

УДК 523.683

## Эволюция орбиты метеорного роя Геминид

О. И. Белькович, Е. Д. Кондратьева, Е. А. Резников

На основе средней орбиты метеорного роя Геминид рассмотрены вопрос о возможности существования породившей его кометы и эволюция самого роя, которая могла привести его к виду, наблюдаемому в настоящее время.

*THE EVOLUTION OF GEMINID METEOR SWARM ORBIT, by Bel'kovich O. I., Kondrat'eva E. D., Reznikov E. A.*—On the basis of mean elements of Geminid meteor swarm the possibility is investigated of existence of a parent comet. The evolution of the swarm originated 1000 years ago is considered.

Метеорный рой Геминид — интересное и загадочное образование в Солнечной системе. Характеристики его орбиты таковы ( $a=1.4$  а. е.,  $q=0.14$  а. е.), что не вызывает сомнения сравнительная молодость роя. Это предположение подтверждается результатами ряда исследований. В работах Е. Н. Крамера и И. С. Шестаки получена оценка возраста Геминид (1000 лет) на основе анализа фазовых расстояний орбит за 80 000 лет. При этом элементы орбит определены с учетом вековых возмущений от Юпитера, Сатурна и эффекта Пойнтинга—Робертсона [7, 8].

Вращаясь вблизи от Солнца с периодом около двух лет, метеорный рой Геминид подвергается значительному влиянию негравитационных эффектов, связанных с солнечным излучением [1]. В работе [2] показано, что время жизни частиц разной плотности на орбите Геминид весьма различно: от 50 лет для каменных частиц до 15 000 — для железных. Изучение дисперсии больших полуосей орбит метеорных частиц разных размеров позволило П. Б. Бабаджанову и Ю. В. Обрубову дать оценку возраста роя с учетом вековых планетных возмущений, действия эффекта Пойнтинга—Робертсона и его корпускулярного аналога. Для частиц разной плотности этот период составляет от 1600 до 19 000 лет [3].

Ю. В. Обрубов, рассматривая модель образования роя, отмечает, что разделение крупных и мелких частиц связано прежде всего с первоначальной дисперсией скорости выброса и редукцией массы Солнца [11]. Эволюция самой орбиты в вековом промежутке времени описана в работах [5, 12]. При этом в [5] учтены вековые возмущения от Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, а в [11] — от пяти планет (от Венеры до Сатурна), так что оба исследования дополняют друг друга.

Большинство периодических метеорных роев имеет, по-видимому, кометное происхождение. В случае Геминид возникает вопрос: каким образом комета-родоначальница могла оказаться на орбите со столь необычными параметрами? Ни одна из известных в настоящее время комет не может считаться прародительницей этого роя. Неожиданное открытие с помощью спутника IRAS астероида 1983 ТВ позволило предположить их генетическую связь [13]. Однако полностью исключить возможность кометного происхождения Геминид пока нельзя. В. Н. Лебединец предложил новый механизм образования метеорных роев такого типа [10]. Он показал, что кометы могут переходить на подобные орбиты в процессе испарения их ледяных ядер под действием реактивного торможения.

При изучении эволюции орбит в различных моделях происхождения Геминид чаще всего учитываются возмущения от Юпитера и Сатурна. Неоднократно отмечалось, что планеты-гиганты не могли трансформировать орбиту кометы так, чтобы перевести ее на современную орбиту

Геминид, афелий которой не превышает 3 а. е. Необходимо проверить предположение: могла ли гипотетическая комета быть захвачена планетами земной группы. В наших расчетах в качестве средней орбиты Геминид взята система элементов

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 324.413^\circ \\ \Omega &= 261.593 \\ i &= 23.400 \end{aligned} \right\} 1950.0 \quad \begin{aligned} e &= 0.900 \\ a &= 1.411 \text{ а. е.} \\ Q &= 2.681 \text{ а. е.} \end{aligned} \quad (1)$$

Оценочные расчеты проведены для Меркурия, Венеры и Земли по следующей упрощенной модели. Захват происходит вследствие однократного сближения с планетой небесного тела нулевой массы. При этом вектор планетоцентрической скорости тела испытывает мгновенный поворот на некоторый угол  $\theta$ . Затем вектор скорости может поворачиваться по образующей конуса с осью, совпадающей с первоначальной планетоцентрической скоростью тела, и углом при вершине  $2\theta$ . Угол поворота может изменяться от 0 до  $360^\circ$ . Предполагается, что положение небесного тела в момент преобразования его скорости совпадает с положением планеты.

