

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТ КОМЕТ С ФИКСИРОВАННЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ АПСИДАЛЬНЫХ ТОЧЕК

Н.Ю. Емельяненко

В работе исследуется кинематика касательного сближения малого тела с Юпитером. Предлагаются две модели комет с фиксированным положением апсидальных точек. Рассматривается возможность, и определяются условия низкоскоростного сближения этих комет с Юпитером. Анализируются особенности сближений модельных комет.

Введение

Рассмотрим апсидальные низкоскоростные сближения кометы и Юпитера с фиксированным положением апсидальных точек. Пусть апсидальные точки удалены от орбиты Юпитера на 1 а.е. и находятся за пределами (линия OA_4) или внутри орбиты Юпитера (линия OP_4). Одна астрономическая единица (1 а.е.) - это радиус сферы сближения в большинстве работ, в которых изучаются прохождения комет вблизи планет-гигантов. Итак в работе рассматриваются кометы, орбиты которых удовлетворяют условию:

$$Q - a' = 1 \cup a' - q = 1. \quad (1)$$

Нанесём изучаемые орбиты на плоскость (a, e) , на которой ранее построена и изучена область комет ω [1-3]. Назовем область с верхней границей A_4OP_4 расширенной областью комет с особенностями в сближениях с Юпитером (ω_{EX}). На плоскости (a, e) эти орбиты образуют ломаную линию A_4OP_4 (рис. 1). Точки Q, X, q, b, I, F - опорные для комет с линии A_4OP_4 . Точки M и R - особые.

Более подробное описание обозначений можно найти в работе [4].

В точках низкоскоростного касания орбит M и M' выполнены условия:

$$\vec{V} \parallel \vec{V}', \quad (2)$$

$$V = V'. \quad (3)$$

Основные задачи исследования. В работе изучаются модельные кометы, орбиты которых расположены на ломаной линии A_4OP_4 области ω_{EX} .

1. Рассматривается эволюция орбит при продвижении вдоль линии A_4OP_4 (изменение элементов, характеризующих размеры и форму орбиты).

2. Оценивается возможность, и определяются условия синхронного движения Юпитера и кометы на периоде обращения вокруг Солнца, отмеченном апсидальным минимумом.

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

В предлагаемых кинематических моделях низкоскоростных сближений предполагается, что при прохождении афелия (перигелия) комета $A_4(P_4)$ и Юпитер находятся на одном радиус-векторе.

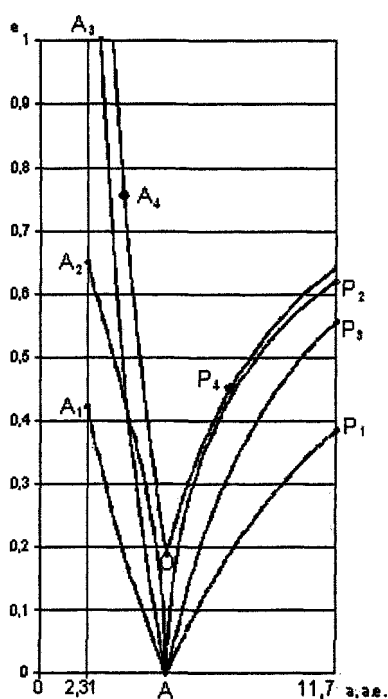


Рис. 1. Область комет с особенностями в сближениях

1. Модель A4 (невозмущенная орбита до и после сближения)

Это кометы, орбиты которых удовлетворяют условию:

$$\dot{a} = \frac{a'+1}{a} - 1, \quad 3,52 \leq a \leq 5,20 \text{ а.е.} \quad (1.1)$$

Они расположены на верхней левой границе области ω_{EX} , линии OA_4 . В дальнейшем изложении все эти кометы называются кометой A_4 . Для кометы A_4 выполнено равенство:

$$Sb \leq r_M < SI, \quad (1.2)$$

то есть на орбите этой кометы имеются две точки низкоскоростного касания орбит M_1 и M_2 , расположенные между малой центральной (b_1b_2) и фокальной (I_1I_2) хордами (рис. 2).

Рассмотрим изменения размеров и формы орбит кометы A_4 при продвижении вдоль линии OA_4 области ω_{EX} . Точки O и A_4 на плоскости (a, e) имеют координаты: $O (a = 5,20 \text{ а.е.}, e = 0,19)$; $A_4 (a = 3,52 \text{ а.е.}, e = 0,76)$.

