

Е.Н. Тихомирова

Изучение эволюции эллиптических орбит метеороидных частиц в гравитационном поле Солнца

В рамках возмущенной задачи двух тел предложен критерий отождествления метеороидных частиц и их родительских комет. Полученные аналитические решения уравнений движения частиц учитывают действие фотонов, протонов и альфа-частиц. Согласно, предложенной модели, метеорные потоки β Cancrids, λ Cygnids, κ Cygnids отождествлены с кометами 3D/Biela; 73P/Schwassmann-Wachmann; 177 P Barnard, C/1905 III F 1 Giacobini соответственно.

Ключевые слова: кометы, метеорный поток, метеороиды, эффект Пойнтинга – Робертсона, солнечный ветер, происхождение, динамика.

E.N. Tikhomirova

Studying Evolution of Elliptic Orbits of Meteoroidal Particles in the Sun Gravitational Field

In the context of the perturbed two-body problem the criterion for foundation of probable meteoroid particles' parent bodies is offered. At the deduced analytical solutions of equations of motion the actions of photons, protons and alpha particles are taken into account. According to the model the parent comets for meteor showers β Cancrids, λ Cygnids, κ Cygnids are the comets 3D/Biela; 73P/Schwassmann-Wachmann; 177 P Barnard, C/1905 III F 1 Giacobini correspondingly.

Keywords: comets, meteor shower, meteoroids, Poynting – Robertson effect, a solar wind, origin, dynamics.

Множество методов поиска родственной связи между родительским телом (комета, астероид) и вызванным им метеорным потоком было разработано в последние десятилетия [9]. Известные методы используют физическую, геометрическую основы и наблюдения в отдельности или одновременно. Модели, прогнозирующие появление новых ассоциаций «родительское тело – метеорный поток», несут в себе противоречия и не всегда однозначны, поэтому требуется более тщательное изучение данного вопроса [6], [13].

Взросший интерес к задаче эволюции пылевой составляющей межпланетной среды вполне оправдан. Возмущение орбит метеорных частиц под действием гравитационных и негравитационных сил изучается в связи с интенсивным исследованием проблем происхождения Солнечной системы и астероидно-кометно-метеороидной опасности [12]. В работе предложен метод отождествления родительских комет и метеорных потоков, основанный на уравнениях движения метеороидной частицы и кометы с учетом негравитационных сил.

В статье излагаются результаты исследования, посвященного изучению эволюции эллиптических орбит метеороидных частиц в гравитационном поле Солнца с учетом светового давления, эффекта Пойнтинга – Робертсона и солнечного ветра в аналитическом виде.

Дифференциальное уравнение движения, представленное в векторной форме, абсолютно чёрного сферического тела, изотропно переизлучающего солнечную энергию и движущегося со скоростью v , составляющей угол u с направлением гелиоцентрического радиус-вектора r имеет вид [4]:

$$\begin{aligned} d^2r/dt^2 = -GM/r^2 - 2b \cos u r^2 e_r - b \sin u r^2 e_t, \\ b = \pi R^2 q r_{S-E}^2 v / Mc^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь G – гравитационная постоянная, r – расстояние от Солнца до частицы, R – радиус частицы, c – скорость света, q – солнечная постоянная для среднего расстояния r_{S-E} от Солнца до Земли, e_r и e_t – единичные векторы радиального и трансверсального ускорений, M' – редуцированная масса Солнца, связанная с массой Солнца M_S и массой (сферической) частицы M соотношением:

$$M' = M_S - \pi R^2 q r_{S-E}^2 / (GMc). \quad (2)$$

Заметим, что уравнение (1) применимо в случаях, когда радиус метеороидной частицы R больше, чем длина волны излучения λ . Эффект Пойнтинга – Робертсона характерен для частиц с радиусами от 1 мкм до 1 см, а эффект Яковского становится существенным для тел с радиусами от 10 см до 10 км. [5]. Кроме того, для применения методов теории возмущённого движения в дальнейшем будем полагать, что в правой части уравнения (1) первое слагаемое («фотогравитационное» ускорение [4]) – f_0 превосходит второе – f_1 – и третье слагаемые – f_2 – (возмущающие ускорения) по модулю более чем на порядок.