Воспользуемся известными [9] соотношениями

$$p = M^2/m\alpha, \quad e^2 = 1 + 2EM^2/m\alpha^2, \quad (2)$$

где  $p$  — параметр орбиты;  $e$  — эксцентриситет;  $M$  — момент количества движения;  $E$  — энергия тела.

Учитывая, что

$$\alpha = k^2 m_{\text{ц}} m \text{ и } M = \rho v m, \quad (3)$$

где  $k$  — постоянная Гаусса;  $m_{\text{ц}}$  — масса центрального тела;  $m$ ,  $v$  — масса и скорость приближающегося тела;  $\rho$  — предельное расстояние, получаем

$$p = \rho^2 v^2 / k^2 m_{\text{ц}}, \quad e^2 = 1 + (\rho^2 v^4 / k^4 m_{\text{ц}}^2). \quad (4)$$

$$\text{Перицентр } q = p / (1 + e). \quad (5)$$

Из этих соотношений можно найти предельное расстояние  $\rho$ .

Максимальный угол поворота  $\theta$  можно определить как  $\theta = 2\varphi - \pi$ , где

$$\varphi = \arccos \frac{\alpha / m v^2 \rho}{[1 + (\alpha / m v^2 \rho)^2]^{1/2}} \quad (6)$$

Так как

$$\alpha / m v^2 \rho = k^2 m_{\text{ц}} / v^2 \rho, \quad (7)$$

то

$$\varphi = \arccos \frac{k^2 m}{v^2 \rho [1 + (k^2 m_{\text{ц}} / v^2 \rho)^2]^{1/2}}. \quad (8)$$

В принятой нами упрощенной модели для того, чтобы средняя орбита роя Геминид пересекалась с орбитами Меркурия, Венеры или Земли, изменялся только один элемент — аргумент перигелия  $\omega$ . Расчеты по приведенным формулам показали, что угол  $\theta$  не может превышать  $1^\circ$ ,  $4^\circ$  и  $6^\circ$  соответственно для Меркурия, Венеры и Земли. Следовательно, в случае захвата тела этими планетами афелийные расстояния для возможных первоначальных орбит не могут быть больше 3.3, 3.9 и 4.0 а. е.

Так как планетоцентрические скорости велики (58.6, 41.4, 34.8 км/с), а сферы действия планет малы, то модель мгновенного преобразования скорости небесного тела довольно точно отражает изменение его орбиты при захвате. Это позволяет сделать вывод о невозможности захвата планетами земной группы кометы с афелием вблизи Юпитера.

Необходимо учитывать, что вопрос захвата мы рассматривали исходя из современной оценки средней орбиты роя Геминид и при этом полагали, что гипотетическая комета-родоначальница находится на такой же орбите. Однако не исключено, что вековые возмущения или периодически повторяющиеся сближения с планетами земной группы могли преобразовать орбиту так, что захват кометы группы Юпитера на орбиту с современными параметрами оказался возможным. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Представляет интерес еще одна гипотеза. Захват в результате единичного сближения может произойти с любой орбиты, если скорость тела существенно уменьшится (например, в результате торможения). Можно предположить, что комета-родоначальница метеорного роя Геминид прошла через верхние слои атмосферы Венеры.

Конечно, вероятность такого события невелика. Однако в истории кометной астрономии известны случаи чрезвычайно тесных сближений комет с большими планетами. А. Д. Дубяго показал [6], что комета Брукса 2 в июле 1886 г. прошла на расстоянии двух экваториальных радиусов от Юпитера, а в 1889 г. кроме основной кометы наблюдались еще четыре спутника.

Если бы родоначальница Геминид прошла на столь малом расстоянии от Венеры, что задела верхние слои ее атмосферы, это привело бы к резкому сокращению гелиоцентрической скорости кометы. Если это событие произошло при последнем пересечении орбит Венеры и Геминид, то возраст роя не превышает 1000 лет.

Действительно, в настоящее время аргумент перигелия  $\omega = 324.4^\circ$ . При захвате Венерой эта величина должна составлять  $313.5^\circ$ . Ниже будет показано, что скорость изменения  $\omega$  составляет  $1.775^\circ$  в столетие. Следовательно, захват мог произойти около шести столетий тому назад. Учитывая неопределенность элементов орбиты, можно как оценку принять 1000 лет.

