МОДЕЛИ НИЗКОСКОРОСТНЫХ СБЛИЖЕНИЙ КОМЕТ С ЮПИТЕРОМ

Н. Ю. Емельяненко

Южно-Уральский университет
пр. Ленина, 78, Челябинск, Россия
e-mail: emel@termeh.susu.ac.ru

В рамках парной задачи двух тел (Солнце–Юпитер, Солнце–комета) моделируются низкоскоростные сближения короткопериодических комет и Юпитера. Предлагается кинематический механизм возникновения сближения, сопровождающегося известными особенностями. Рассматриваются модели низкоскоростных сближений, приводящие к кратным минимумам функции йовицентрического расстояния кометы и ее временному спутниковому захвату в смысле Эверхарта. Модельные кометы имеют на своих орбитах точки низкоскоростного касания с орбитой Юпитера, при прохождении которых оскулирующая орбита малого тела становится эллиптической. Выделены модели сближений, которые сопровождаются колебаниями йовицентрического расстояния, которые обычно называются кратными минимумами.

MODELS FOR LOW-VELOCITY ENCOUNTERS OF COMETS WITH JUPITER, by Emel'yanenko N. – Short-period comets such as Gehrels 3, Shoemaker-Levy 9, Helin-Roman-Crockett have low-velocity encounters with Jupiter (it is known that about 50 similar objects exist). For most of them this phenomenon is accompanied by the number of peculiarities. The most remarkable are temporary satellitic capture (TSC) and multiple minima (MM) of the jovicentric-distance function of comets. The evolution of many objects was studied in order to investigate this phenomenon.The detailed analysis of close encounters for observed comets has shown the importance of such orbit parameters as size, form and mutual location of a comet and Jupiter during the revolution of the comet. The kinematics of six models for low-velocity encounters was investigated. These models describe the mechanism of TSC and MM of observed comets. The region of orbits with peculiarities of close encounters is found. It is shown that observed comets are located in this region.

ВВЕДЕНИЕ

Около 50 наблюдаемых короткопериодических комет с высоким значением постоянной Тиссерана испытывают сближения с Юпитером, сопровождающиеся целым рядом особенностей. В течение нескольких лет или даже нескольких десятков лет комета находится вблизи Юпитера. Йовицентрическая траектория таких объектов описывает замысловатые петли относительно Юпитера, часто эти петли по форме напоминают спутниковые орбиты. Но наиболее интересными особенностями являются временный спутниковый захват (ВСЗ) в смысле Эверхарта (оскулирующая йовицентрическая орбита кометы становится эллиптической [3] и кратные минимумы (ММ) функции йовицентрического расстояния, установленные в работах Казимирчак-Полонской [4], Карузи, Валсекки [5], Емельяненко [1].

Для исследования этого феномена численным интегрированием уравнений движения малого тела получена эволюция орбит 57 наблюдаемых комет. Тщательный анализ обнаруженных тесных сближений с особенностями показал важность взаимного расположения кометы и Юпитера на периоде обращения, отмеченном минимумом, а также влияние размеров и формы орбиты кометы на появление той или иной особенности. В работе Емельяненко [3] рассмотрена кинематика сближения кометы и Юпитера. В этой работе в рамках парной задачи двух тел (Солнце – круговой Юпитер, Солнце – комета) на орбитах кометы и Юпитера вводятся точки низкоскоростного касания, в которых векторы гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера равны. Сами точки расположены на афелийной или перигелийной части орбиты и удалены не более чем на 1 а. е. от орбиты Юпитера по радиусу-вектору.

ЗАДАЧИ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная задача этой работы – показать возможность появления особенностей (ВСЗ и ММ), не связанных с гравитационным возмущением планеты, на примере моделей низкоскоростных сближений кометы и Юпитера.

Пусть круговая радиуса a_j орбита Юпитера и эллиптическая орбита кометы расположены в одной плоскости. Такое предположение вполне допустимо для исследованных комет (в работе Емельяненко [2] было показано, что их орбиты имеют стабильно низкий наклон на 800-летнем промежутке времени). Пусть a, b, e, q, Q – большая и малая полуоси, эксцентриситет, перигелийное и афелийное расстояния кометы, r – ее радиус-вектор, E, V – эксцентрическая и истинная аномалии, p – параметр эллиптической орбиты кометы, Δ_j^* – расстояние кометы от орбиты Юпитера по радиусу-вектору, Δ_j – йовицентрическое расстояние кометы, α – угол между направлением на комету и Юпитер в произвольный момент времени.

