

ВЗАИМОСВЯЗЬ АСТЕРОИДОВ, КОМЕТ И МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ

Ю. В. ОБРУБОВ

Калужский филиал Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева

THE INTERRELATION BETWEEN ASTEROIDS, COMETS AND METEOR SHOWERS

Yu. V. OBRUBOV

New results on the possible interrelation of meteor showers, asteroids and comets are given. The physical evolution of cometary nuclei is considered. In the evolution process comet nuclei become indistinguishable from asteroids from the observational point of view. The problem of origin of Near-Earth or Earth-crossing asteroids and their connection with meteoroid streams and meteor showers are discussed.

В статье приведены новые результаты о возможных взаимосвязях метеорных потоков, комет и астероидов. Рассмотрена физическая эволюция кометных ядер, в результате которой они становятся неотличимыми от астероидов с наблюдательной точки зрения. Обсуждаются проблема происхождения околоземных и землепересекающих астероидов и их связь с метеороидными роями и метеорными потоками.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

В Солнечной системе кроме больших планет и их спутников движется множество так называемых малых тел: астероидов, комет и метеороидов. Малые тела Солнечной системы имеют размеры от сотен микрон до сотен километров.

Астероиды. С точки зрения физики астероиды или, как их еще называют, малые планеты — это плотные и прочные тела. По составу и свойствам их можно условно разделить на три группы: каменные, железокаменные и железные. Астероид является холодным телом. Но он, как, например, и Луна, отражает солнечный свет, и поэтому мы можем наблюдать его в виде звездобразного объекта. Отсюда и происходит название “астероид”, что в переводе с греческого означает звездобразный. Так как астероиды движутся вокруг Солнца, то их положение по отношению к звездам постоянно и довольно быстро меняется. По этому первоначальному признаку наблюдатели и открывают астероиды.

Первый и наиболее крупный астероид, Церера, был открыт в 1801 году Дж. Пиацци. Этот астероид двигался по почти круговой орбите радиусом 2,8 а.е. (а.е. — астрономическая единица, среднее расстояние от Земли до Солнца, 149 500 000 км), то есть между орбитами Марса и Юпитера. Именно такое расстояние от Солнца было предсказано правилом Тициуса—Боде для еще одной гипотетической планеты Солнечной системы — Фазтона. Вскоре были открыты еще нескольких астероидов с орбитами, проходящими между орбитами Марса и Юпитера. В 1803 году Г.В. Ольберс высказал гипотезу об образовании так называемого главного пояса астероидов (ГПА) в результате разрушения гипотетической большой планеты земной группы — Фазтона. Сейчас известно более 9 тыс. нумерованных астероидов на самых разнообразных орбитах, и объяснить их образование разрушением планеты невозможно. Более приемлемой считается гипотеза о том, что ГПА есть

несформировавшаяся планета, образованию которой помешали гравитационные возмущения Юпитера.

Сразу после открытия астероиду присваивают условное обозначение — номер года открытия и несколько латинских букв, например 1986 ТВ. Если первоначальная орбита определена достаточно точно, то после повторных наблюдений и уточнения орбиты астероиду дают порядковый номер и орбита включается в каталог нумерованных малых планет. На следующем этапе астероиду присваивается собственное имя. Первоначально это были имена героев древнегреческого эпоса (Церера, Гефест, Троянцы, Эрос и т.п.), сейчас — в основном выдающихся людей.

Кометы, или “хвостатые звезды”, известны с незапамятных времен. Комета — это сложное физическое явление, которое кратко можно описать с помощью нескольких понятий. Ядро кометы представляет собой смесь или, как говорят, конгломерат пылевых частиц, водяного льда и замерзших газов. Отношение содержания пыли к газу в кометных ядрах составляет примерно 1 : 3. Размеры кометных ядер, по оценке ученых, заключены в интервале от 1 до 100 км. Сейчас дискутируется возможность существования как более мелких, так и более крупных ядер. Известные короткопериодические кометы имеют ядра размером от 2 до 10 км. Размер же ядра ярчайшей кометы Хейли—Боппа, которая наблюдалась невооруженным глазом в 1996 году, оценивается в 40 км.

