

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТ КОМЕТ

Н.Ю. Емельяненко

В работе исследуется кинематика касательного сближения малого тела с Юпитером. В рамках парной задачи двух тел (Солнце – Юпитер, Солнце – комета) предлагаются две модели комет, у которых точки низкоскоростного касания их орбит с орбитой Юпитера совпадают с апсидальными точками. Рассматривается возможность и определяются условия длительного сближения этих комет с Юпитером. Анализируются особенности сближений модельных и реальных комет, орбиты которых близки к предложенным моделям. Работа поддержана грантом РФФИ № 01-02-16006.

Введение

Эта работа продолжает исследование кинематики низкоскоростных сближений с Юпитером комет, удовлетворяющих условию

$$T_j \geq 2,9, \quad (1)$$

где T_j – постоянная Тиссерана кометы относительно Юпитера.

В работах [1, 2] введены понятия точек низкоскоростного касания орбит кометы и Юпитера, точки минимальной йовицентрической скорости и низкоскоростного касательного участка на орбите кометы. На плоскости (a, e) выделена область орбит комет с особенностями в сближениях с Юпитером – область ω (рис. 1).

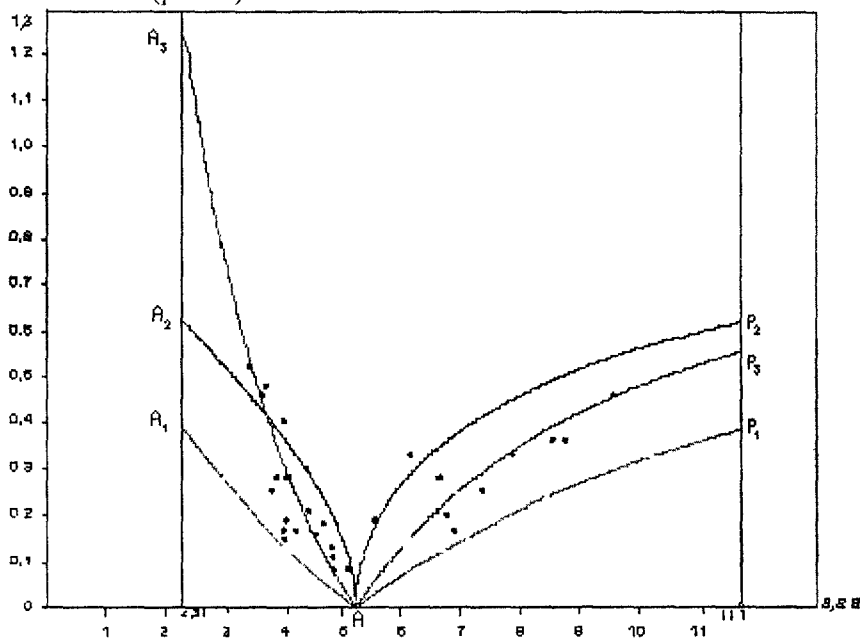


Рис. 1. Невозмущенные орбиты всех наблюдаемых комет с особенностями в сближениях с Юпитером в расширенной области ω

Основные задачи исследования

В работе изучаются модельные кометы, орбиты которых расположены на нижней линии области ω – линии A_1AP_1 .

1. Рассматривается эволюция орбит при продвижении вдоль линии A_1AP_1 (изменение элементов, характеризующих размеры и форму орбиты).

2. Оценивается возможность и определяются условия синхронного движения Юпитера и кометы по афелийной (перигелийной) части орбиты.

3. Выделяются и описываются возможные особенности сближения с Юпитером модельных комет.

Так как модели комет из области ω выбираются по расположению точек низкоскоростного касания их орбит и орбиты Юпитера и неоднократно упоминаются в последующем изложении материала, повторим определения точек низкоскоростного касания орбит.

Пусть в момент времени t_M комета находится в точке орбиты M , а Юпитер – в точке M' . Пусть \vec{V}_k, \vec{V}_j – векторы гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера; \vec{V}_j – вектор йовицентрической скорости кометы; V_k, V_{j0}, V_j – абсолютные величины векторов $\vec{V}_k, \vec{V}_j, \vec{V}_j$.

Точки M и M' назовем точками низкоскоростного касания орбит, если в момент времени t_M векторы гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера равны:

$$\vec{V}_k \parallel \vec{V}_j; \tag{2}$$

$$V_k = V_j. \tag{3}$$

Равенство (2) означает коллинеарность и одинаковую направленность векторов.