Воспользовавшись уравнениями Лагранжа для определения возмущений кеплеровских элементов орбиты a – большой полуоси и e – эксцентриситета метеороидной частицы за один оборот её вокруг Солнца, получим:

$$\Delta a' = -4\pi^2 a^2 R^2 q r_{S-E}^2 (3/2e^2 + 1) / (Mc^2 (GM'p^3)^{1/2}) \quad (3)$$

$$\Delta e' = -5\pi^2 R^2 q r_{S-E}^2 e / (Mc^2 \cdot L), \quad (4)$$

$$\text{где } p = a(1 - e^2), L = (G \cdot M'p)^{1/2}.$$

В работах Г. О. Рябовой [1], [6] в полуаналитическом виде учитывается влияние солнечного ветра на движение метеороидов в рамках следующей модели. Плазма солнечного ветра состоит из протонов, электронов, альфа-частиц и тяжёлых ионов. Средняя скорость солнечного ветра (в радиальном направлении) принимается равной $w=400$ км/с (для расстояний $0,3 \text{ а.е.} < r < 10 \text{ а.е.}$). Концентрация протонов n_p в солнечном ветре изменяется по закону $n_p = 8,1(r_{S-E}/r)^2(400/w) \text{ см}^{-3}$. Также используются соотношения: $U=w-v$, $n_\alpha/n_p=0,05$,

здесь w – средняя скорость солнечного ветра;

v – скорость метеороида;

n_α и n_p – концентрация альфа-частиц и протонов в солнечном ветре соответственно.

Действие электронов и тяжёлых ионов на метеороиды не учитывается. Параметром модели также является величина ψ , которая принимает следующие значения: 1,6 (водяной лёд), 1,4 (магнетит), 1,1 (обсидиан).

Тогда, усредним уравнения движения для $\Delta a''$ и $\Delta e''$ орбиты метеороидной частицы с учетом солнечного ветра (корпускулярный аналог эффекта Пойнтинга – Робертсона) и придем к формулам, аналогичным (3), (4), см. (6) и (7). В работе [1], [6] уравнения для $\Delta a''$ и $\Delta e''$ получены с учетом численных параметров:

$$\Delta a'' = -3.65 \cdot 10^3 \Psi \bar{U} (GM')^{-\frac{1}{2}} (A/M) (2 + 2e^2) 2\pi a^{\frac{3}{2}} / (a(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}) \quad (6)$$

$$\Delta e'' = -3.65 \cdot 10^3 \cdot \Psi \bar{U} (GM')^{-\frac{1}{2}} (A/M) (2e) 2\pi a^{\frac{3}{2}} / (a^2(1 - e^2)^{\frac{1}{2}}), \quad (7)$$

здесь A – поперечное сечение метеороида, для сферической частицы $A=\pi R^2$.

В отличие от работ [1] и [6], решим совместно четыре уравнения (3), (4), и (6) и (7) не численным методом, а аналитически с учетом действия фотонов, протонов и альфа-частиц.

$$\text{Тогда } \Delta a \approx \Delta a' + \Delta a''$$

$$\Delta e \approx \Delta e' + \Delta e''$$

$$\Delta a / \Delta e \approx da / de$$

Необходимо также отметить, что рассматриваемый минимальный интервал времени превосходит один оборот метеороидной частицы. Воспользовавшись уравнениями (3) и (6), приходим к выражению для da , а от уравнений (4) и (7) переходим к de . Таким образом, получим уравнение (8):

$$\frac{da}{de} = \frac{a}{1 - e^2} \cdot \frac{(6 + 2k)e^2 + 4 + 2k}{e(5 + 2k)} \quad (8)$$

(коэффициент k представлен с помощью уравнений (11) – (13), которые получены из (3) – (4) и (6) – (7).