Выразим элементы a, Q, q орбиты кометы A_4 через её эксцентриситет e и большую полуось орбиты Юпитера a' :

$$\begin{aligned} a &= \frac{a'+1}{1+e}, \\ Q &= a'+1, \\ q &= \frac{1-e}{1+e}(a'+1). \end{aligned} \quad (1.3)$$

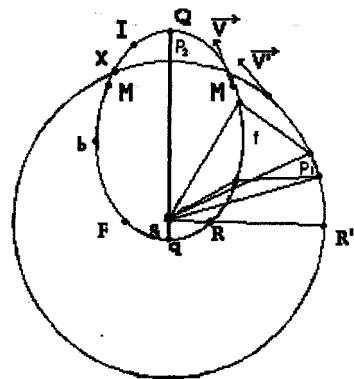


Рис. 2. Наименьшая орбита кометы A_4

Исследование функций $a = a(e), q = q(e)$ на экстремум показало, что при продвижении вдоль линии OA_4 области ω_{EX} они непрерывно убывают. Приведем элементы орбит наибольшей (точка O) и наименьшей (точка A_4) орбит кометы A_4 :

$$\begin{aligned} A_4^{\max}: \quad & a = 5,20 \text{ а.е.}, \\ & Q = 6,20 \text{ а.е.}, \\ & q = 4,20 \text{ а.е.}, \\ & e = 0,19. \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} A_4^{\min}: \quad & a = 3,52 \text{ а.е.}, \\ & Q = 3,20 \text{ а.е.}, \\ & q = 0,85 \text{ а.е.}, \\ & e = 0,76. \end{aligned} \quad (1.5)$$

На орбитах кометы A_4 всегда имеются точки пересечения орбит кометы и Юпитера - опорные точки X_1 и X_2 . Точки низкоскоростного касания орбит M_1 и M_2 всегда расположены внутри орбиты Юпитера. В момент времени t_Q комета и Юпитер находятся на одном радиус-векторе. Так как на дуге $\cup M_1QM_2$ модули гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера связаны неравенством $V < V'$, а на дуге $\cup M_2qM_1$ - неравенством $V > V'$, на орбите комет A_4 всегда имеются особые точки R_1 и R_2 , при прохождении которых комета и Юпитер еще дважды оказываются на одном радиус-векторе.

На рис. 2 изображена орбита A_4^{\min} - это наименьшая орбита с линии OA_4 . Все опорные точки нанесены только на левую часть рисунка. Особая точка R показана на правой его части. Там же приведены кратные минимумы (КМ), подробно рассмотренные в третьей части этой работы.

A_4 - единственная модельная комета из предложенных в наших работах, орбита которой пересекает орбиту Земли (при $e \geq 0,72$).

2. Модель P₄ (невозмущенная орбита до и после сближения).

Это кометы, орбиты которых удовлетворяют условию:

$$e = 1 - \frac{a' - 1}{a}, \quad 5,20 \leq a \leq 7,68 \text{ а.е.} \quad (2.1)$$

Они расположены на верхней правой границе области ω_{EX} , линии OP_4 . В дальнейшем изложении все эти кометы называются кометой P₄. Для кометы P₄ выполнено равенство:

$$SF < r_M \leq Sb, \quad (2.2)$$

то есть на орбите этой кометы имеются две точки низкоскоростного касания орбит M₁ и M₂, расположенные между малой центральной (b₁b₂) и фокальной (F₁F₂) хордами (рис. 3).

Рассмотрим изменения размеров и формы орбит кометы P₄ при продвижении вдоль линии OP_4 области ω_{EX} . Точки O и P₄ на плоскости (a, e) имеют координаты:

$$O (a = 5,20 \text{ а.е.}, e = 0,19), P_4 (a = 7,68 \text{ а.е.}, e = 0,45).$$

Выразим элементы a, Q, q орбиты кометы через эксцентриситет e и большую полуось орбиты Юпитера a':

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1+e}{1-e} (a' - 1), \\ a &= \frac{a' - 1}{1 - e}, \\ q &= a' - 1. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Исследование функций $a = a(e)$, $Q = Q(e)$ на экстремум показало, что при продвижении вдоль линии

OP_4 области ω_{EX} они непрерывно возрастают. Приведем элементы орбит наименьшей (точка O) и наибольшей (точка P₄) орбит кометы P₄.

$$P_4^{\min} : \begin{aligned} a &= 5,20 \text{ а.е.}, \\ Q &= 6,20 \text{ а.е.}, \\ q &= 4,20 \text{ а.е.}, \\ e &= 0,19. \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$P_4^{\max} : \begin{aligned} a &= 7,68 \text{ а.е.}, \\ Q &= 11,16 \text{ а.е.}, \\ q &= 4,20 \text{ а.е.}, \\ e &= 0,45. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Особая точка M на орбите кометы P₄^{min} совпадает с точками b и X; на остальных орбитах линии OP_4 она расположена между точками b и F. На периоде обращения, отмеченном перигелийным минимумом, комета и Юпитер три раза оказываются на одном радиус-векторе. Орбита P₄^{min} совпадает с орбитой A₄^{max}, но рассматриваются разные модельные сближения: перигелийное у кометы P₄ и афелийное у кометы A₄.