Так как комета имеет, как правило, высокоэксцентричную орбиту, то при приближении к Солнцу температура поверхности ядра повышается, льды начинают сублимировать и потоки газа выносят частицы пыли. В результате образуется так называемая газопылевая кома, которая имеет почти сферическую форму и может в миллионы раз превышать размеры самого ядра. Благодаря огромным размерам комы отражаемый ею солнечный свет позволяет с Земли наблюдать кометы на достаточно больших расстояниях (до 5 а.е. и более) от Солнца.

Мелкие пылевые частицы очень чувствительны к давлению солнечного света. Для них давление света сравнимо с притяжением Солнца, а в некоторых случаях может и преобладать. Такие частицы покидают кометную кому, образуя хвост. Хвост направлен в сторону, противоположную Солнцу, и его видимые размеры могут превышать размеры комы в сотни раз, достигая 1 а.е. и более.

Согласно наиболее распространенной гипотезе, кометы являются остатками протопланетного вещества, не вошедшего в состав планет. И с этой точки зрения кометы представляют большой научный интерес. Считается, что на окраине Солнечной системы нахо-

дится так называемое Облако Оорта — склад кометных ядер. Возмущения от близко проходящих к Солнцу звезд или газопылевых скоплений преобразуют отдельные орбиты ядер комет из Облака Оорта в орбиты, проходящие вблизи больших планет. Большие же планеты могут еще сильнее изменить орбиты и перебросить ядра внутрь планетной системы, в которой и происходят кометные явления.

Метеороиды образуются при разрушении ядер комет и астероидов. Однако вполне вероятно, что незначительная часть современной популяции метеороидов была выброшена со спутников больших планет, с Меркурия или Марса. Как показывают наблюдения, нельзя исключить и возможность попадания в Солнечную систему метеороидов из других звездных систем.

Кратеры на поверхности спутников планет имеют диаметры до 1/3 диаметра спутника. При скорости 20 км/с столкновения астероида со спутником планеты объем кратера составит около 1500 объемов астероида. Скорости выброса вещества спутника из кратера относительно невелики, и может образоваться рой частиц с орбитой, близкой к спутнику. Для более высоких скоростей столкновения осколки с поверхности спутника, преодолев гравитационное притяжение спутника, могут быть выброшены внутрь Солнечной системы.

По динамическим характеристикам метеороиды разделяют на два класса: спорадические и метеороиды, образующие рои. Метеороидный рой — это множество частиц, двигающихся по близким в некотором смысле орбитам. Если метеороидный рой пересекается Землей, то при достаточно больших геоцентрических скоростях метеороидов и пространственной плотности роя мы наблюдаем явление метеорного потока. Наблюдения метеорных потоков — это практически единственный способ регистрации метеороидного роя по наземным наблюдениям. Известно около 20 метеорных потоков с часовым числом от 20 до 140 метеоров в час. Эти потоки называют главными. Разные авторы выделяют также до 6000 так называемых малых метеорных потоков или метеорных ассоциаций.

Начиная с открытия Дж. Скиапарелли, установившего сходство орбит метеорного потока Персеид и кометы 1862 III, считается, что метеороидные рои образуются при разрушении ядер комет.

Спокойный распад ядер комет на большой дуге орбиты в окрестности перигелия при сублимации замерзших газов — наиболее вероятный путь образования метеороидного роя. Нельзя, конечно, исключить образование роя и при катастрофических процессах: разрушении ядра кометы под действием приливных,

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

Существование метеорных потоков, связанных с астероидами Гермес (1937 UB), (1862) Аполлон и (2101) Адонис, было выявлено Гоффмейстером (С. Hoffmeister) в 1948 году. С увеличением объема наблюдательных данных о метеорах и ростом числа открытых, приближающихся к Земле астероидов увеличилось и число публикаций, посвященных этому вопросу. Новые взаимосвязи метеороидных роев с кометами и астероидами, выявленные в последнее десятилетие, и исследования физических и динамических свойств малых тел позволяют лучше понять их природу и процессы, происшедшие и происходящие в настоящее время в Солнечной системе. Тем не менее эволюционные процессы могут уничтожить информацию о деталях процесса образования метеороидного роя.