1. Модель A_1 (невозмущенная орбита до и после сближения)

Это кометы, орбиты которых удовлетворяют условию

$$e_k = \frac{a_{j0} - a_k}{a_{j0} + a_k}. \tag{1.1}$$

Они расположены на нижней левой границе области ω , линии AA_1 (рис. 1). В дальнейшем изложении все эти кометы называются кометой A_1 . Для кометы A_1 выполнено равенство:

$$Q_k = r_M = \frac{2a_k a_{j0}}{a_k + a_{j0}}, \tag{1.2}$$

то есть на орбите этой кометы имеется всего одна точка низкоскоростного касания – M , совпадающая с афелием.

Оценим элементы, характеризующие размеры орбиты кометы A_1 , на линии орбит AA_1 , где точка A соответствует орбите Юпитера (в рассматриваемых моделях это круговая орбита: $a_{j0} = 5,2043$ а.е., $e = 0$), точка A_1 на плоскости (a, e) имеет координаты: $a = 3,52$ а.е., $e = 0,19$. Выразим элементы a, Q, q орбиты кометы A_1 через эксцентриситет e_k и большую полуось орбиты Юпитера a_{j0} :

$$a_k = \frac{1 - e_k}{1 + e_k} a_{j0};$$

$$Q_k = (1 - e_k) a_{j0}; \tag{1.3}$$

$$q_k = \frac{(1 - e_k)^2}{1 + e_k} a_{j0}.$$

Исследование функций $a_k = a_k(e), Q_k = Q_k(e), q_k = q_k(e)$ показало, что при продвижении вдоль линии орбит AA_1 области ω размеры орбиты кометы A_1 непрерывно убывают от орбиты Юпитера до наименьшей A_1^{min} , изображенной на рис. 2.

$$a = 3,52 \text{ а.е.}$$

$$A_1^{min}: Q = 4,20 \text{ а.е.} \tag{1.4}$$

$$q = 2,84 \text{ а.е.}$$

$$e = 0,19.$$

Найдем условия, необходимые для длительного низкоскоростного сближения кометы A_1 и Юпитера.

Рассмотрим синхронные движения Юпитера и кометы A_1 по афелийной части ее орбиты $I_1 Q I_2$; точки I_1, I_2 образуют хорду, проходящую через мнимый фокус эллиптической орбиты кометы симметрично относительно линии апсид. Пусть в момент прохождения

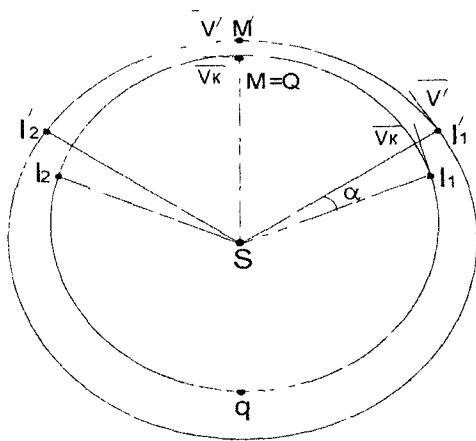


Рис. 2. Наименьшая орбита кометы A_1 в области ω ($e = 0,1927$)

кометой A_1 точки афелия (moment времени T_Q) комета и Юпитер находятся на одном радиусе-векторе (напомним, что точки Q и M' – это точки низкоскоростного касания орбит кометы A_1 и

Юпитера; $T_Q = T_M$). Синхронные движения $I_1' M' I_2'$ Юпитера и $I_1 Q I_2$ кометы действительно возможны, так как в рассматриваемых моделях комета и Юпитер движутся по законам Кеплера (см. рис. 2):

$$E_k + e_k \sin E_k = M_k = x a_k^{3/2} (t_F - T_Q), \tag{1.5}$$

$$E_{ю} = M_{ю} = v_{ю} = x a_{ю}^{-3/2} (t_F - T_Q),$$

где t_f – момент прохождения кометой точки I_2 и Юпитером – точки I_2' (ввиду симметрии движения тел относительно точки афелия рассмотрим дуги орбит $Q I_2$ и $M' I_2'$).

Так как орбитальная скорость кометы A_1 выше орбитальной скорости Юпитера, в момент времени t_1 выполнено равенство

$$M_{ю} = v_k - \alpha_1, \tag{1.6}$$

где α_1 – угол между направлением на комету A_1 и Юпитер в момент времени t_1 .