На рис. 3 изображена орбита P₄^{max}. Размещение всех опорных и особых точек совпадает с их размещением на орбите A₄^{min}.

3. Особенности апсидальных сближений комет A₄ и P₄

Начальные условия низкоскоростного сближения (НУ). Найдем условия, необходимые для длительного низкоскоростного сближения кометы A₄(P₄) и Юпитера. Рассмотрим синхронные движения Юпитера и кометы A₄(P₄) на периоде ее обращения вокруг Солнца, отмеченном афелийным (перигелийным) минимумом (см. рис. 1, 2). В рамках решаемой задачи комета A₄(P₄) и

Юпитер движутся по законам Кеплера. Ввиду симметрии движения тел относительно линии апсид опишем движение кометы на дуге $\cup Qq$.

Решения уравнения Кеплера были найдены аналитически в опорных точках и точке М. В табл. 1, 2 приводятся: α – угол между направлениями на комету и Юпитер ($\alpha = v - v'$); r_j – йовицентрическое расстояние кометы; V/V' – отношение модулей гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера в опорных, особых точках, а также в точках минимумов величины r_j . Точки, попадающие в область сближения, отделены жирной ломаной линией. Число таких точек, зависит от эксцентриситета кометной орбиты e .

Согласно табл. 1, 2, в момент времени t_m угол между направлениями на комету и Юпитер равен α_m . Пусть \vec{V}_m и \vec{V}'_m – векторы гелиоцентрических скоростей кометы и Юпитера, соответствующие углу α_m , β – угол между направлениями на комету, находящуюся в точке М, и Юпитер, находящийся в точке К, такой, что выполняется равенство (1).

Угол β для комет A_4 и P_4 находился аналитически, а затем табулировался. Сравнение углов α_m и β показывает, что они всегда имеют одинаковый знак и для кометы $A_4(P_4)$ при $0,25 \leq e \leq 0,59$ ($0,27 \leq e \leq 0,45$) отличаются не более чем на 7° . По мере продвижения вдоль линии орбит OA_4 к точке A_4 расхождения $\Delta = \alpha_m - \beta$ увеличиваются и в точке A_4 $\Delta_{\max} = 14^\circ,8$; в точке О $\Delta_{\max} = 11^\circ,2$.

Итак, в момент времени t_m выполнено равенство (2), а равенство (1) выполнено приблизительно, что позволяет говорить о наличии низкоскоростных касательных участков на орбитах комет A_4 и P_4 в окрестностях точек M_1 и M_2 .

Апсидальные сближения комет A_4 и P_4 – это длительные низкоскоростные сближения, так как они охватывают несколько опорных точек орбит.

Положения кометы A_4 и Юпитера с углом α_q ($e \leq 0,27$), α_r ($0,28 \leq e \leq 0,43$), между направлениями на эти объекты, соответствующим табличному значению, назовем начальными условиями низкоскоростного касательного сближения кометы A_4 . При $0,44 \leq e \leq 0,76$ точки M_1 и M_2 не принадлежат области афелийного сближения [5]. Сближения этих комет не будут низкоскоростными.

Положения кометы P_4 и Юпитера с углом α_q ($e \leq 0,23$), α_r ($0,24 \leq e \leq 0,35$), α_b ($0,36 \leq e \leq 0,40$), α_m ($0,41 \leq e \leq 0,45$) между направлениями на эти объекты, соответствующим табличному значению, назовем начальными условиями низкоскоростного касательного сближения кометы P_4 .

Заметим, что точки низкоскоростного касания орбит M_1 и M_2 принадлежат области сближения кометы P_4 для всех эксцентриситетов табл. 2.