ОБРАЗОВАНИЕ РОЕВ В МБА

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.

Восемьдесят лет назад К. Хираяма (К. Hirayama) обратил внимание на группирование некоторых астероидов основного пояса по так называемым собственным элементам орбит, то есть элементам орбит, откорректированным за влияние вековых планетных возмущений. С этой точки зрения семейства Хираямы можно назвать роями астероидов. Считается, что эти семейства образовались в результате разрушительных столкновений в основном поясе астероидов.

В 1989 году инфракрасный астрономический спутник IRAS зарегистрировал пылевые пояса, связанные с семействами астероидов К. Хираямы. На этом основании можно утверждать, что астероиды способны производить и много мелких частиц, то есть образовывать метеороидные рои.

Метеориты, то есть остатки метеороидов, достигшие поверхности Земли, не могут иметь кометное происхождение, так как размер выбрасываемых кометой частиц не превосходит 10 см и трудно допустить, что в кометных ядрах могут быть каменные включения размером более 1 м. Метеороиды же астероидного происхождения неограниченны по размеру. Поэтому если существуют метеоритные рои, то существуют и связанные с ними метеороидные рои астероидного происхождения. Данные наблюдений подтверждают, что метеоритные рои существуют.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ОКОЛОЗЕМНЫХ И ЗЕМЛЕПЕРЕСЕКАЮЩИХ АСТЕРОИДОВ И ИХ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Астероиды, пересекающие орбиту Земли, были открыты относительно недавно. В 1898 году Г. Уитт открыл приближающийся к Земле астероид (433) Эрос, а первый из астероидов, орбита которого действительно пересекала орбиту Земли, (1862) Аполлон, был открыт К. Реймутом (К. Reimuth) в 1932 году. Справедливости ради отметим, что открытый М. Вольфом в 1918 году астероид (887) Алинда в настоящий период имеет землелепересекающую орбиту.

Сейчас известно около 600 землелепересекающих или приближающихся к Земле астероидов. По существующим оценкам, число таких астероидов крупнее 100 м составляет примерно 100 000.

По размерам и форме современных орбит околоземные и землелепересекающие астероиды разделяют на три группы, названные в соответствии с первыми представителями этих групп. Это приближающаяся к Земле группа Амура ($1 < q < 1,3$ а.е.) и две пересекающие орбиту Земли группы Аполлона ($q < 1$ а.е.) и Атона ($a < 1$ а.е., $Q > 1$ а.е.), где q – перигелийное расстояние, Q – афелийное расстояние и a – большая полуось орбиты.

Естественным является вопрос, как астероиды и метеориты из основного пояса попадают на землелепересекающие орбиты. Ранее механизм трансформации орбит астероидов основного пояса в землелепересекающие приписывался гравитационным возмущениям Марса. Согласно современным представлениям, существует возможность резкого увеличения эксцентриситета орбиты астероида под действием резонансных возмущений Юпитера. Форма и структура основного пояса, происхождение землелепересекающих астероидов и метеоритов скорее связаны с хаосом, чем с регулярными осцилляциями.

Моделирование показало, что высокоскоростные столкновения и планетные возмущения могут генерировать значительное число землелепересекающих осколков астероидов из основного пояса. Моделируя выброс осколков с поверхности 2355 нумерованных астероидов, удалось выявить список астероидов – наиболее эффективных потенциальных поставщиков метеоритов. Результат согласуется с заключением, что большинство метеоритов и околоземных астероидов может происходить от небольшой части астероидов. Один из лучших кандидатов – 200-километровый астероид (6) Геба. Орбита одного из смоделированных осколков этого астероида оказалась очень близка к орбите метеорита Пшибрам. Кроме того, на Гебе есть кратер, возникновение которого можно объяснить столкновением с однокилометровым астероидом. Частота возможных столкновений такого

рода — одно за 20 млн лет. То есть такие столкновения — довольно редкое явление и, по мнению многих ученых, не могут обеспечить наблюдаемое число околоземных объектов.