Введем на эллиптической орбите кометы опорные точки: Q, q, b, P, F (см. рисунок). Из сравнения величин гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера находим радиус-вектор точки низкоскоростного касания орбит (точки M):

$$r_M = \frac{2aa_j}{a + a_j}.$$

Рассмотрим шесть моделей низкоскоростных сближений. Совмещаем точки M и Q – получаем модель A_1; точки M и q – модель P_1; точки M и P – модели A_2 и P_2. Орбиты моделей A_3 и P_3 касаются орбиты Юпитера своими апсидальными точками (для них точки M расположены между соответствующей апсидальной и P точками).

Пусть в момент времени t_0 комета находится в верхней апсидальной точке и расположена на одном радиусе-векторе с Юпитером, угол $\alpha = 0$. Кинематика малого тела симметрична относительно начальной апсидальной точки. Для удобства рассмотрим движение кометы между апсидальными точками левой части орбиты (см. рисунок). В произвольный момент временs t угол α находим из законов Кеплера, записанных для кометы и Юпитера:

$$\alpha = (E \pm e \sin E) \left(\frac{a}{a_j}\right)^{3/2} - V.$$

Вычисляем угол α в опорных точках для всех эксцентриситетов каждой модели орбиты. Углы E и V определяем из уравнения траектории, записанного соответственно для E и V, и значений радиуса-вектора кометы в опорных точках. Линейной интерполяцией находим значение угла α между опорными точками, последовательно увеличивая истинную аномалию V кометы на 10° от 0° до 180°. Вычисляем радиус-вектор кометы и йовицентрическое расстояние для всех значений угла α, полученных выше, по формулам уравнения траектории и теореме косинусов. Строим графики Δ_j (вертикальная ось) против V (горизонтальная ось).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ. МОДЕЛЬ A_2

Исследования моделей по предложенной схеме показало, что все шесть моделей сближений допускают низкоскоростные касательные участки в области сближения кометы и Юпитера (радиус низкоскоростного сближения принимается равным 2 а. е.). Длительность ВСЗ обратно пропорциональна значению эксцентриситета орбиты кометы. Кратные минимумы функции йовицентрического расстояния обнаружены только у моделей A_2 и P_2.

Модель A_2 (невозмущенная орбита до и после сближения). Это кометы, орбиты которых удовлетворяют условию [3]

$$e = \sqrt{\frac{a_j - a}{a_j + a}}, \qquad 3.52 \le a \le 5.2043 \text{ а. е.}$$

В дальнейшем изложении все эти кометы называются кометами A_2. Для кометы A_2 выполнено равенство

$$SP = r_M = a(1 + e^2) = \frac{2aa_j}{a + a_j},$$

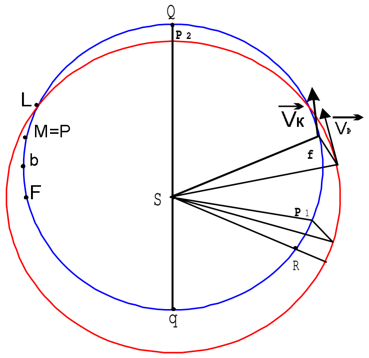
т. е. на орбите этой кометы имеются две точки M_1 и M_2 низкоскоростного касания орбит. M_1M_2 – хорда мнимого фокуса, перпендикулярная к линии апсид.

Основные сведения о комете A_2 приведены на рисунке.

В верхней левой части рисунка дана иллюстрация парной задачи двух тел: Солнце (точка S) – круговая орбита Юпитера; Солнце – эллиптическая орбита кометы A_2. На левую часть орбиты кометы нанесены опорные точки. На правой части орбиты схематично показаны четыре взаимных положения кометы и Юпитера: 1) комета находится в положении R, на одном радиусе-векторе с Юпитером; 2) комета проходит первый минимум ρ_1, находящийся на угловом расстоянии от точки R, не превышающем 10° (по истинной аномалии V); 3) комета удаляется от Юпитера на максимальное расстояние f (оно достигается в окрестности точки низкоскоростного касания

Область ω.

<u>*Комета А2*</u> *(М≡Р)*



Орбита кометы А2 с наибольшим афелийным расстоянием
a=4,77 а.е.; e=0,2068

$$\alpha=(E+e\cdot\sin E)\cdot\left(\frac{1-e^2}{1+e^2}\right)^{\frac{3}{2}}-V \qquad e=\sqrt{\frac{a_{\text{ю}}-a}{a_{\text{ю}}+a}}$$

$$\alpha\geq 0$$

$$r=\frac{(1-e)^2}{1-e\cdot\cos V}\cdot a_{\text{ю}} \qquad b=\frac{(1-e^2)^{\frac{3}{2}}}{1+e^2}\cdot a_{\text{ю}}$$