Кратные минимумы (КМ). В работе Емельяненко [4] было показано, что йовицентрическое расстояние кометы в рамках парной задачи двух тел может быть вычислено по формуле:

$$r_j^2 = |a' - r|^2 + 4ra' \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (3.2)$$

Качественный анализ уравнения (3.2) не исключает КМ для комет A_4 и P_4 . Минимумы возможны в точках $Q(q)$ и $R(\alpha = 0)$, в точке $X(r = a')$.

Исследование функции r_j на экстремум проводилось в два этапа. Сначала в опорных точках и точке М величина r_j вычислялась по аналитическим формулам (см. табл. 1, 2). Анализ значений r_j^k показал следующее. Для всех орбит кометы $A_4(P_4)$ функция йовицентрического расстояния имеет глобальный минимум в точке $Q(q)$. Затем она возрастает до значения r_j^m . После прохождения точки М величина r_j продолжает возрастать у кометы A_4 при $e_p \geq 0,48$ (у кометы P_4 при $e_p \geq 0,43$) сначала медленно, а затем (после прохождения точки F(1)) очень быстро. При $e < e_p$ выполнено неравенство $r_j^m > r_j^b$. Первый этап исследования показал, что сближения кометы модели $A_4(P_4)$ и Юпитера могут сопровождаться вторичными минимумами.

Таблица 1

Значения углов α в опорных точках как функции эксцентриситета орбиты кометы модели A_4