По метеорным наблюдениям среди тел размерами от 1 до 10 м 50% являются карбонатными телами, 40% — хрупкие тела кометного происхождения и только несколько процентов — твердые каменные тела.

Однако результаты широкомасштабного исследования эволюции орбит околоземных астероидов показывают различные переходы между динамическими классами, включая и класс комет. Поначалу существенно разная динамика комет и астероидов в конце концов становится близкой и неотличимой.

Для пополнения популяции околоземных астероидов крупнее 1 км из основного пояса требуется несколько десятков астероидов за 1 млн лет. Моделируемый поток примерно в 10 раз меньше требуемого.

Кометы километрового размера довольно быстро теряют свои летучие вещества. До окончания своей динамической эволюции (то есть до столкновения с планетами или выброса из Солнечной системы) ядра комет могут полностью потерять все летучие вещества или покрыться толстой пылевой корой, препятствующей сублимации летучих веществ. В результате такие ядра могут наблюдаться как астероиды.

Чтобы объяснить противоречие в числе наблюдаемых околоземных астероидов их притоком из основного пояса, Эпик (E. Örik) в 1963 году выдвинул гипотезу о том, что околоземные астероиды являются ядрами угасших комет. Согласно современным представлениям, значительная доля землепересекающих астероидов (50% и более) может быть кометного происхождения. Такая возможность получила и наблюдательное подтверждение. Например, открытая в 1949 году комета P/Willson–Harrington (1949 III) в 1979 году была перетворена уже как астероид (4015) Willson–Harrington (1979 VA). В 1994 году ядра двух короткопериодических комет — кометы Мачхолца 2 и кометы Харрингтона — разрушились на крупные осколки, которые угадали до астероидного вида.

Если же ядро кометы покрыто плотной корой, то вековое уменьшение перигелийного расстояния или столкновение с крупным метеороидом может привести к разрушению коры и возобновлению активности кометы. Возможно, в результате такого хода событий в 1986 году и была открыта первая периодическая комета Мачхолца 1, родоначальница метеороидного роя Квадрантид и его восьми метеорных потоков.

Нерегулярность формы околоземных астероидов в среднем выше, чем у астероидов пояса. Выявлено несколько очень “длинных” объектов. Например, разме-

ры астероида (1620) Географ оцениваются как $4 \times 1,5$ км. Однако астероид (1566) Икар — почти шар. По спектральным свойствам астероиды (1862) Аполлон, (1864) Дедал, (2368) Бельтровка, (3102) Крок и (4688) 1980 WF близки к обыкновенным хондритам. Ни одного астероида с такими спектрами нет в основном поясе. Твердой каменной поверхности у однокилометровых околоземных объектов не обнаруживается. Кандидаты в угасшие кометы, согласно наблюдениям Д.Ф. Лупишко, темные, скорость вращения средняя или низкая. Среди нумерованных астероидов наиболее вероятные кандидаты в угасшие кометы — (3200) Фаэтон, (2101) Адонис, (2201) Олджато, (2212) Гефест и (3552) Дон.

Согласно наблюдениям, однокилометровые тела состоят из хрупкого и пористого материала, астероиды основного пояса (размером около 100 км) прочные и плотные, одно—десятикилометровые околоземные астероиды состоят из того или другого материала. Обыкновенные хондриты широко распространены, так как их родительские тела разрушаются на множество фрагментов легче, чем другие типы астероидов основного пояса.

Таким образом, околоземные объекты являются либо астероидами основного пояса или осколками этих астероидов, либо ядрами угасших, неактивных или полностью дегазированных кометных ядер. Ф. Уиппл считает, что проблема угасших комет требует намного больше внимания, чем ей уделяется в настоящее время. С этой точки зрения он подчеркивает значимость метеороидного комплекса Таурид, связанного с кометой Энке.