С другой стороны, можно оценить скорость, необходимую для захвата тела Венерой. Если взять современную орбиту Геминид, то при повороте вектора скорости на  $4^\circ$  и увеличении его на 200 м/с афелий доходит до орбиты Юпитера. При повороте на  $4^\circ$  и увеличении скорости на 700 м/с тело выходит на близпараболическую орбиту. Отсюда следует, что при торможении в верхних слоях атмосферы Венеры захват мог произойти с орбиты, существенно отличающейся от современной орбиты Геминид.

В настоящее время кривая активности потока Геминид имеет следующие характерные особенности [4]: 1 — для широкого диапазона масс положения максимумов не совпадают; 2 — кривая активности асимметрична, Земля встречает большее количество частиц до максимума, чем после него. Если предположить, что метеорный рой Геминид образовался вследствие распада крупного небесного тела (например, кометы), то при этом должны были возникнуть частицы разных размеров. Будем считать, что скорости отделения частиц от родительского тела сравнительно невелики — не более 100 м/с. Вследствие светового давления более мелкие частицы должны иметь орбиты с несколько большим значением большой полуоси. Тогда и эволюция их орбит должна отличаться от эволюции орбит более крупных частиц.

Для определения возможного различия в эволюции орбит частиц разной массы сделано следующее. В системе (1) принято  $T_0 = 1980$  январь 1.0,  $M_0 = 180.000^\circ$ . Методом численного интегрирования с учетом возмущений от семи планет (Венера — Нептун) получена следующая система элементов:

$$T_0 \quad 1834 \text{ январь } 25.328$$

$$M_0 \quad 0.000^\circ$$

$$\left. \begin{array}{l} \omega \quad 321.826 \\ \Omega \quad 264.213 \\ i \quad 22.194 \end{array} \right\} 1950.0 \quad (9)$$

$$\begin{array}{l} e \quad 0.90224 \\ a \quad 1.41188 \text{ а. е.} \end{array}$$

По этим элементам, моделируя выброс в перигелии по касательной к орбите со скоростями  $\pm 100$  м/с, мы вычислили системы

	(10)	(11)
$T_0$	1834 январь 25.328	1834 январь 25.328
$M_0$	0.000°	0.000°
$\omega$	321.825	321.826
$\Omega$	264.312	264.213
$i$	22.194	22.194
$e$	0.898 80	0.905 68
$a$	1.363 90 а. е.	1.463 41 а. е.

Можно считать, что орбиты (10), (9), (11) принадлежали частицам разной массы, соответственно от большей к меньшей. Минимальное расстояние между ними и орбитой Юпитера составляет 2.57, 2.48, 2.39 а. е. Эти частицы, выброшенные в перигелии орбиты гипотетической кометы, из-за различия в действии светового давления уже движутся по разным орбитам. Их эволюция при учете возмущений от семи больших планет прослежена в интервале времени 146 лет — от 1834 до 1980 г. Негравитационные эффекты не учитывались, так как они не могут существенно влиять на небольшом интервале времени [2].

Для наглядности зависимость элементов от времени представлена в линейном виде. Начальным моментом принято  $T_0=1980$  январь 1.0. Линейная зависимость получена методом наименьших квадратов по 13 системам элементов для каждой орбиты, через один оборот Юпитера по времени. Вычислены ошибки определения коэффициентов линейной регрессии и средние квадратичные ошибки представления каждого элемента.

Для орбиты (10)

$$\begin{array}{lll} \omega : (324.215 \pm 0.0085^\circ) & + (1.678 \pm 0.010^\circ) t & \sigma_\omega = 0.016^\circ, \\ \Omega : (261.746 \pm 0.011) & - (1.727 \pm 0.013) t & \sigma_\Omega = 0.020, \\ i : (23.311 \pm 0.0043) & + (0.793 \pm 0.0052) t & \sigma_i = 0.0083, \\ e : (0.89676 \pm 0.000015) & - (0.00132 \pm 0.000019) t & \sigma_e = 0.000029. \end{array}$$

Для орбиты (9)

$$\begin{array}{lll} \omega : (324.376 \pm 0.014^\circ) & + (1.775 \pm 0.016^\circ) t & \sigma_\omega = 0.026^\circ, \\ \Omega : (261.598 \pm 0.012) & - (1.804 \pm 0.014) t & \sigma_\Omega = 0.023, \\ i : (23.378 \pm 0.0063) & + (0.830 \pm 0.0075) t & \sigma_i = 0.012, \\ e : (0.90016 \pm 0.000063) & - (0.00149 \pm 0.000076) t & \sigma_e = 0.00012. \end{array}$$