e	Γ_j^Q	V^Q/V'	α_1	Γ_j^1	V^1/V'	α_2	Γ_j^x	V^x/V'	α_3	Γ_j^2	V^2/V'	α_4	Γ_j^M	V^M/V'	β	α_M	Γ_j^M	α_5	Γ_j^b	V^b/V'	α_6	Γ_j^b	V^b/V'	α_7	Γ_j^F	V^F/V'	α_8	Γ_j^F	V^F/V'	α_9	Γ_j^P	V^P/V'	α_{10}	Γ_j^R	V^R/V'	α_{11}	Γ_j^Q		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29											
0,19	1	0,82	-21,5	1,99	0,96	-22,1	2,00	1,00	79	-	-	-	-10,9	-22,1	2,00	79	-22,1	2,00	1,00	-21,9	1,95	1,04	-0,73	1,03	170	175	1,09	1,04											
0,24	1	0,80	-21,3	1,94	0,96	-21,6	1,95	0,98	67	-	-	-	-13,8	-21,7	1,95	72	-21,7	1,93	1,02	-20,5	1,83	1,08	-6,81	1,25	130	150	1,30	1,61											
0,27	1	0,78	-21,4	1,94	0,96	-21,5	1,94	0,97	61	-	-	-	-15,6	-21,7	1,94	68	-21,6	1,92	1,03	-19,6	1,79	1,11	-7,67	1,36	120	139	1,44	2,04											
e	Γ_j^Q	V^Q/V'	α_1	Γ_j^1	V^1/V'	α_2	Γ_j^x	V^x/V'	α_3	Γ_j^2	V^2/V'	α_4	Γ_j^M	V^M/V'	β	α_M	Γ_j^M	α_5	Γ_j^b	V^b/V'	α_6	Γ_j^b	V^b/V'	α_7	Γ_j^F	V^F/V'	α_8	Γ_j^F	V^F/V'	α_9	Γ_j^P	V^P/V'	α_{10}	Γ_j^R	V^R/V'	α_{11}	Γ_j^Q		
0,28	1	0,78	-21,4	1,94	0,96	-21,5	1,94	0,96	60	21,5	1,94	60	-16,1	-21,8	1,94	67	-21,6	1,91	1,04	-19,4	1,78	1,12	-6,83	1,39	120	136	1,49	2,18											
e	Γ_j^Q	V^Q/V'	α_1	Γ_j^x	V^x/V'	α_2	Γ_j^1	V^1/V'	α_3	Γ_j^2	V^2/V'	α_4	Γ_j^M	V^M/V'	B	α_M	Γ_j^M	α_5	Γ_j^b	V^b/V'	α_6	Γ_j^b	V^b/V'	α_7	Γ_j^F	V^F/V'	α_8	Γ_j^F	V^F/V'	α_9	Γ_j^P	V^P/V'	α_{10}	Γ_j^R	V^R/V'	α_{11}	Γ_j^Q		
0,30	1	0,77	-21,5	1,94	0,95	-21,5	1,94	0,95	57	21,7	1,94	60	-17,3	-21,9	1,95	65	-21,6	1,92	1,04	-18,8	1,77	1,14	-9,72	1,48	110	132	1,58	2,45											
0,31	1	0,76	-21,5	1,94	0,95	-21,6	1,94	0,95	55	-	-	-	-17,9	-22,0	1,95	64	-21,6	1,92	1,05	-18,5	1,77	1,15	-9,09	1,51	110	129	1,63	2,57											
e	Γ_j^Q	V^Q/V'	α_1	Γ_j^x	V^x/V'	α_2	Γ_j^1	V^1/V'	α_3	Γ_j^2	V^2/V'	α_4	Γ_j^M	V^M/V'	α_5	Γ_j^b	V^b/V'	α_6	Γ_j^b	V^b/V'	α_7	Γ_j^F	V^F/V'	α_8	Γ_j^F	V^F/V'	α_9	Γ_j^P	V^P/V'	α_{10}	Γ_j^R	V^R/V'	α_{11}	Γ_j^Q					
0,39	1	0,72	-21,9	1,98	0,91	-22,2	1,99	0,93	46	-22,0	-22,9	2,02	-22,6	2,00	1,08	57	18,7	1,88	80	-16,1	1,88	1,26	-10,2	1,83	100	117	1,99	3,45											
0,41	1	0,70	-22,1	1,99	0,90	-22,4	2,01	0,92	44	-23,2	-23,2	2,05	-23,8	2,03	1,09	55	18,3	1,92	80	-15,4	1,94	1,29	-9,28	1,91	100	115	2,09	3,62											
e	Γ_j^Q	V^Q/V'	α_1	Γ_j^x	V^x/V'	α_2	Γ_j^1	V^1/V'	α_3	Γ_j^2	V^2/V'	α_4	Γ_j^M	V^M/V'	β	α_M	Γ_j^M	α_5	Γ_j^b	V^b/V'	α_6	Γ_j^b	V^b/V'	α_7	Γ_j^F	V^F/V'	α_8	Γ_j^F	V^F/V'	α_9	Γ_j^P	V^P/V'	α_{10}	Γ_j^R	V^R/V'	α_{11}	Γ_j^Q		
0,43	1	0,69	-22,3	2,01	0,90	-22,6	2,03	0,91	42	-25,0	-23,6	2,08	54	23,1	2,06	60	-22,7	2,06	1,10	-17,9	1,96	80,0	-14,8	2,00	1,32	113	2,18	3,79											
0,46	1	0,67	-22,6	2,04	0,88	-22,9	2,05	0,89	39	-26,8	-24,1	2,13	52	-	-	-	-23,3	2,12	1,11	-17,3	2,04	80,0	-13,9	2,11	1,37	110	2,32	4,01											
0,47	1	0,67	-22,7	2,04	0,88	-23,0	2,06	0,89	38	-27,4	-24,3	2,15	51	-	-	-	-23,4	2,14	1,11	-20,6	2,06	70,0	-13,6	2,15	1,39	110	2,36	4,08											
0,48	1	0,66	-22,8	2,04	0,89	-23,2	2,07	0,90	38	-28,1	-24,6	2,17	51	-	-	-	-23,6	2,18	1,11	-20,5	2,09	70,0	-13,2	2,19	1,41	109	2,41	4,15											
0,54	1	0,62	-23,5	2,12	0,84	-23,5	2,12	0,84	33	-31,9	-26,0	2,28	46	-	-	-	-25,1	2,31	1,14	-19,7	2,24	70,0	-11,3	2,47	1,53	105	2,70	4,49											
e	Γ_j^Q	V^Q/V'	α_1	Γ_j^1	V^1/V'	α_2	Γ_j^x	V^x/V'	α_3	Γ_j^2	V^2/V'	α_4	Γ_j^M	V^M/V'	α_5	Γ_j^b	V^b/V'	α_6	Γ_j^b	V^b/V'	α_7	Γ_j^F	V^F/V'	α_8	Γ_j^F	V^F/V'	α_9	Γ_j^P	V^P/V'	α_{10}	Γ_j^R	V^R/V'	α_{11}	Γ_j^Q					
0,59	1	0,59	-23,8	2,15	0,80	-24,2	2,18	0,82	30	-35,3	-27,4	2,40	43	-	-	-	-26,5	2,44	1,15	-23,7	2,39	60,0	-9,62	2,73	1,66	102	2,94	4,70											
0,60	1	0,58	-23,8	2,16	0,79	-24,4	2,20	0,81	29	-36,0	-27,7	2,42	43	-	-	-	-26,9	2,47	1,16	-23,6	2,42	60,0	-9,28	2,78	1,69	101	2,98	4,74											
0,61	1	0,57	-23,8	2,17	0,79	-24,5	2,21	0,81	29	-36,7	-28,0	2,45	42	-	-	-	-27,2	2,50	1,16	-23,5	2,45	60,0	-8,94	2,84	1,72	101	3,03	4,78											
0,62	1	0,56	-23,8	2,17	0,78	-24,7	2,22	0,80	28	-37,5	-28,3	2,47	41	-	-	-	-27,6	2,53	1,17	-23,4	2,48	60,0	-8,60	2,89	1,75	100	3,08	4,81											
0,66	1	0,53	-23,8	2,18	0,74	-25,4	2,28	0,78	26	-40,4	-29,6	2,58	39	-	-	-	-29,1	2,66	1,18	-23,1	2,62	60,0	-7,20	3,12	1,88	98,3	3,28	4,93											
0,67	1	0,53	-23,7	2,18	0,73	-25,5	2,30	0,77	25	-41,2	-30,0	2,61	38	-	-	-	-25,5	2,45	1,18	-24,6	2,45	50,0	-6,84	3,18	1,92	97,9	3,33	4,95											
e	Γ_j^Q	V^Q/V'	α_1	Γ_j^1	V^1/V'	α_2	Γ_j^x	V^x/V'	α_3	Γ_j^2	V^2/V'	α_4	Γ_j^M	V^M/V'	β	α_M	Γ_j^M	α_5	Γ_j^b	V^b/V'	α_6	Γ_j^b	V^b/V'	α_7	Γ_j^F	V^F/V'	α_8	Γ_j^F	V^F/V'	α_9	Γ_j^P	V^P/V'	α_{10}	Γ_j^R	V^R/V'	α_{11}	Γ_j^Q		
0,76	1	0,45	-22,8	2,16	0,63	-27,4	2,46	0,72	20	-48,5	-33,7	2,89	32	-33,9	3,01	1,22	-28,1	2,97	50,0	-3,53	3,72	2,35	93,8	3,79	5,12														