Из уравнений Кеплера (1.5) с учетом равенства (1.6) определяем угол α_1 :

$$\alpha_1 = v_k - (E_k + e_k \sin E_k) \left(\frac{a_k}{a_{ю}} \right)^{3/2} \tag{1.7}$$

(величины E, M, v отсчитываем от точки афелия).

Для кометы A_1

$$\cos E_k = e_k \cos v_k = \frac{2e_k}{1+e_k^2}. \tag{1.8}$$

Выражения для косинусов получены с учетом того, что в момент времени t_1 радиус-вектор кометы A_1 находится по формуле

$$r_l = a_k (1 + e_k^2). \tag{1.9}$$

Решение уравнения (1.7) относительно α_1 для кометы A_1 дает нам значение угла между направлением на Юпитер и на комету в момент времени t_1 для различных значений эксцентриситета (см. табл. 1). Положение кометы I_1 и Юпитера I_1' (см. рис. 2) с углом α_1 между направлением на эти объекты, соответствующим табличному значению, назовем начальными условиями низкоскоростного касательного сближения кометы A_1 .

Таблица 1

Значения угла α_1 в момент времени t_1 как функция эксцентриситета орбиты кометы A_1

e_k	α_1 , град	v_k , град	E_k , град	r_l , а.е.	Δ_j^l , а.е.	$v_k/v_{ю}$	Δ_j^Q , а.е.
0,05	6,83	84,3	87,1	4,72	0,76	1,05	0,26
0,06	7,98	83,1	86,6	4,63	0,89	1,06	0,31
0,07	9,07	82,0	86,0	4,55	1,01	1,07	0,36
0,08	10,11	80,9	85,4	4,46	1,13	1,08	0,42
0,09	11,08	79,7	84,8	4,38	1,24	1,08	0,47
0,10	12,00	78,6	84,3	4,30	1,34	1,09	0,52
0,11	12,87	77,4	83,7	4,22	1,44	1,10	0,57
0,12	13,68	76,3	83,1	4,15	1,53	1,11	0,62
0,13	14,44	75,2	82,5	4,07	1,62	1,12	0,68
0,14	15,16	74,1	82,0	4,00	1,70	1,13	0,73
0,15	15,83	72,9	81,4	3,93	1,78	1,14	0,78
0,16	16,46	71,8	80,8	3,87	1,86	1,14	0,83
0,17	17,04	70,7	80,2	3,80	1,92	1,15	0,89
0,18	17,59	69,6	79,6	3,73	1,99	1,16	0,94
0,19	18,09	68,5	79,0	3,67	2,06	1,17	0,99

Примечание В третьем – восьмом столбцах таблицы для кометы A_1 последовательно указываются истинная аномалия v , эксцентрисическая аномалия E_k , радиус-вектор r_k и расстояние до Юпитера в точке I , отношение модулей гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера в момент времени t_1 , минимальное йовицентрическое расстояние на афелийной части орбиты (в точке афелия).

Проанализируем изменение каждого элемента табл. 1 по вертикали.

Угол α_i , величины $\Delta_j^I, \Delta_j^Q, V_k/V_{ю}$ непрерывно увеличиваются – область сближения единичного радиуса охватывает все меньшую дугу афелийной части орбиты. В точке A_1 линии AA_1 (см. рис. 1) область сближения стянется в одну-единственную точку афелия Q . Величины v_k, E_k, r_1 непрерывно уменьшаются – сама афелийная часть орбиты уменьшается. С увеличением эксцентриситета кометной орбиты условия для длительного низкоскоростного сближения ухудшаются. Динамику процесса отражает рис. 3, на котором представлены графики изменения йовицентрического расстояния кометы A_1 на афелийной части орбиты в зависимости от истинной аномалии v_k . Так как угол α мал ($0,95 \leq \cos \alpha \leq 0,99$), на участке траектории I_1Q изменяем его равномерно.

