов солнечного ветра с метеороидами. Его называют корпускулярным аналогом эффекта Пойнтинга–Робертсона. Действие эффекта Пойнтинга–Робертсона и его корпускулярного аналога проявляется в вековом уменьшении большой полуоси и эксцентриситета орбиты метеороидной частицы [3, 4].

Открытие этого эффекта подтвердило вывод о том, что метеороидные рои не могли образоваться в тот же период, что и кометы или астероиды, а являются продуктами их относительно недавней дезинтеграции.

Столкновения метеороидных частиц можно разделить на четыре категории: упругие, неупругие, эрозивные и катастрофические. Упругие столкновения изменяют моменты количества движения и рассеивают сталкивающиеся частицы. При неупругих столкновениях удельные моменты количества движения выравниваются. Эрозивные столкновения частиц уменьшают их массы до критических и тем самым оказывают влияние на динамику орбит. Катастрофические столкновения приводят к полному разрушению частиц.

Учитывая близкую к реальности модель около-солнечного пылевого облака и произвольность орбит микрометеороидов, удалось вычислить времена жизни частиц, значения которых для больших метеороидных потоков приведены в табл. 2. Для частиц с радиусами 0,01 и 1 см времена жизни из табл. 2 необходимо умножить на 5 и 20 соответственно.

## ЭВОЛЮЦИЯ МЕТЕОРОИДНЫХ РОЕВ

Планетные возмущения достаточно быстро увеличивают начальную дисперсию элементов орбит метеороидов роя. Выбросы метеороидных частиц из родительского тела происходят многократно и в течение многих оборотов вокруг Солнца. Это приводит к тому, что орбиты метеороидов одинакового

Таблица 2. Время жизни  $T$  метеороидов радиусом 0,1 см

Название потока	$T$ , тыс. лет	Название потока	$T$ , тыс. лет
Геминиды	22–40	Дневные Персеиды	44
Дневные Ариетиды	23–40	Дневные Тауриды	67–78
Сев. $\iota$ -Аквариды	45–51	$\alpha$ -Каприкорниды	110–130
Южн. $\iota$ -Аквариды	60–71	Квадрантиды	120–390
Сев. Тауриды	84–90	Южн. $\delta$ -Аквариды	44–88
Южн. Тауриды	59–67	Сев. $\delta$ -Аквариды	43–72
К-Цигниды	150–370	Урсиды	330–910
$\eta$ -Аквариды	470–730	Дракониды	180–400
Ориониды	600–910	Андромедиды	190–270
Персеиды	2000–6800	Леониды	470–750
Апр. Лириды	2500–8600		

размера могут находиться в различных эволюционных положениях, которые удобно характеризовать аргументом перигелия. Процесс приводит к существенному увеличению размеров метеороидного роя, и в первую очередь увеличивает его толщину. Рой принимает такую форму, которая дает начало действию нескольких дискретных метеорных потоков при различных долготях Солнца. Дискретность этих родственных метеорных потоков является результатом селективности наземных наблюдений — могут наблюдаться лишь те метеоры из роя, орбиты которых пересекают орбиту Земли. Этот же процесс обуславливает и почти одновременное действие северных и южных ветвей потоков [5, 6]. Взаимосвязь главных метеорных потоков легко просматривается в табл. 1. В ней показано, что одно и то же родительское тело порождает несколько метеорных потоков. Теоретически в зависимости от типа эволюции орбиты родительского тела оно может порождать от 1 до 8 метеорных потоков.

Рассмотрим эволюцию двух метеороидных роев, порождающих хорошо исследованные метеорные потоки. Этими потоками являются Геминиды и Квадрантиды.

### Геминиды

Взаимосвязь между “астероидом” Фаэтон (3200) и Геминидами является достаточно хорошо установленным фактом. Модель образования Геминид в

результате столкновения Фаэтона как каменного тела с другим каменистым телом не смогла объяснить даже такой простой факт, как наблюдаемое распределение афелийных расстояний метеороидов Геминид. Поэтому весьма вероятно, что Фаэтон является “угасшей” кометой, а рой Геминид образовался в результате дезинтеграции этой кометы, когда она была в активной стадии.

Вычисление планетных возмущений показало, что за 20 тысячелетий дисперсия орбит метеороидов роя становится настолько большой, что в нем присутствуют орбиты, пересекающие орбиту Земли при четырех различных значениях аргумента перигелия. Четыре потока, соответствующие этим пересечениям, наблюдаются, и их основные характеристики приведены в табл. 3. Эта таблица показывает хорошее соответствие теории наблюдениям, что говорит в пользу кометной природы Фаэтона и его потоков.