Таблица 2

Значения угла α в опорных точках как функция эксцентриситета орбиты кометы модели P₄

e	Γ_j^q	V^q/V'	α_F	Γ_j^F	V^F/V'	α_x	Γ_j^x	V^x/V'	v_x	β	α_M	Γ_j^M	v_M	α_b	Γ_j^b	V^b/V'	α_t	Γ_j^t	V^t/V'	α_{p_2}	$\Gamma_j^{p_2}$	v_{p_2}	v_R	Γ_j^R	Γ_j^0	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	14	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
0,19	1	1,21	21,9	1,94	1,04	22,1	2,00	1,00	102	11,0	22,2	2,00	101	22,3	2,00	0,99	21,6	1,99	0,97	0,62	1,02	176	175	1,07	0,98	
0,23	1	1,23	21,4	1,92	1,03	21,4	1,93	1,02	92	13,2	21,2	1,94	97	20,7	1,94	0,98	18,7	1,86	0,93	6,61	1,26	140	153	1,30	2,05	
e	Γ_j^q	V^q/V'	α_x	Γ_j^x	V^x/V'	α_F	Γ_j^F	V^F/V'	v_x	β	α_M	Γ_j^M	v_M	α_b	Γ_j^b	V^b/V'	α_t	Γ_j^t	V^t/V'	α_{p_2}	$\Gamma_j^{p_2}$	v_{p_2}	v_R	Γ_j^R	Γ_j^0	
0,24	1	1,24	21,2	1,92	1,03	21,2	1,92	1,03	90	13,8	20,0	1,93	97	20,3	1,92	0,97	17,8	1,82	0,92	4,98	1,28	140	149	1,36	2,44	
e	Γ_j^q	V^q/V'	α_x	Γ_j^x	V^x/V'	α_F	Γ_j^F	V^F/V'	v_x	β	α_M	Γ_j^M	v_M	α_b	Γ_j^b	V^b/V'	α_t	Γ_j^t	V^t/V'	α_{p_2}	$\Gamma_j^{p_2}$	v_{p_2}	v_R	Γ_j^R	Γ_j^0	
0,32	1	1,28	20,5	1,85	1,08	20,1	1,91	1,02	78	18,0	19,7	1,91	93	15,9	1,85	0,92	10,0	1,74	120	7,28	1,78	0,83	132	1,86	6,53	
0,34	1	1,29	20,4	1,84	1,09	19,8	1,92	1,02	76	19,0	19,4	1,92	93	14,4	1,85	0,90	8,19	1,79	120	3,57	1,94	0,80	130	2,02	7,79	
0,35	1	1,29	20,4	1,84	1,09	19,7	1,92	1,01	75	19,6	19,3	1,92	93	13,6	1,86	0,90	7,23	1,84	120	1,52	2,06	0,79	130	2,10	8,45	
e	Γ_j^q	V^q/V'	α_x	Γ_j^x	V^x/V'	α_F	Γ_j^F	V^F/V'	v_x	β	α_M	Γ_j^M	v_M	α_{p_2}	$\Gamma_j^{p_2}$	v_{p_2}	α_b	Γ_j^b	V^b/V'	v_R	Γ_j^R	α_t	Γ_j^t	V^t/V'	Γ_j^0	
0,36	1	1,30	20,3	1,74	1,10	19,6	1,97	1,01	74	20,1	19,2	1,93	92	16,6	1,86	100	12,7	1,88	0,89	129	2,17	-0,7	2,22	0,78	9,12	
0,40	1	1,32	20,2	1,83	1,12	19,0	1,95	1,01	71	22,1	18,6	1,96	92	15,0	1,87	100	8,78	2,02	0,86	122	2,29	-11,0	3,18	0,73	12,0	
e	Γ_j^q	V^q/V'	α_x	Γ_j^x	V^x/V'	v_x	v_{p_2}	α_{p_2}	$\Gamma_j^{p_2}$	α_F	Γ_j^F	V^F/V'	β	α_M	Γ_j^M	v_M	α_{p_3}	$\Gamma_j^{p_3}$	v_{p_3}	α_b	Γ_j^b	V^b/V'	v_R	Γ_j^R	Γ_j^0	
0,42	1	1,32	20,2	1,83	1,13	69	70	20,2	1,83	18,8	1,97	1,01	23,1	18,3	1,98	92	14,1	1,83	100	6,45	2,16	0,85	120	2,38	3,88	13,4
0,45	1	1,33	20,2	1,82	1,12	68	70	20,0	1,82	18,4	2,01	0,98	24,6	17,8	2,02	92	12,8	1,92	100	2,43	2,45	0,79	118	2,56	5,23	15,4