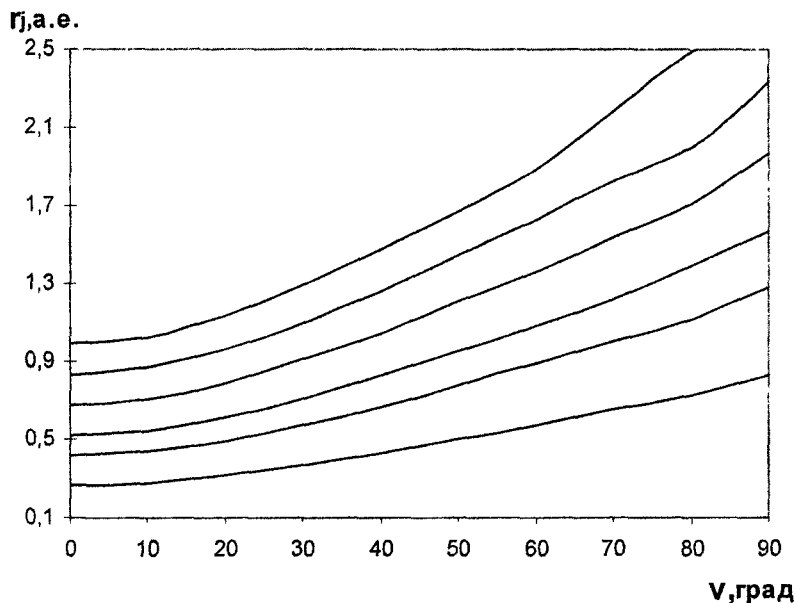


Рис. 3. Графики изменения йовицентрического расстояния кометы A_1 на афелийной части орбиты

Остановимся более подробно на возможных особенностях сближения кометы A_1 и Юпитера.

Совершенно очевидно, что для орбит A_1 в точке $Q(M)$ выполнены оба условия (2), (3) (см. введение), если в момент времени T_Q комета и Юпитер находятся на одном радиусе-векторе. В этом случае в точке $Q(M)$ йовицентрическая скорость кометы A_1 равна нулю и в ее окрестности с неизбежностью будет фиксироваться ВСЗ – временный спутниковый захват кометы Юпитером в смысле Эверхарта ($e_j < 1$).

Непосредственный анализ предпоследнего столбца табл. 1 и рис. 2 позволяет сделать вывод о возможности длительного захвата, не связанного с гравитационным взаимодействием с Юпитером, так как на всем афелийном участке орбиты приблизительно выполняются условия (2), (3), описанные выше.

Оценим изменение йовицентрического расстояния кометы A_1 на афелийном участке орбиты. По теореме косинусов с учетом первого из равенств (1.3)

$$\Delta_j = \sqrt{1 + \frac{(1-e_k)^4}{(1-e_k \cos v_k)^2} - \frac{2(1-e_k)^2}{1-e_k \cos v_k} \cos \alpha} \cdot a_{ю} \quad (1.10)$$

Исследование функции $\Delta_j = \Delta_j(v_k, \alpha)$ показало, что она имеет единственный экстремум – минимум

$$\Delta_j^{\min} = \Delta_j^Q = a_{ю} - Q_k = e_k a_{ю} \quad (1.11)$$

достигаемый при выполнении равенств: $v_k = 0$; $\alpha = 0$, то есть когда комета проходит точку афелия. Эта точка одновременно является точкой низкоскоростного касания орбит и точкой минимума S .

Итак, сближение кометы A_1 и Юпитера, удовлетворяющее начальным условиям, рассмотренным выше, – это низкоскоростное касательное сближение. Особенности сближения:

1. Это длительное сближение, охватывающее всю афелийную часть орбиты. Для наименьшей из орбит (1.4), изображенной на рис. 2, расстояния до Юпитера в точках I_1, I_2 совпадают с радиусом низкоскоростного сближения [3].

2. Функция йовицентрического расстояния кометы A_1 имеет единственный минимум ρ , точка минимума C на орбите кометы совпадает с точкой афелия: $C \equiv Q$.

3. Точка афелия одновременно является точкой низкоскоростного касания орбит: $Q \equiv M$.

4. Точка афелия – центр длинного низкоскоростного касательного участка, на котором с неизбежностью возникает временный спутниковый захват в смысле Эверхарта.

2. Модель P_1 (невозмущенная орбита до и после сближения)

Это кометы, орбиты которых удовлетворяют условию

$$e_k = \frac{a_k - a_{ю}}{a_{ю} + a_k} \tag{2.1}$$

Они расположены на нижней правой границе области ω , линии AP_1 (см. рис.1). В дальнейшем изложении все эти кометы называются кометой P_1 . Для кометы P_1 выполнено равенство

$$q_k = r_M = \frac{2a_k a_{ю}}{a_k + a_{ю}} \tag{2.2}$$

на орбите этой кометы имеется одна точка низкоскоростного касания M , совпадающая с перигелием.

