

# 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  $\omega$  (рис. 1).

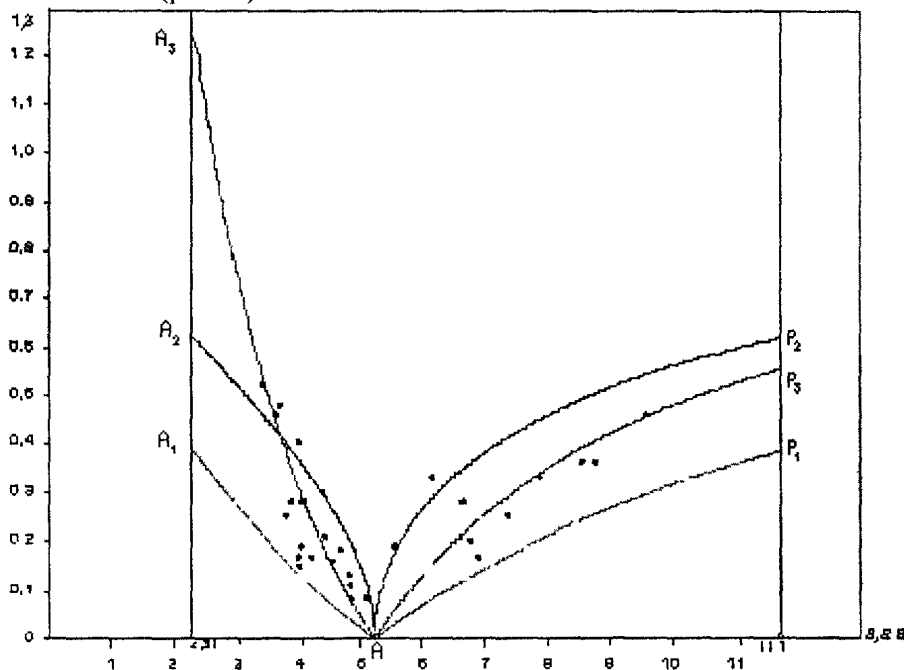


Рис. 1. Невозмущенные орбиты всех наблюдаемых комет с особенностями в сближениях с Юпитером в расширенной области  $\omega$

## Основные задачи исследования

В работе изучаются модельные кометы, орбиты которых расположены на нижней линии области  $\omega$  – 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  $\omega$  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  $\vec{V}_k, \vec{V}_{ю}$  – векторы гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера;  $\vec{V}_j$  – вектор йовицентрической скорости кометы;  $V_k, V_{ю}, V_j$  – абсолютные величины векторов  $\vec{V}_k, \vec{V}_{ю}, \vec{V}_j$ .

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

$$\vec{V}_k \parallel \vec{V}_{ю}; \quad (2)$$

$$V_k = V_{ю}. \quad (3)$$

Равенство (2) означает коллинеарность и одинаковую направленность векторов.

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

Это кометы, орбиты которых удовлетворяют условию

$$e_k = \frac{a_{ю} - a_k}{a_{ю} + a_k}. \quad (1.1)$$

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

$$Q_k = r_M = \frac{2a_k a_{ю}}{a_k + a_{ю}}, \quad (1.2)$$

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:  $a_{ю} = 5,2043$  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  $a_{ю}$ :

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

$$Q_k = (1 - e_k) a_{ю}; \quad (1.3)$$

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

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  $\omega$  размеры орбиты кометы  $A_1$  непрерывно убывают от орбиты Юпитера до наименьшей  $A_1^{min}$ , изображенной на рис. 2.

$$a = 3,52 \text{ а.е.}$$

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

$$q = 2,84 \text{ а.е.}$$

$$e = 0,19.$$

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

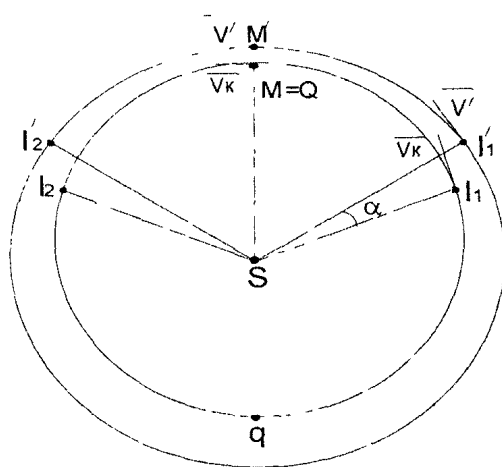


Рис. 2. Наименьшая орбита кометы  $A_1$  в области  $\omega$  ( $e = 0,1927$ )

кометой  $A_1$  точки афелия (момент 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  $t_f$  выполнено равенство

$$M_{ю} = v_k - \alpha_f, \tag{1.6}$$

где  $\alpha_f$  – угол между направлением на комету  $A_1$  и Юпитер в момент времени  $t_f$ .