Так как эти минимумы вызваны не гравитацией Юпитера, а специфическими размерами и формой кометных орбит, так же как и для кометы $A_2(P_2)$ [6], это – геометрические кратные минимумы (ГКМ) [1, 7].

Для уточнения положения ГКМ на втором этапе работы линейной интерполяцией между всеми опорными точками и точкой M через 10° по истинной аномалии u кометы $A_4(P_4)$ были вычислены значения величин r_j , α и V/V' . Анализ результатов подтвердил наличие ГКМ у кометы $A_4(P_4)$ при всех значениях их эксцентриситетов. У кометы P_4 по крайней мере еще один минимум попадает в область сближения [5]. То есть, у этой модели в области ω_{EX} всегда есть ГКМ. Сначала ρ_2 находится вблизи точки R , затем он плавно смещается к точке X , а в окрестности точки R появляется третий минимум (см. табл. 2). У кометы A_4 при $e \geq 0,46$ ГКМ не принадлежат области сближения. Вторичный минимум кометы A_4 расположен в окрестности точки R при $e \leq 0,42$; между точками b и F ($0,43 \leq e \leq 0,76$). При $0,28 \leq e \leq 0,30$ имеется очень слабый минимум в окрестности точки X . При $0,39 \leq e \leq 0,45$ опять появляется дополнительный слабый минимум. Он непрерывно смещается от точки F к точке M и не фиксируется при $e > 0,46$ (см. табл. 1).

Количественный анализ подтвердил наличие вторичных минимумов у кометы $A_4(P_4)$ в окрестности точки R . В окрестности точки X вторичный минимум обнаружен у кометы P_4 при всех значениях величины e . У кометы A_4 очень слабый минимум периодически появляется в окрестностях точек X , F , M .

Временный спутниковый захват (ВСЗ). Как уже было сказано ранее, у кометы $A_4(P_4)$ в окрестностях особых точек M_1 и M_2 выполнено условие (2) и приблизительно выполнено условие (1). Поэтому окрестности этих точек благоприятны для возникновения ВСЗ. У модельных комет оно возникает и за пределами области сближения (при $e > 0,46$), так как разность углов $\alpha_m - \beta \leq 11^\circ$ для $0,19 \leq e \leq 0,67$ (комета A_4); для $0,19 \leq e \leq 0,52$ (комета P_4). Окрестности апсидальных точек неблагоприятны для возникновения ВСЗ. В точке Q кометы A_4 (точке q кометы P_4) выполнено условие (1), но условие (2) сильно нарушается. Явление ВСЗ никогда не перейдет в ВГЗ (временный гравитационный захват), так как йовицентрическое расстояние комет в течение всего сближения слишком велико (см. значения r_j^Q , r_j^q , r_j^M в табл. 1, 2). Йовицентрические траектории представляют собой замысловатые петли, вызванные изменением гелиоцентрической скорости (комета то догоняет Юпитер, то отстает от него). У кометы $A_4(P_4)$ при $e \leq 0,45$ кратные минимумы функции йовицентрического расстояния, не связанные с обращением кометы вокруг Юпитера принадлежат области апсидального сближения [6].