Для орбиты (11)

$$\begin{array}{lll} \omega : (324.694 \pm 0.012^\circ) & + (2.000 \pm 0.014^\circ) t & \sigma_\omega = 0.023^\circ, \\ \Omega : (261.261 \pm 0.013) & - (2.054 \pm 0.016) t & \sigma_\Omega = 0.025, \\ i : (23.545 \pm 0.0041) & + (0.953 \pm 0.0049) t & \sigma_i = 0.0078, \\ e : (0.90337 \pm 0.000026) & - (0.00150 \pm 0.000032) t & \sigma_e = 0.000052. \end{array}$$

В рассмотренных выражениях  $t$  — время в столетиях.

Действие светового давления приводит к уменьшению силы притяжения частицы Солнцем. Это ведет к изменению взаимодействия между притяжением частицы Солнцем и ближайшими планетами, т. е. орбиты мелких и крупных частиц будут эволюционировать по-разному, даже если вначале они были совершенно одинаковыми. Для выявления степени этого различия изучена эволюция орбиты частицы с учетом редукации массы Солнца. Коэффициент редукации принят равным 0.9982, исходя из предположения, что система (10) имеет реальную форму и размеры орбиты такие же, как у системы (9).

Получены следующие результаты:

$$\begin{aligned} \omega : (324.368 \pm 0.013^\circ) &+ (1.763 \pm 0.016^\circ) t & \sigma_\omega = 0.026^\circ, \\ \Omega : (261.594 \pm 0.012) &- (1.806 \pm 0.014) t & \sigma_\Omega = 0.023, \\ i : (23.404 \pm 0.0060) &+ (0.837 \pm 0.0073) t & \sigma_i = 0.012, \\ e : (0.89674 \pm 0.000067) &- (0.001481 \pm 0.000080) t & \sigma_e = 0.00013. \end{aligned}$$

Видно, что эволюция элементов орбиты частицы зависит в основном от размеров реальной орбиты и для довольно большого интервала масс мало зависит от изменения взаимодействия между притяжением Солнца и большими планетами. Скорость изменения долготы узла для частиц разной массы существенно различна, что объясняет наблюдаемое несовпадение моментов максимумов.

Для объяснения асимметрии кривой активности можно предложить следующую модель. Пусть для частиц определенной массы (точнее, произведения  $r\delta$ , где  $r$  — радиус;  $\delta$  — плотность частицы) сечение роя плоскостью эклиптики имеет форму эллипса. Каноническое уравнение эллипса запишем в виде

$$X^2/\kappa^2 t^2 + Y^2/t^2 = 1, \quad (12)$$

где  $\kappa \geq 1$  — отношение большой полуоси к малой;  $t$  — параметр. Предположим, что плотность частиц убывает с увеличением  $t$ . Введем систему координат  $XY$ , начало которой совпадает с центром эллипсов (12). Расположим эллипсы так, чтобы их большие полуоси были повернуты на угол  $\alpha$  по часовой стрелке относительно оси  $X$ . Тогда в системе  $XY$  уравнение (12) примет вид

$$(\cos^2 \alpha + \kappa^2 \sin^2 \alpha) X^2 + (\sin^2 \alpha + \kappa^2 \cos^2 \alpha) Y^2 + (\kappa^2 - 1) \sin 2\alpha XY = \kappa^2 t^2. \quad (13)$$

Обозначая

$$\cos^2 \alpha + \kappa^2 \sin^2 \alpha = a, \quad \sin^2 \alpha + \kappa^2 \cos^2 \alpha = b, \quad (\kappa^2 - 1) \sin 2\alpha = c, \quad (14)$$

получим

$$aX^2 + bY^2 + cXY = \kappa^2 t^2, \quad aX^2 + cXY + (bY^2 - \kappa^2 t^2) = 0. \quad (15)$$

Так как Земля может пересекать эллипсы равной плотности не по центру, а ниже или выше его на расстоянии  $Y$ , то абсциссы точек пересечения можно найти по формуле

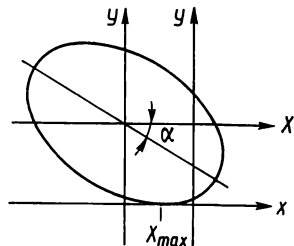
$$X = \frac{-cY \pm [c^2 Y^2 - 4a(bY^2 - \kappa^2 t^2)]^{1/2}}{2a}. \quad (16)$$