Для случая малых возмущений, проинтегрировав уравнение (8), получим (9):

$$e^{\frac{4+2k}{5+2k}} / a(1 - e^2) = Const \quad (9)$$

с учетом начальных условий:

$$a/a_0 - (1 - e_0^2)e^{\frac{4+2k}{5+2k}} / (1 - e^2)e_0^{\frac{4+2k}{5+2k}} = 0. \quad (10)$$

Следует отметить, что для случая $k=0$ уравнение (10) совпадает с аналогичным, полученным авторами [14].

В уравнениях (8)–(10):

$$k = k_w / k_p \quad (11)$$

$$k_w = 3.65 \cdot 10^3 \Psi \bar{U} \quad (12)$$

$$k_p = \frac{\pi q r_{S-E}^2 a_0^{3/2}}{\sqrt{GM' c^2 T_0}}, \quad (13)$$

где k_w и k_p – величины, пропорциональные значениям ускорения, которое вызвано соответственно действием протонов (солнечного ветра) и фотонов на метеороид; a_0 и e_0 – начальные значения большой полуоси и эксцентриситета орбиты метеороида; $T_0 = \frac{2\pi a_0^{3/2}}{\sqrt{GM_S}}$, T_0 – начальный период орбиты или метеороида.

Обратим внимание, что для возможного максимального значения k_w ($\bar{U}=400 \cdot 10^5$ см/с, $\Psi=1,6$) и возможного минимального значения k_p ($M'=M_S$, $a_0^{3/2}/T_0 = \sqrt{GM_S}/(2\pi)$) их отношение не превосходит 1,5, поэтому можно считать

$$0 < k < 1.5. \quad (14)$$

Критерий k позволяет оценивать надёжность отождествления комет и метеорных потоков.

Выразим критерий k из уравнения (10):

$$k = \left(5 \ln \frac{a(1 - e^2)}{a_0(1 - e_0^2)} - 4 \ln \frac{e}{e_0} \right) / \left(\ln \frac{e}{e_0} - \ln \frac{a(1 - e^2)}{a_0(1 - e_0^2)} \right) \quad (15)$$

Для отождествления метеорных потоков и родительских комет с учётом эффекта Пойнтинга – Робертсона и его корпускулярного аналога введём критерий – выполнение (10) и (14). При этом будем полагать, что наклоны орбит комет и метеорных потоков мало отличаются друг от друга ($<10^\circ$) и отсутствуют (по крайней мере, на рассматриваемом интервале времени) тесные сближения комет и метеороидов с большими планетами.

В работе представлена попытка определить родительские кометы некоторых метеорных потоков. В Таблице 1 указаны следующие средние значения элементов орбит метеорных потоков и комет: большая полуось, эксцентриситет и наклонение. Известно, что критерием тождественности кометы и метеорного потока является соотношение (10), которое выполняется с погрешностью меньше 0,001, для известных потоков и их родительских тел [11].

Таблица 1

Кометы – кандидаты в родительские тела метеорных потоков (параметр k показывает различное воздействие светового давления и его корпускулярного аналога на метеороидные частицы, принадлежащие указанным метеорным потокам). Параметр k находится в интервале $0 < k < 1.5$. В скобках указаны средние значения элементов орбит небесных тел (средние кеплеровы элементы гелиоцентрических орбит метеороидов могут существенно отличаться от орбитальных параметров отдельных

метеороидов). Уточненные значения, представленные в таблице, иллюстрируют эффективность предложенного метода отождествления комет и метеорных потоков. При незначительном уточнении параметров a и e метеороидов значения k переходят в область, определяемую соотношением $0 < k < 1,5$. (Взаимодействия комет и метеороидов с планетами не учитываются.)

В Таблице 1 произведена попытка отождествления метеорных потоков β Cancriids, λ Cygnids, κ Cygnids и комет 3D/Biela; 73P/Schwassmann-Wachmann; 177 P/Barnard, C/1905 III F 1 Giacobini соответственно.