Оценим элементы, характеризующие размеры орбиты кометы P_1 , на линии орбит AP_1 , где точка A соответствует орбите Юпитера, точка P_1 на плоскости (a, e) имеет координаты: $a = 7,68$ а.е., $e = 0,19$. Выразим элементы a, Q, q орбиты кометы P_1 через эксцентриситет e_k и большую полуось орбиты Юпитера $a_{ю}$:

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1 + e_k}{1 - e_k} a_{ю}; \\ Q_k &= \frac{(1 + e_k)^2}{1 - e_k} a_{ю}; \\ q_k &= (1 + e_k) a_{ю}. \end{aligned} \tag{2.3}$$

Исследование функций $a_k = a_k(e)$, $Q_k = Q_k(e)$, $q_k = q_k(e)$ показало, что при продвижении вдоль линии орбит AP_1 области ω размеры орбиты кометы P_1 непрерывно возрастают от орбиты Юпитера до наибольшей P_1^{max} , изображенной на рис. 4:

$$\begin{aligned} a &= 7,68 \text{ а.е.}; \\ P_1^{max}: Q &= 9,16 \text{ а.е.}; \\ q &= 6,20 \text{ а.е.}; \\ e &= 0,19. \end{aligned} \tag{2.4}$$

Найдем условия, необходимые для длительного низкоскоростного сближения кометы P_1 и Юпитера.

Рассмотрим синхронные движения Юпитера и кометы P_1 по перигелийной части ее орбиты $F_1 q F_2$; точки F_1, F_2 образуют хорду, проходящую через Солнце симметрично относительно линии апсид. Пусть в момент прохождения кометой P_1 точки перигелия (момент времени T_q) комета и Юпитер находятся на одном радиусе-векторе (точки q и M' – это точки

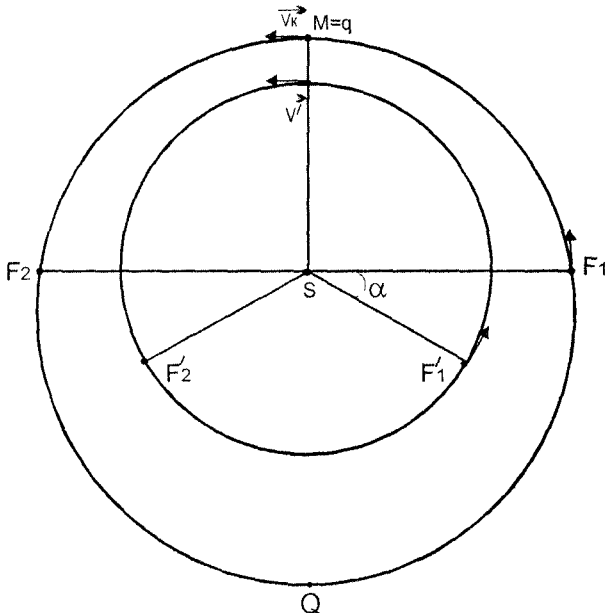


Рис. 4. Наибольшая орбита кометы P_1 в области ω ($e = 0,1925$)

низкоскоростного касания орбит кометы P_1 и Юпитера: $T_q = T_M$). Запишем уравнения Кеплера для кометы P_1 и Юпитера (см. рис. 4):

$$\begin{aligned} E_k - e_k \sin E_k &= M_k = x a_k^{-3/2} (t_F - T_q), \\ E_{ю} &= M_{ю} = v_{ю} = x a_{ю}^{-3/2} (t_F - T_q), \end{aligned} \tag{2.5}$$

где t_F – момент прохождения кометой точки F_2 и Юпитером – точки F_2' (рассмотрим дуги орбит qF_2 и $M'F_2'$). Так как орбитальная скорость кометы P_1 ниже орбитальной скорости Юпитера, в момент времени t_F выполнено равенство

$$M_{Ю} = v_{к} + \alpha_F, \quad (2.6)$$

где α_F – угол между направлением на комету P_1 и Юпитер в момент времени t_F .