Заключение

Итак, сближения комет A_4 , P_4 и Юпитера, удовлетворяющие начальным условиям, рассмотренным выше, – это низкоскоростные сближения. Особенности сближений:

1. Сближения комет A_4 и P_4 могут быть длительными. Для кометы A_4 сближение охватывает весь период ее обращения вокруг Солнца ($e \leq 0,27$); распространяется на дугу $\cup F_1 Q F_2$ ($e \leq 0,43$). Для остальных объектов с линии OA_4 комета не покидает области сближения на полу-периоде, включающем афелий. Для кометы P_4 оно охватывает весь период ее обращения вокруг Солнца ($e \leq 0,23$); распространяется на дугу $\cup I_1 q I_2$ ($e \leq 0,40$). Для остальных объектов с линии OP_4 комета не покидает области сближения на дуге $\cup M_1 q M_2$.

2. Функция йовицентрического расстояния комет A_4 и P_4 имеет кратные минимумы. Глобальный минимум достигается в апсидальной точке: $\rho \equiv Q \cap \rho \equiv q$. Вторичные минимумы – это геометрические кратные минимумы. Они имеют место в окрестностях точек пересечения орбит кометы и Юпитера и (или) в окрестностях точек, в которых комета и Юпитер находятся на одном радиус-векторе. ГКМ принадлежат области сближения комет A_4 и P_4 при $e \leq 0,45$.

3. На орбитах комет A_4 и P_4 имеются две точки низкоскоростного касания орбит. Для комет с линии OA_4 точка M принадлежит области сближения при $e \leq 0,37$. Точки M_1 и M_2 – это центры низкоскоростных касательных участков, на которых вероятен временный спутниковый захват в смысле Эверхарта. На участках ВСЗ расположен максимум функции йовицентрического расстояния комет. ВСЗ модельных комет A_4 и P_4 не может перейти во временный гравитационный захват, так как во всех минимумах комета находится слишком далеко от Юпитера. ВСЗ комет A_4

и P_4 не может быть длительным, так как условия (1,2) быстро нарушаются до и после прохождения кометой точки М.

Работа поддержана грантом РФФИ № 06-02-16-512.

Литература

1. Емельяненко Н.Ю. Кинематика низкоскоростных сближений комет с Юпитером. Модели орбит // Всерос. астр. конф. (ВАК-2001). СПбГУ. Тезисы докладов. - 2001. - С. 63.
2. Емельяненко Н.Ю. Короткопериодические кометы с высоким значением постоянной Тиссерана. 3. Кинематика низкоскоростных сближений // *Астрономический вестник*. - 2003. - Т. 37. - Jul. - С. 66-73.
3. Емельяненко Н.Ю. Моделирование орбит комет // *Вестник ЮУрГУ, серия «Математика, физика, химия»*. - 2003. - Вып. 4. - №8(24) - С. 99-106.
4. Емельяненко Н.Ю. Модели комет с неафелийным касанием орбиты Юпитера. Апсидальные точки расположены на орбите Юпитера//*Вестник ЮУрГУ, серия «Математика, физика, химия»*. - 2005. - Вып. 6. - №6(46). - С. 45-52.
5. Емельяненко Н.Ю. Динамика орбит комет при тесном сближении с Юпитером. Анализ длительности сближений // *Астрономический вестник*. - 2003. - Т. 37. - №2. - С. 153-160.
6. Емельяненко Н.Ю. Модели низкоскоростных сближений комет с Юпитером // *Кинематика и физика неб. тел.* - 2003. - № 4. - С. 113-116.
7. Емельяненко Н.Ю. Низкоскоростные сближения наблюдаемых комет с Юпитером // *Всерос. астр. конф. (ВАК-2004)*. МГУ. ГАИШ. Тезисы докладов. - 2004. - С. 226.

Поступила в редакцию 22 мая 2006 г.