Минимальному значению  $t$ , которое отвечает максимальному значению плотности, соответствует

$$X_{\max} = -\frac{cY}{2a} = -\frac{(\kappa^2 - 1) \operatorname{tg} \alpha}{1 + \kappa^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} Y. \quad (17)$$

Введем новую систему координат  $x_1y_1$ , расположенную в плоскости эклиптики (рисунок). Ось  $x_1$  направлена по движению Земли, ось  $y_1$  — в сторону, противоположную Солнцу. Система  $x_1y_1$  неподвижна, а система  $XУ$  перемещается относительно нее так, что оси обеих систем остаются параллельными. Начало координат смещается вследствие эволюции элементов орбиты роя Геминид. Анализ вычислений показывает, что для орбиты (9) скорость смещения начала координат по  $x_1$  и  $y_1$  составляет соответственно  $-0.031$  и  $+0.068$  а. е. в столетие.

Из эволюции орбит (10) и (11), моделирующих движение крупных и мелких частиц, видно, что их элементы изменяются с разной скоростью. Следовательно, центры эллипсов



Эллиптическая модель метеорного роя

этих орбит смещаются также с разными скоростями. Поскольку координата  $У$  центра эллипса возрастает, то, как следует из (17),  $X_{\max}$  смещается в положительном направлении в системе  $XУ$ , что приводит к отличию скорости движения максимума кривой активности потока по долготе от скорости изменения долготы узла его орбиты.

Асимметрию кривой активности в рамках «эллиптической» модели можно объяснить тем, что центры эллипсов одинаковой плотности для частиц разной массы не совпадают. Это также следствие разной скорости эволюции орбит частиц, выброшенных из ядра гипотетической кометы. В результате линии равной плотности как бы сгущаются, когда Земля проходит максимум потока, возникает эффект асимметрии кривой активности. Можно еще отметить, что при условии неподвижности максимума кривой активности отношение большой полуоси к малой  $k=2.3$ , а угол  $\alpha=60^\circ$ . Эти данные получены из дифференциальной скорости изменения элементов орбит метеорных частиц.

1. Бабаджанов П. Б., Заусаев А. Ф., Обрубов Ю. В. Эволюция метеорных роев. Метеорное вещество в межпланетном пространстве.— М.; Казань: Татар. ЦНТИ, 1982.— С. 131—150.
2. Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В. Эволюция орбиты метеорного роя Геминид // Докл. АН ТаджССР.— 1979.— 22, № 8.— С. 466—470.
3. Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В. Особенности эволюции метеорных роев Геминид и Квадрантид // Астрон. журн.— 1984.— 61, № 5.— С. 1005—1012.
4. Белькович О. И., Сулейманов Н. И., Тохтасьев В. С. Поток Геминид по результатам радиолокационных, фотографических и визуальных наблюдений.— М.; Казань: Татар. ЦНТИ, 1982.— С. 88—101.
5. Галибина И. В., Терентьева А. К. Эволюция орбиты роя Геминид на протяжении 100 000 лет // Комет. циркуляр.— 1979.— № 249.— С. 3—4.
6. Дубяго А. Д. Движение периодической кометы Брукса с 1883 по 1946 г. // Учен. зап. Казан. ун-та.— 1950.— 110, кн. 8.— С. 5—44.
7. Крамер Е. Н., Шестака И. С. Возможный механизм формирования короткопериодических метеорных роев // Астрон. вестн.— 1984.— 19, № 2.— С. 137—143.
8. Крамер Е. Н., Шестака И. С. Эволюция связки орбит в метеорном рое Геминид // Кинематика и физика небес. тел.— 1985.— 1, № 4.— С. 73—77.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика.— М.: Наука, 1973.— 207 с.
10. Лебединец В. Н. О происхождении метеорных роев типа Ариетид и Геминид // Астрон. вестн.— 1985.— 19, № 2.— С. 152—157.
11. Обрубов Ю. В. Об образовании метеорного роя Геминид // Докл. АН ТаджССР.— 1980.— 23, № 4.— С. 175—179.
12. Обрубов Ю. В., Шербаум Л. Эволюция орбиты роя Геминид на интервале 30 000 лет // Комет. циркуляр.— 1979.— № 244.— С. 4.
13. Hughes D. W. 1983 TB and the Geminids // Nature.— 1983.— 306, N 5939.— P. 116.

Казан. ун-т им. В. И. Ульянова-Ленина,  
Челяб. политехн. ин-т

Поступила в редакцию 11.03.86,  
после доработки 23.06.86