Из уравнений Кеплера (1.5) с учетом равенства (1.6) определяем угол  $\alpha_f$ :

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

(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  $t_f$  радиус-вектор кометы  $A_1$  находится по формуле

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

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

Таблица 1

Значения угла  $\alpha_f$  в момент времени  $t_f$  как функция эксцентриситета орбиты кометы  $A_1$

| $e_k$ | $\alpha_f$ , град | $v_k$ , град | $E_k$ , град | $r_f$ , а.е. | $\Delta_f^I$ , а.е. | $v_k / v_{ю}$ | $\Delta_f^Q$ , 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  $t_f$ , минимальное йовицентрическое расстояние на афелийной части орбиты (в точке афелия).

Проанализируем изменение каждого элемента табл. 1 по вертикали.

Угол  $\alpha_i$ , 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  $v_K, E_{Ю}, r_I$  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  $\alpha$  мал ( $0,95 \leq \cos \alpha \leq 0,99$ ), на участке траектории  $I_1Q$  изменяем его равномерно.

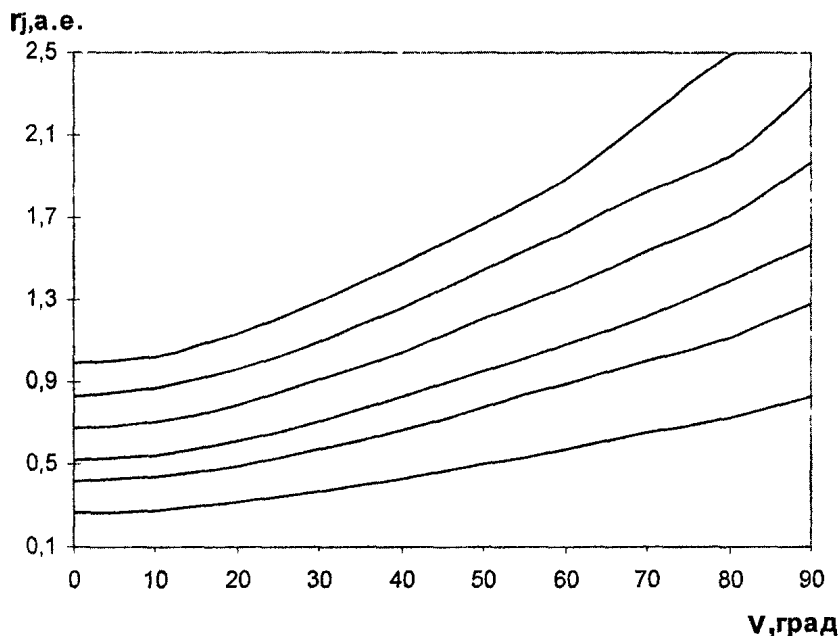


Рис. 3. Графики изменения йовицентрического расстояния кометы  $A_1$  на афелийной части орбиты

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  $\rho$ , 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

$$e_k = \frac{a_k - a_{ю}}{a_{ю} + a_k} \quad (2.1)$$

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

$$q_k = r_M = \frac{2a_k a_{ю}}{a_k + a_{ю}}, \quad (2.2)$$

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  $a_{ю}$ :

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

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  $\omega$  размеры орбиты кометы  $P_1$  непрерывно возрастают от орбиты Юпитера до наибольшей  $P_1^{max}$ , изображенной на рис. 4:

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

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

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

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

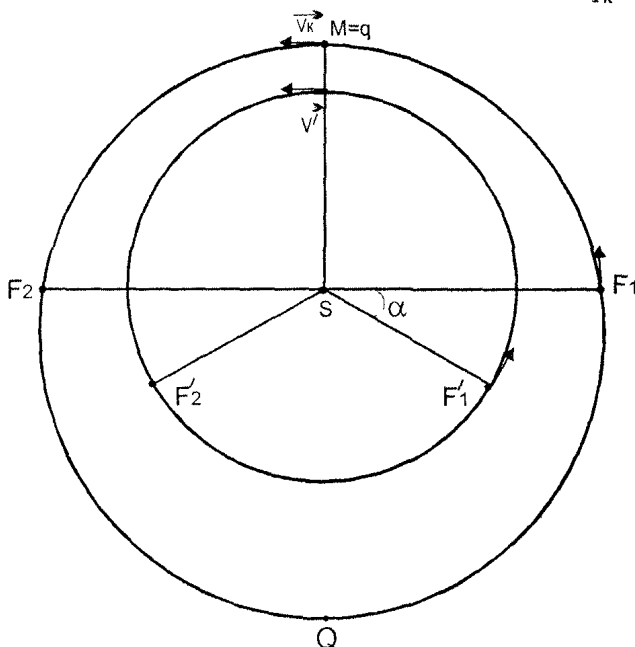


Рис. 4. Наибольшая орбита кометы  $P_1$  в области  $\omega$  ( $e = 0,1925$ )