Метеорный поток		Комета (Эпоха 2000 01 01)	k
β Cancriids		3D/Biela	
a , а.е	(2,115) 2,105	3,533	0,130
e	(0,614) 0,638	0,768	
i , град.	2,8	12,6	
λ Cygnids		73P/Schwassmann-Wachmann	
a , а.е	(2,532) 2,522	3,060	0,622
e	(0,626) 0,641	0,694	
i , град.	11,2	11,4	
κ Cygnids		177P Barnard	
a , а.е	(3,535) 3,533	24,065	1,179
e	(0,721) 0,719	0,954	
i , град.	32,7	31,2	
κ Cygnids		C/1905 III F 1 Giacobini	
a , а.е	(3,535) 3,533	37,106	1,082
e	(0,721) 0,719	0,970	
i , град.	32,7	40,2	

Следует отметить, что для некоторых известных (уже отождествленных) метеорных потоков и их родительских комет параметр k находится в интервале от 0 до 1,5. Результаты проиллюстрированы в Таблице 2 [11], [1].

В верхней части Таблицы 2 (выделена курсивом) параметр k вычислен из уравнения (15) для некоторых отождествленных метеорных потоков – April Lyrids, Northern Taurids, eta-Aquarids, Orionids – и их родительских комет. При этом параметр k принимает отрицательные значения и не удовлетворяет соотношению (14) для известных пар (для средних значений a и e). В нижней части Таблицы 2 представлены те же небесные тела. Параметр k удовлетворяет соотношению (14) вследствие незначительного уточнения элементов орбиты частицы метеорного потока – большой полуоси a и эксцентриситета e .

Таблица 2

Отождествление метеорных потоков и их родительских комет. Часть I – орбитальные элементы кометы и средние орбитальные элементы метеорных потоков. Часть II – уточненные орбитальные элементы метеорных потоков. k вычислен для соответствующих комет. (Взаимодействия комет и метеороидов с планетами не учитываются.)

I				
Метеорный поток	a , а.е	e	i , град.	k
Комета				
April Lyrids	28,0	0,968	79,0	-5,779
Comet 1861 I	54,176	0,983	79,8	
Nothern Taurids	2,071	0,839	2,4	-5,821
2P/ Encke	2,216	0,847	12	
eta – Aquarids	13,0	0,958	163,5	-5,138
1P / Halley	17,788	0,967	162,3	
Orionids	15,1	0,962	163,9	-5,258
1P / Halley	17,788	0,967	162,3	
II				
Метеорный поток	$k=0$	$k=1,5$	$k=0$	$k=1,5$
April Lyrids	e	0,9672697	0,9672936	0,968
	a	28,0		28,645801
Nothern Taurids	e	0,836957	0,837039	0,839
	a	2,071		2,099052
eta – Aquarids	e	0,955020	0,9550454	0,958
	a	13,0		13,935888
Orionids	e	0,9611979	0,9612084	0,962
	a	15,1		15,422745

Средние кеплеровы элементы гелиоцентрических орбит метеороидов могут существенно отличаться от орбитальных параметров отдельных метеороидов, что ведет к невыполнению приведенного критерия. Например, орбитальная эволюция метеорного потока Perseid на интервале времени 1000 лет приводит к среднему значению больших полуосей метеороидов в интервале $26,1 \text{ а.е} \pm 0,4 \text{ а.е}$ [2].

Для параметра k , удовлетворяющего (14) (см. Таблица 1), значения параметров орбит метеорных потоков значительно отличаются от средних значений, что указывает на необходимость последующих исследований в области отождествления метеорных потоков и их родительских тел.

Следует отметить, что большинство исследователей пытаются найти эффективный критерий отождествления родительских тел метеорных потоков с учетом негравитационных сил [10] и [7], [8]. Однако, например, согласно работе [3], значение D-критерия (предложенного и описанного в работах [10], [7]) может быть использовано для любого метеорного потока только как первое приближение. (Это вытекает из исследования значения D-критерия для метеороидного комплекса кометы 1P/Halley.) Авторы отмечают необходимость изучения верхней границы D-критерия для любого метеорного потока (для более точного отождествления), так как этот критерий является эволюционной характеристикой потока. Значительная дисперсия геоцентрических скоростей и больших полуосей некоторых наблюдаемых метеороидов потока Pons – Winneckids (большая полуось в интервале $2 \text{ а.е} < a < 10 \text{ а.е}$) приводит к значительной дисперсии D-критерия.