МЕТЕОРНЫЕ ПОТОКИ И МЕТЕОРОИДНЫЕ РОИ, СВЯЗАННЫЕ С ОКОЛОЗЕМНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Неявно предполагается, что метеороидный рой порождает метеорный поток в атмосфере Земли. Это возможно, если метеороиды роя движутся по землепересекающим орбитам и пространственная плотность метеороидов роя достаточно высока. Однако мы не можем допустить возможности переброски всего роя вместе с родительским астероидом из основного пояса под действием описанных выше резонансных явлений. Хотя возможно, что незначительная часть фрагментов может последовать за своим родительским телом. Поэтому следует предположить, что для образования метеороидного роя на землепересекающей орбите необходимо разрушение “истинного” астероида, уже двигавшегося по орбите такого типа. Вероятность такого сценария для истинного астероида из основного пояса чрезвычайно мала.

Обратимся теперь к наблюдаемости метеоров и метеорных потоков. Из физики метеорных явлений известно, что яркость метеора зависит не только от его массы,

но и в большей степени от его геоцентрической или до-атмосферной скорости. Поэтому более быстрые и более крупные метеороиды порождают более яркие метеоры, доступные различным методам наблюдений.

Все известные околоземные объекты имеют прямые движения, и большая их часть движется по орбитам с малыми наклонами. Это обстоятельство объясняет низкие геоцентрические скорости, низкую замечаемость метеоров, а следовательно, и низкую замечаемость метеорных потоков. Низкая замечаемость метеорных потоков, связанных с околоземными объектами, обусловливается и высокой численностью спорадических метеоров на орбитах такого типа.

Влияние зенитного притяжения, то есть притяжения Земли, увеличивается с уменьшением скорости метеороидов и увеличивает и площадь радиации метеорного потока. Это делает потоки с малыми геоцентрическими скоростями еще менее заметными. Поэтому выявляется связь астероидов, как правило, с малыми потоками или с такими, которые не выделяются непосредственно из метеорных наблюдений.

Действительно, поворотной точкой в установлении связи астероидов с метеорными потоками является открытие в 1983 году астероида (3200) Фаэтон и его связи с наиболее изученным метеорным потоком Геминид.

Рассмотрим более подробно метеорный комплекс Таурид (Taurids). Первоначально считалось, что этот комплекс образовался при разрушении ядра кометы Энке. Гипотеза о том, что комплекс Таурид включает в

себя несколько астероидов группы Аполлона, была предложена В. Клюбс и У. Непье в 1984 году. Сейчас в этом комплексе найдены 14 астероидов и крупный метеороид 1991 ВА (размер 10–15 м). Детальное исследование, выполненное Д. Стиллом, показало, что в комплексе Таурид есть три группы тел. Первая группа из девяти астероидов с вероятностью 99% связана с комплексом Таурид. Вторая группа из пяти крупных тел связана или не связана с комплексом Таурид. И только астероид (2101) Адонис оказался вне этих групп.

Таким образом, при исследовании метеорного комплекса Таурид были найдены два астероидных комплекса, образовавшиеся примерно 20 000 лет назад при разрушении более крупных тел. Размеры макротел комплекса Таурид составляют 0,5–2,0 км. Возможно падение этих тел на Землю. В результате могут произойти явления класса падения тунгусского метеорита. В однокилометровых астероидах комплекса Таурид (открытых и неоткрытых) может быть сосредоточено до 10^{18} г вещества – это важная компонента комплекса в столкновениях с Землей.

Тела размером порядка 10 м сталкиваются с Землей несколько раз в год, и наблюдения этих явлений со спутников оказались очень эффективными. Ежегодно к 140 известным на Земле кратерам добавляется от трех до пяти новых. На этом основании необходимо подчеркнуть важность столкновительных процессов в современном развитии Солнечной системы.