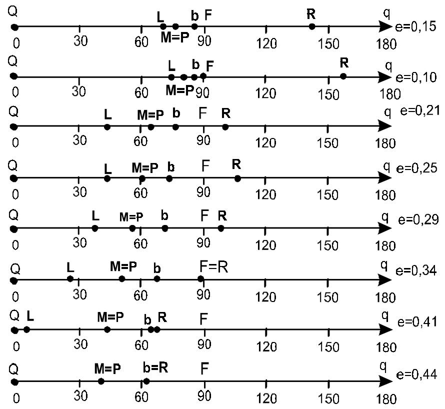
$$Q=\frac{1+e-e^2-e^3}{1+e^2}\cdot a_{\text{ю}} \qquad a=\frac{1-e^2}{1+e^2}\cdot a_{\text{ю}}$$

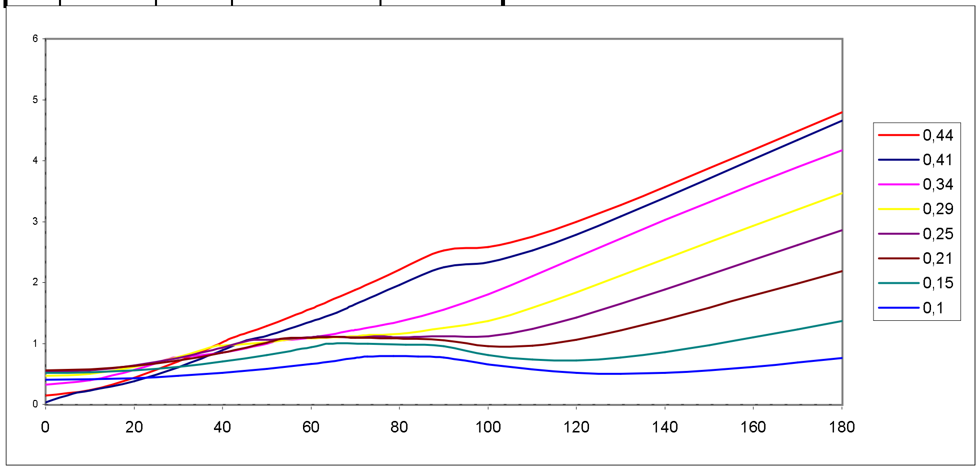
$$q=\frac{1-e-e^2+e^3}{1+e^2}\cdot a_{\text{ю}} \qquad p=\frac{(1-e^2)^2}{1+e^2}\, a_{\text{ю}}$$

$$\Delta^2_{\text{ю}}=4r\sin^2\frac{\alpha}{2}a_{\text{ю}}+(\Delta^*_{\text{ю}})^2$$

$$\alpha_Q=0 \qquad \alpha_R=0 \qquad \Delta^*_{\text{ю}}=\left|r-a_{\text{ю}}\right|$$

о.т	Cos V	Cos E	r, а.е.	$\Delta^*_{\text{ю}}$, à.å
Q	1	1	$\frac{(1-e^2)(1+e)}{1+e^2}a_{\text{ю}}$	$\frac{1-2e-e^2}{1+e^2}\cdot ea_{\text{ю}}$
L	$\frac{e(3-e^2)}{1+e^2}$	$\frac{2\cdot e}{1-e^2}$	$a_{\text{ю}}$	0
M=P	$\frac{2\cdot e}{1+e^2}$	e	$(1-e^2)\cdot a_{\text{ю}}$	$e^2a_{\text{ю}}$
b	e	0	$\frac{1-e^2}{1+e^2}\cdot a_{\text{ю}}$	$\frac{2}{1+e^2}e^2a_{\text{ю}}$
F	0	-e	$\frac{(1-e^2)^2}{1+e^2}\cdot a_{\text{ю}}$	$\frac{3-e^2}{1+e^2}e^2a_{\text{ю}}$
q	-1	-1	$\frac{(1-e)(1-e^2)}{1+e^2}\cdot a_{\text{ю}}$	$\frac{1+2e-e^2}{1+e^2}e\,a_{\text{ю}}$





орбит); 4) в точке афелия Q комета проходит второй минимум ρ_2. Для невозмущенной орбиты кометы левая и правая части орбиты симметричны. Поэтому комета A_2 пройдет второй максимум f_2 в окрестности точки M, третий минимум ρ_3, симметричный первому минимуму и еще одну точку R, расположенную до перигелия.

Возмущения Юпитера приводят к трансформации орбиты реальной кометы в первом же минимуме, и картина симметрии нарушается. Но имеются сближения наблюдаемых комет с двумя-тремя минимумами функции йовицентрического расстояния, которые вполне укладываются в предложенную схему. Например, это сближение 1929–1945 гг. кометы Ашбрук–Джексон, сближение 1936–1946 гг. кометы Шайн–Шальдек.