где  $t_F$  – момент прохождения кометы 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

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

где  $\alpha_F$  – 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  $\alpha_F$ :

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

(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  $\alpha_F$  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  $\alpha_F$  между направлением на эти объекты, соответствующим табличному значению, назовем начальными условиями низкоскоростного касательного сближения кометы  $P_1$ .

Таблица 2

Значения угла  $\alpha_F$  в момент времени  $t_F$  как функция эксцентриситета орбиты кометы  $P_1$

| $e_k$ | $\alpha_F$ , град | $E_k$ , град | $r_F$ , а.е. | $\Delta_J^F$ , а.е. | $v_k/v_{Ю}$ | $\Delta_J^q$ , 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  $\Delta_J^F$  в точке  $F$ , отношение модулей гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера в момент времени  $t_F$ ; минимальное ювицентрическое расстояние до Юпитера на перигелийной части орбиты (в точке перигелия)

Проанализируем изменение каждого элемента табл. 2 по вертикали.

Угол  $\alpha_F$ , величины  $r_k, \Delta_J^F, \Delta_J^q$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  на участке орбиты  $F_1qF_2$  функция йовицентрического расстояния кометы  $P_1$  (величина  $\Delta_j$ ) имеет единственный экстремум-минимум, который достигается в точке перигелия.

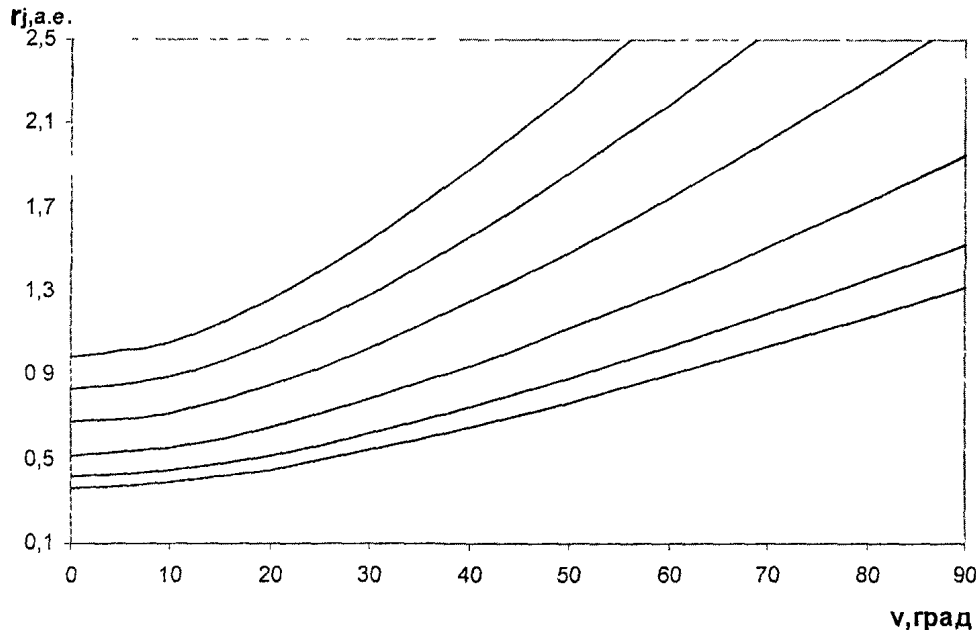


Рис. 5. Графики изменения йовицентрического расстояния кометы  $P_1$  на перигелийной части орбиты

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):

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

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

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

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  $C$ .

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  $\omega$  длительность сближения обеспечивается большой длиной дуги орбиты, принадлежащей области сближения (см. рис. 3, 4).

2. Функция йовицентрического расстояния кометы  $P_1$  имеет единственный минимум  $\rho$ , 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  $T_\rho$  (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  $[T_M, T_\rho]$ . Высокая эффективность сближения реальной кометы обеспечивается не только величиной  $\rho$ , 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  $\Delta_j^M$ ,  $\rho$  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  $T_\rho$  и нарушение условия ВСЗ в окрестности точки  $C$ . С другой стороны, гравитационный захват при некоторых дополнительных условиях, наложенных, например, на величину  $\rho$ , 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 SAMMAC. – 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.