Таблица 1. Нумерованные астероиды, связанные с метеорными потоками

Астероиды	Метеорные потоки	Астероиды	Метеорные потоки
1566 Icarus	Arietids (S, D, O, H) Taurids–Perseids (S, B&O)	2201 Oljato	Canids (D, P, H) χ -Orionids (D, O, B&O)
1620 Geographos	March Virginids (S, D) Ф-Bootids (OY)	3200 Phaethon	Geminids (O, B&O, P) Day Sextantids (B&O)
1862 Apollo	η -Librids (S) χ -Scorpiids (S, D, O)	1937 UB (Hermes)	Canis Minorids (B&O) δ -Leonids (B&O)
2062 Aten	ω -Draconids (D) Ф-Bootids (OY)	4179 Toutatis	χ -Piscids (S) ε -Arietids (S) δ -Arietids (OY) δ -Piscids (S)
2101 Adonis	Capricornids–Sagittarids (S, H) χ -Sagittarids (S, D, B&O) χ -Capricornids (S, B&O) Scorpiids–Sagittarids (S, D) δ -Capricornids (S, B&O) α -Capricornids (O, B&O)	4015 Willson–Harrington	κ -Aquadrids (OY) 32 метеора (P) δ -Cygnids (OY)

Примечание. Даны названия астероидов и метеорных потоков, взаимосвязь между которыми подтверждается разными авторами: B&O – данные П.Б. Бабалджанова и Ю.В. Обрубова, D – Дж. Драмонда (G. Drumond); H – И. Хасагавы и сотрудников (I. Hasegawa *et al.*); O – Д. Олссона-Стилла (D. Olsson-Steel); OY – Ю.В. Обрубова; P – В. Порубчана и сотрудников (Porubcan *et al.*); S – З. Секанины (Z. Sekanina).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Связь метеорных потоков с околоземными астероидами реальна, но требуются дополнительные наблюдения метеоров, исследование их физических свойств и эволюции орбит. При большом числе потоков связь с землепересекающими астероидами может быть случайной. Есть проблема и в выявлении различных потоков (роев) из наблюдений, особенно при малых наклонах орбит и эксцентриситетах менее 0,5. Но именно на таких орбитах и находятся большинство землепересекающих астероидов и спорадические метеоры.

Естественно, что крупные землепересекающие объекты кометного происхождения, связанные с метеороидными роями, могут быть не их родительскими телами, а остатками прародительской кометы, при разрушении которой образовались и метеороидный рой и сами эти объекты. Другими словами, землепересекающие объекты являются просто более крупными членами метеороидных роев. Можно ожидать, что рой кометного происхождения содержит очень крупные метеороиды, которые мы и называем землепересекающими астероидами. Идентификация таких астероидов с роями должна не только пополнить наши знания о дроблении комет, но и дать новые данные об относительной важности источников околоземных объектов — комет из внешней Солнечной системы и астероидов главного пояса.

Приведенные факты показывают, что различия между астероидами, кометами и метеороидами практи-

чески стираются. В качестве заключительного яркого примера можно привести объект Р/Шумейкер—Леви-9. Мы не можем точно сказать, был этот объект кометой или астероидом. Можно назвать его и метеороидным (астероидным, кометным) роем, давшим замечательный болидный (метеорный) поток в атмосфере Юпитера.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Whipple F.L.* A Comet Model // *Astrophys. J.*, Pt. I. 1950. Vol. 111; Pt. II. 1951. Vol. 113; Pt. III. 1955. Vol. 121.
2. *Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В.* Метеороидные рои: Образование, эволюция, связь с кометами и астероидами // *Астрон. вестн.* 1991. Т. 25, № 4. С. 387–407.
3. *Обрубов Ю.В.* Комплексы малых тел Солнечной системы // *Астрон. журн.* 1991. Т. 68, № 5. С. 1063–1073.
4. *Worlds in Interaction: Small Bodies and Planets of the Solar System* / Ed. H. Rickman, M.J. Valtonen. Dordrecht etc.: Kluwer Acad. Publ., 1996. 508 p.

Рецензент статьи А.М. Черепашук

* * *

Юрий Викторович Обрубов, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой высшей математики и физики Калужского филиала МСХА, декан экономического факультета, академик АН Нью-Йорка, консультант Международного астрономического союза и член-соучредитель Европейского астрономического общества. Область научных интересов — динамика малых тел Солнечной системы и выявление их взаимосвязей. Автор около 100 публикаций.