В правой верхней части рисунка приводятся формулы для угла α и элементов, характеризующих размеры орбиты кометы A_2, выраженные через эксцентриситет e и радиус круговой орбиты Юпитера a_j. Исследование функций $a = a(e)$, $Q = Q(e)$, $q = q(e)$, $b = b(e)$, $p = p(e)$ показало, что элементы орбиты a, b, q, p непрерывно убывают от значений, совпадающих с величиной a_j $(e = 0)$, до значений, указанных для кометы A_2^{min} $(e = 0.44)$. Элемент орбиты Q сначала возрастает до значения $Q = 5.76$ а. е. (точка афелия вышла за пределы орбиты Юпитера), а затем убывает до значения $Q = 5.06$ а. е. Элементы орбиты A_2^{min} и A_2^{max} (орбита кометы A_2 с наибольшим афелийным расстоянием) приводятся ниже:

A_2^{min}	A_2^{max}
$a = 3.52$ а. е.	$a = 4.77$ а. е.
$b = 3.16$ а. е.	$b = 4.67$ а. е.
$Q = 5.06$ а. е.	$Q = 5.76$ а. е.
$q = 1.98$ а. е.	$q = 3.79$ а. е.
$p = 2.84$ а. е.	$p = 4.56$ а. е.
$e = 0.44$	$e = 0.21$

В таблице отдельной рамочкой выделена формула йовицентрического расстояния как функция угла α и величины Δ_j^*. Эта формула помогает сделать предварительные заключения о возможности кратных минимумов (ММ) для каждой рассмотренной модели. Так, для кометы A_2 повышенный интерес вызывают точки R, Q $(\alpha = 0)$, точка L $(\Delta_j^* = 0)$.

В средней левой части рисунка приводится таблица опорных точек (О. Т.) на орбите кометы и значений косинусов углов V, E, радиусов-векторов и величины Δ_j^* в этих точках. Анализ последнего столбца таблицы приводит к выводу о возможности ММ у кометы A_2.

В средней правой части рисунка приводятся положения опорных точек на орбите кометы A_2 (спрямленной и вытянутой вдоль горизонтальной оси от афелия до перигелия) при различных значениях эксцентриситета. Напомним, что на левой части орбиты также находится точка R. Хорошо видно последовательное смещение всех опорных точек к афелию (естественно, кроме точки F). Точка R (а значит, первый и третий минимумы) быстро смещается влево от положения, весьма близкого к перигелию, до точки b.

В нижней части рисунка приводятся графики функций йовицентрического расстояния кометы A_2 на участке орбиты от афелия до перигелия: вертикальная ось – Δ_j, а. е., горизонтальная ось – V, градусы. Эксцентриситет увеличивается снизу вверх от значения $e = 0.1$ до $e = 0.44$. Комета A_2 имеет ММ, если эксцентриситет ее орбиты не превышает значения $e = 0.25$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере моделей низкоскоростных сближений кометы и Юпитера показана возможность появления временного спутникового захвата в смысле Эверхарта и кратных минимумов функции йовицентрического расстояния, не связанных с гравитационным возмущением планеты. Имеется хорошее согласие рассмотренных моделей и тесных сближений наблюдаемых комет с явлениями ВСЗ и ММ.

Работа поддержана грантом РФФИ 01-02-16006.

[1] *Емельяненко Н. Ю.* Тесные сближения комет с Юпитером // Комет. циркуляр.–1984.–№ 331.–С. 3–4.

[2] *Емельяненко Н. Ю.* Короткопериодические кометы с высоким значением постоянной Тиссерана. 1. Орбитальная эволюция // Астрон. вестн.–1997.–**31**.–С. 257–267.

[3] *Емельяненко Н. Ю.* Кинематика низкоскоростных сближений кометы с Юпитером // Кометы, астероиды, метеоры, метеориты, астроблемы, кратеры: Тр. первой междунар. конф. КАММАК 99.–Винница, 2000.–С. 35–40.

[4] *Казимирчак-Полонская Е. И.* Захват комет Юпитером и некоторые закономерности в вековой эволюции кометных орбит // Проблемы исслед. Вселенной. Астрометрия и небесная механика.–1978.–Вып. 7.–С. 340–383.

[5] *Carusi A., Valsecchi G. B.* Temporary Satellite Captyres of comets by Jupiter // Astron. and Astrophys.–1981.–**94**.–P. 226–228.

[6] *Everhart E.* Horseshoe and Trojan orbits associated with Jupiter and Saturn // Astron. J.–1973.–**78**.–P. 316–328.