Из уравнений Кеплера (2.5) с учетом равенства (2.6) определяем угол α_F :

$$\alpha_F = (E_k - e_k \sin E_k) \left(\frac{a_k}{a_{Ю}} \right)^{3/2} - v_k \quad (2.7)$$

(величины E, M, v отсчитываем от точки перигелия).

Для кометы P_1

$$\cos E_k = e_k, \cos v_k = 0; v_k = \frac{\pi}{2}. \quad (2.8)$$

Выражения для косинусов получены с учетом того, что в момент времени t_F радиус-вектор кометы P_1 находится по формуле

$$r_F = a_k (1 - e_k^2). \quad (2.9)$$

Решение уравнения (2.7) относительно α_F для кометы P_1 дает нам значение угла между направлением на Юпитер и на комету в момент времени t_F для различных значений эксцентриситета (табл. 2). Положение кометы F_1 и Юпитера F_1' (см. рис. 4) с углом α_F между направлением на эти объекты, соответствующим табличному значению, назовем начальными условиями низкоскоростного касательного сближения кометы P_1 .

Таблица 2

Значения угла α_F в момент времени t_F как функция эксцентриситета орбиты кометы P_1

e_k	α_F , град	E_k , град	r_F , а.е.	Δ_j^F , а.е.	$v_k / v_{Ю}$	Δ_j^q , а.е.
0,05	7,92	87,1	5,74	0,92	0,95	0,26
0,06	9,54	86,6	5,85	1,12	0,95	0,31
0,07	11,18	86,0	5,96	1,32	0,94	0,36
0,08	12,82	85,4	6,07	1,53	0,93	0,42
0,09	14,48	84,8	6,18	1,73	0,92	0,47
0,10	16,15	84,3	6,30	1,94	0,91	0,52
0,11	17,83	83,7	6,41	2,16	0,91	0,57
0,12	19,53	83,1	6,53	2,38	0,90	0,62
0,13	21,23	82,5	6,65	2,60	0,89	0,68
0,14	22,95	82,0	6,76	2,83	0,88	0,73
0,15	24,68	81,4	6,88	3,06	0,88	0,78
0,16	26,43	80,8	7,00	3,29	0,87	0,83
0,17	28,18	80,2	7,12	3,53	0,87	0,89
0,18	29,95	79,6	7,25	3,77	0,86	0,94
0,19	31,73	79,0	7,37	4,02	0,85	0,99

Примечание. В третьем – седьмом столбцах таблицы для кометы P_1 последовательно указываются: эксцентриситетная аномалия E , радиус-вектор r_F и расстояние до Юпитера Δ_j^F в точке F ; отношение модулей гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера в момент времени t_F ; минимальное йовицентрическое расстояние до Юпитера на перигелийной части орбиты (в точке перигелия).

Проанализируем изменение каждого элемента табл. 2 по вертикали.

Угол α_F , величины r_F , Δ_j^F , Δ_j^q непрерывно увеличиваются. Только для кругообразных орбит ($e \leq 0,6$) комета будет находиться в сфере единичного радиуса на всей перигелийной части орбиты; при увеличении эксцентриситета область сближения будет охватывать все меньшую и меньшую дугу перигелийной части орбиты. В точке P_1 линии AP_1 (см. рис. 1) область сближения единичного радиуса стянется в одну-единственную точку перигелия q . Величина E_F непрерывно уменьшается – дуга орбиты F_1qF_2 составляет все меньшую часть полного орбитального эллипса

кометы P_1 . С увеличением эксцентриситета кометной орбиты условия для длительного низкоскоростного сближения кометы P_1 быстро ухудшаются.

Динамику процесса отражает рис. 5. Угол α для кометы P_1 изменяется в более широких пределах ($0,85 \leq \cos \alpha \leq 0,99$), но при построении всех графиков мы изменяли его равномерно. Из графиков следует, что при равномерном изменении угла α на участке орбиты F_1qF_2 функция йовицентрического расстояния кометы P_1 (величина Δ_j) имеет единственный экстремум-минимум, который достигается в точке перигелия.