### Квадрантиды

В мае 1986 года Д. Мачхолц открыл свою вторую новую комету, которая получила обозначение 1986 VIII. Комета сейчас имеет короткий период обращения (5,25 года) и малое перигелийное расстояние (0,127 а.е.) и поэтому является уникальным объектом для исследования физической эволюции кометных ядер. Открытие кометы только в 1986 году также представляет интерес, так как до того она непременно должна была бы наблюдаться, будучи

Таблица 3. Теоретические и наблюдаемые геоцентрические радианты метеорных потоков роя Фаэтона

Название потока	Теоретические данные				Наблюдаемые данные			
	дата	$\alpha$	$\delta$	$V$	дата	$\alpha$	$\delta$	$V$
Геминиды	14.12	113	33	34	14.12	112	32	34
Канис-Минориды	14.12	110	11	34	11.12	108	10	36
$\alpha$ -Леониды	05.10	170	16	34	01.10	170	15	35
Дневные Секстантиды	05.10	161	-4	34	08.10	157	-8	30

**Таблица 4.** Теоретические и наблюдаемые геоцентрические радианты метеорных потоков кометы Мачхолца

Название потока	Дата	Координаты радианта		V
		$\alpha$	$\delta$	
Теоретические данные				
Квадрантиды	02.01	223–243	[+42, +54]	38–43
Урсиды	31.12	215–227	[+48, +60]	38–46
Кариниды	02.01	149–164	[–64, –46]	41–49
К-Велиды	03.01	142–160	[–61, –50]	41–49
Сев. $\delta$ -Аквариды	30.07	316–340	[–10, +2]	40–44
Южн. $\delta$ -Аквариды	30.07	334–351	[–18, –13]	39–44
Дневные Ариетиды	12.06	42–50	[+22, +25]	40–44
$\alpha$ -Цетиды	06.06	39–53	[+8, +13]	39–44
Наблюдаемые данные				
Квадрантиды	03.01	219–232	[+48, +50]	40–43
Урсиды	22.12	190–226	[+58, +76]	33–40
Кариниды	04.01	159–166	[–56, –57]	41–45
К-Велиды	03.01	146–157	[–46, –57]	40–47
Сев. $\delta$ -Аквариды	12.08	337–346	[–5, +3]	40–42
Южн. $\delta$ -Аквариды	29.07	339–351	[–19, –14]	40–44
Дневные Ариетиды	08.06	43–50	[+22, +26]	39–44
$\alpha$ -Цетиды	09.06	44–53	[+6, +12]	37–39

даже намного менее яркой, чем в момент открытия. Этот факт дал основание предположить, что в течение очень долгого периода до 1986 года комета находилась в “угасшем” состоянии.

Однако несомненно, что в прошлом комета была активна. Исследование динамики ее орбиты показало, что раньше она практически не отличалась от современной орбиты метеорного потока Квадрантид и еще нескольких потоков. Моделирование эволюции орбиты кометы Мачхолца, выброса из нее метеороидов и исследование эволюции этого модельного роя привели к поразительным результатам. Оказалось, что эта комета является родительским телом для восьми активных в настоящее время метеорных потоков. Из этих восьми потоков пять относятся к главным и хорошо известны из наблюдений (табл. 1). Сравнение теоретических и наблюдаемых радиантов метеорных потоков кометы Мачхолца дается в табл. 4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интервалы, в которых находятся геоцентрические радианты наблюдаемых и модельных метеорных потоков кометы Мачхолца, а также радианты метеорных потоков “астероида” Фаэтон (3200), позволяют заключить, что наши представления соответствуют реальным процессам, происходящим в метеороидных роях.

Пользуясь случаем, автор выражает благодарность своему учителю академику АН Таджикистана, профессору Пулату Бабаджановичу Бабаджанову, совместно с которым в 1980–1990-х годах был выполнен цикл работ по исследованию эволюции метеорных потоков и их связи с кометами и астероидами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бредихин Ф.А. Этюды о метеорах. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 607 с. (Классики науки).
2. Левин Б.Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 296 с.
3. Whipple F.L. A Comet Model. I // *Astrophys. J.* 1950. Vol. 111; II – 1951. Vol. 113; III – 1955. Vol. 121.
4. Ловелл Б. Метеорная астрономия. М.: Физматгиз, 1958. 488 с.
5. Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В. Особенности эволюции метеорных роев Геминид и Квадрантид // *Астрон. журн.* 1984. Т. 61, № 5. С. 1005–1012.
6. Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В. Метеороидные рои: Образование, эволюция, связь с кометами и астероидами // *Астрон. вестн.* 1991. Т. 25, № 4. С. 387–407.
7. Обрубов Ю.В. Комплексы малых тел Солнечной системы // *Астрон. журн.* 1991. Т. 68, № 5. С. 1063–1073.

\* \* \*

Юрий Викторович Обрубов, доктор физико-математических наук, профессор, декан экономического факультета, зав. кафедрой высшей математики и физики Калужского филиала МСХА, профессор кафедры высшей математики Калужского филиала МГТУ, академик Нью-Йоркской академии наук, консультант Международного астрономического союза и член-соучредитель Европейского астрономического общества. Область научных интересов – динамика малых тел Солнечной системы и выявление их взаимосвязей. Автор более 90 статей.