Как известно, в работах [11], [12] для определения родственных объектов – (комета – метеорный поток) применяется эмпирический метод. отождествление, прогнозирование появления или увеличения активности метеорного потока возможно за счет использования динамического метода, изложенного выше. Несомненно, прояснение родства между кометами и метеорными потоками приближает человечество к разгадке зарождения Солнечной системы. Предложенный метод описывает эволюцию орбит метеороидных частиц под действием элементарных частиц. Прогнозирование появления метеорных потоков особенно значимо при планировании наблюдений, а также в целях предотвращения значительной опасности для спутников и космических аппаратов при будущих полетах к Марсу.

Библиографический список

1. Бабаджанов, П.Б. Метеоры и их наблюдение (Библиотека любителя астрономии) [Текст] / П.Б. Бабаджанов. – М. : Наука, 1987. – 176 с.
2. Ишмухаметова, М.Г., Кондратьева, Е.Д. Большие полуоси орбит и скорости выброса метеороидов Персеид [Текст] / М.Г. Ишмухаметова, Е.Д. Кондратьева // *Астрономический вестник*. – 2005. – Т. 39, № 2. – С. 184–190.
3. Ишмухаметова, М.Г. Проверка верхней границы D-критерия Саутворта – Хокинса для метеороидных потоков Понс – Виннекид и Персеид : [Текст] / М.Г. Ишмухаметова, Е.Д. Кондратьева, В.С. Усанин // *Астрономический вестник*. – 2009. – Т. 43., №5. – С. 453–458.
4. Радзиевский, В.В. Фотогравитационная небесная механика [Текст] / В.В. Радзиевский. – Нижний Новгород, 2003. – 196 с.
5. Рябова, Г.О. Возраст метеорного потока Геминид (обзор) [Текст] / Г.О. Рябова // *Астрономический вестник*. – 1999. – Т. 33. № 3, С. 258–273.
6. Burns J. A. Lamy Ph. L., Soter S. Radiation forces on small particles in the Solar System. – *Icarus*, 1979. – V. 40. № 2. P. 1–48.
7. Drummond, J. D. A test of comet and meteor shower associations. – *Icarus*, 1981. – V. 45. P. 545–553.
8. Gajdoš, Š., Porubčan, V., 2005. Bolide meteor streams. Dynamics of populations of planetary systems. (2004; Belgrade, Serbia and Montenegro). Proc. of the 197th Coll. of the IAU, Aug. 31 – Sept. 4, 2004.: Eds./ Knežević Z. and Milani A. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 393–398.
9. Ryabova G.O. On the dynamical consequences of the Poynting-Robertson drag caused by solar wind. Dynamics of populations of planetary systems (2004; Belgrade, Serbia and Montenegro). Proc. of the 197th Coll. of the IAU, Aug. 31 – Sept. 4, 2004.: Eds./ Knežević Z. and Milani A. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – P. 411–414.
10. Southworth, R. B. and Hawkins, G. S. Statistics of meteor streams. – *Astrophys.: Smithson. Contrib.*, 1963. – № 7, P. 261–285.
11. Tikhomirova E.N. The influence of elementary particles at meteor particles' motion. The 39-th Lunar-Planetary Science Conference (2008, Houston, USA). Houston: LPI, March 2008. Abstracts – Abstr. №1050 – Режим доступа. <http://adsabs.harvard.edu>.
12. Vokrouhlický, D., Brož, M., Bottke, W.F., Nesvorný, D., Morbidelly, A. Non - gravitational perturbations and evolution of the asteroid main belt. Dynamics of populations of planetary systems (2004; Belgrade, Serbia and Montenegro). Proc. of the 197th Coll. of the IAU, Aug. 31 – Sept. 4, 2004: Eds./ Knežević Z. and Milani A. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 145–156.
13. Watanabe, J. - I. Meteor streams and comets. – *Earth, Moon, and Planets*, 2004. – V. 95. P. 49–61.
14. Wyatt, S. P., Jr., Whipple, F. L. The Poynting-Robertson effect on meteor orbits. – *Astrophys. J.* / Harvard College Observatory, 1950. – V. 111. P. 134–141.