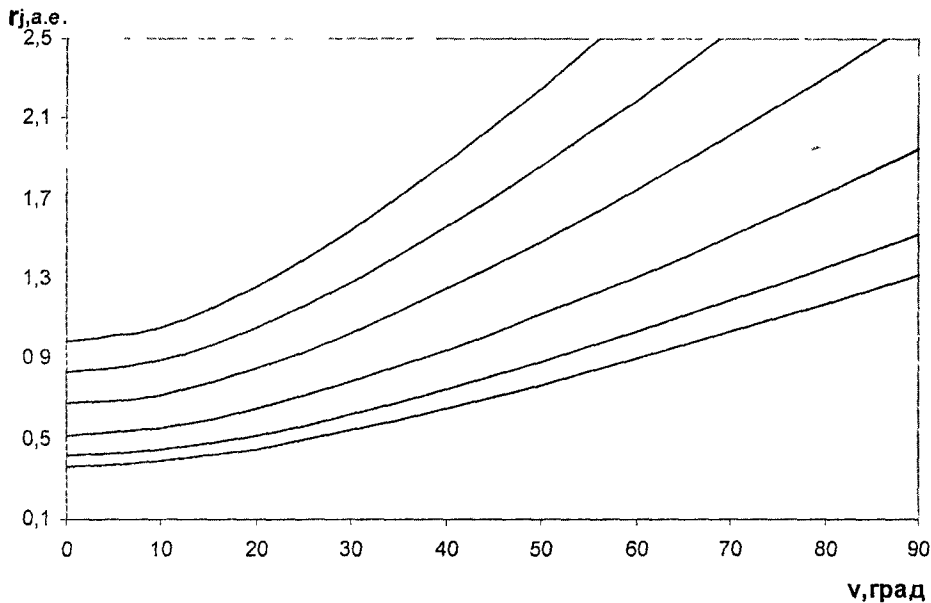


Рис. 5. Графики изменения йовицентрического расстояния кометы P_1 на перигелийной части орбиты

Остановимся более подробно на возможных особенностях сближения кометы P_1 и Юпитера.

Совершенно очевидно, что для орбит P_1 в точке $q(M)$ выполнены оба условия (2), (3), если в момент времени T_q комета и Юпитер находятся на одном радиусе-векторе.

В этом случае в точке $q(M)$ йовицентрическая скорость кометы P_1 равна нулю и в ее окрестности с неизбежностью будет фиксироваться временный спутниковый захват, не связанный с гравитационным взаимодействием с Юпитером. Но из анализа рис. 4 видно, что ВСЗ в смысле Эверхарта невозможен на всей перигелийной части орбиты даже для комет с кругообразными орбитами, так как в точках F_1, F_2 заведомо нарушается условие (2) (параллельности векторов гелиоцентрических скоростей кометы P_1 и Юпитера). Благоприятные для ВСЗ положения планеты и кометы появляются только после пересечения Юпитером линии $F_1 F_2$.

Оценим изменение йовицентрического расстояния кометы P_1 на перигелийном участке орбиты. По теореме косинусов с учетом первого из равенств (2.3):

$$\Delta_j = \sqrt{1 + \frac{(1+e_k)^4}{(1+e_k \cos v_k)^2} - \frac{2(1+e_k)^2}{1+e_k \cos v_k} \cos \alpha \cdot a_{j0}} \quad (2.10)$$

Исследование функции $\Delta_j = \Delta_j(v_k, \alpha)$ показало, что она имеет единственный экстремум-минимум

$$\Delta_j^{\min} = \Delta_j^q = q_k - a_{j0} = e_k a_{j0} \quad (2.11)$$

достигаемый при выполнении равенств: $v_k=0$; $\alpha=0$, то есть когда комета проходит точку перигелия. Эта точка одновременно является точкой низкоскоростного касания орбит и точкой минимума S .

Итак, сближение кометы P_1 и Юпитера, удовлетворяющее начальным условиям, рассмотренным выше – это низкоскоростное касательное сближение. Особенности сближения:

1. Это длительное сближение. Для комет, орбиты которых удовлетворяют условию: $e_k \leq 0,11$, вся перигелийная часть орбиты принадлежит области сближения с радиусом в 2 а.е. Для остальных орбит линии AP_1 области ω длительность сближения обеспечивается большой длиной дуги орбиты, принадлежащей области сближения (см. рис. 3, 4).

2. Функция йовицентрического расстояния кометы P_1 имеет единственный минимум ρ , точка минимума C на орбите кометы совпадает с точкой перигелия: $C \equiv q$.

3. Точка перигелия одновременно является точкой низкоскоростного касания орбит: $q \equiv M$.

4. Точка перигелия – центр низкоскоростного касательного участка, на котором с неизбежностью возникает временный спутниковый захват в смысле Эверхарта. Но для кометы P_1 ВСЗ не может охватить всю перигелийную часть орбиты.

Пусть орбиту A_1 или P_1 на периоде обращения, отмеченном минимумом, имеет реальная комета. Приведенные выше геометрические результаты будут искажаться, в основном, по двум причинам. Во-первых, Юпитер движется по эллиптической орбите. От того, в какой части этой орбиты произойдет сближение, зависит расположение точек низкоскоростного касания M_i [см. условия (1.2); (2.2)]. Несовпадение точек M_i и апсидальных точек приводит к несовпадению моментов времени T ($T = T_Q \cup T = T_q$) и T_M (момент касания орбит). Во-вторых, неизбежно нарушаются начальные условия, необходимые для синхронного движения, что приводит к несовпадению моментов времени T и T_p (момент минимума). Обе причины приведут к отсутствию точки низкоскоростного касания орбит кометы и Юпитера. Вместо нее появится точка минимальной йовицентрической скорости \underline{M} момент прохождения которой принадлежит промежутку $[T_M, T_p]$. Высокая эффективность сближения реальной кометы обеспечивается не только величиной ρ , но и тем, что в окрестности точки минимума находится точка минимальной йовицентрической скорости \underline{M} . Окрестности точки \underline{M} образуют низкоскоростной касательный участок, на котором фиксируется ВСЗ ($e_j < 1$). Этот участок может охватывать всю афелийную часть орбиты кометы A_1 , включая точку минимума C , но для перигелийной части орбиты кометы P_1 это невозможно по причине, изложенной выше. Гравитация Юпитера непрерывно возмущает орбиту кометы. Если величины Δ_j^M , ρ окажутся менее радиуса сферы действия Юпитера, комета испытает временный гравитационный захват (ВГЗ) с возможным выходом на спутниковую (по форме) орбиту, так как на низкоскоростном касательном участке орбиты тангенциальная составляющая йовицентрического ускорения мала. ВГЗ будет увеличивать йовицентрическую скорость кометы в окрестности точки минимума. У функции V_j возможно появление экстремума – максимума в момент времени T_p и нарушение условия ВСЗ в окрестности точки C . С другой стороны, гравитационный захват при некоторых дополнительных условиях, наложенных, например, на величину ρ , по-видимому, может перевести комету на орбиту временного спутника Юпитера. Примеры комет, совершивших несколько обращений вокруг планеты, в настоящее время известны. Это кометы Герельс 3 [4–6], Шумейкер-Леви 9 [7], Хелин-Роман-Крокет [8] и некоторые другие кометы.

Литература

1. Emel'yanenko N. Yu. Kinematics of the comets low-velocity encounters with Jupiter // Proceeding of the International conference SAMMAS. – 2000. – P. 35–40.
2. Емельяненко Н.Ю. Короткопериодические кометы с высоким значением постоянной Тиссерана. 3. Кинематика низкоскоростных сближений // Астрон. вест. – 2003. – Т. 37.1. – С. 66–73.
3. Емельяненко Н.Ю. Динамика орбит комет при тесном сближении с Юпитером. Анализ длительности сближений // Астрон. вест. – 2003. – Т. 37.2. – С. 153–160.
4. Казимирчак-Полонская Е.И. Захват комет Юпитером и некоторые закономерности в вековой эволюции кометных орбит // Проблемы исследования Вселенной. Астрометрия и небесная механика. – М.–Л.; 1978. – Вып. 7.– С. 340–383.
5. Rickman H., Malmort A.M. Variations of the Orbit of Comet p/Gehrels 3: Temporary Satellite Captures by Jupiter// Astronomy and Astroph. – 1981. – V. 102. – P. 165–170.
6. Емельяненко Н.Ю. Сближение кометы Герельс 3 с Юпитером // Кометн. цирк.– 1985. – № 341. – С. 3.
7. Sekanina Z. Tidal breakup of the nucleus of comet Shoemaker-Levy 9 // The collision of comet P/ Shoemaker-Levy 9 and Jupiter eds. K.S.Nol, H.A.IWeaver and P.D.Feldman. Cambridge University Press. – 1994.– P. 1–23.
8. Rickman H. Physico-dynamical evolution of aging comet. // Phis-Dyn. Minor Bodies (Goutelas 91). – 1992. – P. 197–263.

Поступила в редакцию 26 апреля 2003 г.