

УДК 523.64

В. П. Томанов

Вологодский государственный педагогический университет
160035 Россия, Вологда, ул. Сергея Орлова 6

О связи комет с планетами

Анализируются полученные нами ранее результаты численного интегрирования уравнений движения 274 короткопериодических (период $P < 200$ лет) комет на временном интервале 6000 лет. 54 кометы не имели тесных сближений с планетами, 13 комет проходили через сферу действия Сатурна, одна комета прошла через сферу действия Урана. Для этих 68 комет изменения элементов орбит за 6000 лет не превышают $\pm 3\%$. 206 комет имели тесные сближения с Юпитером. На примере 14 комет подтвержден вывод Эверхарта о захвате Юпитером на короткопериодические орбиты долгопериодических комет, имеющих значения $q = 4-6$ а.е., $i < 9^\circ$. Показано, что почти параболические кометы пронизывают Солнечную систему преимущественно через зону планет земной группы. Связь почти параболических комет с планетами земной группы в эпоху последнего появления комет не обнаружена. Гипотеза Гулиева о двух трансеплутоновых планетах основывается на иллюзорном избытке кометных узлов на больших гелиоцентрических расстояниях. Наличие кометных узлов на периферии Солнечной системы оказывается чисто геометрическим эффектом.

ПРО ЗВ'ЯЗОК КОМЕТ З ПЛАНЕТАМИ, Томанов В. П. — Аналізуються отримані нами раніше результати чисельного інтегрування рівнянь руху 274 короткоперіодичних (період $P < 200$ років) комет на часовому відрізку 6000 р. 54 комети не мали тісних зближень з планетами, 13 комет проходили через сферу дії Сатурна, одна комета пройшла через сферу дії Урана. Для цих 68 комет зміни елементів орбіт за 6000 р. не перевищують $\pm 3\%$. 206 комет мали тісні зближення з Юпітером. На прикладі 14 комет підтверджено висновок Еверхарта про захоплення Юпітером на короткоперіодичні орбіти довгоперіодичних комет, що мають значення $q = 4-6$ а.о., $i < 9^\circ$. Показано, що майже параболичні комети пронизують Сонячну систему переважно через зону планет земної групи. Зв'язку майже параболичних комет з планетами земної групи в епоху останньої появи комет не виявлено. Гіпотеза Гулієва про дві трансеплутонові планети базується на ілюзорному надлишку кометних вузлів на великих геліоцентричних відстанях. Наявність кометних вузлів на периферії Сонячної системи виявляється чисто геометричним ефектом.

ON THE ASSOCIATION OF COMETS AND PLANETS, by Tomanov V. P. — We discuss our results of numerical integration of the equations of motion for 274 short-period comets on a time interval of 6000 years. Among them, 54 comets had no encounter with planets, 13 comets passed through the incidence of Saturn and one comet passed through the incidence of Uranus. For these 68 comets the change of orbital elements for 6000 years does not exceed $\pm 3\%$. The other 206 comets had encounters with Jupiter. On the basis of the investigation of 14 comets, Everhart's conclusion on the entrapment of the long-period comets with $q = 4-6$ AU and $i < 9^\circ$ on short-period orbits by Jupiter is confirmed. It is shown that near-parabolic comets run across the solar system preferentially through the band of terrestrial planets. The association of the near-parabolic comets and the terrestrial planets during the epoch of last occurrence of a comet is not found. Guliev's hypothesis on two transpluto planets is based on illusory surplus of cometary nodes at major heliocentric distances. The presence of cometary nodes on the periphery of the solar system has only geometrical effect.

Связь комет с планетами впервые рассматривал Лагранж [30], полагая, что кометы являются осколками планет. С. К. Всехсвятский [3, 4] считал кометы продуктами вулканической деятельности планет-гигантов или их спутников. Согласно гипотезе Э. М. Дробышевского [8] кометы суть осколки ледяной коры спутников Юпитера и Сатурна.

Во второй половине XIX века, развивая идею Лапласа [31] о межзвездном происхождении комет, Ньютон [35], Тиссеран [41], Шульгоф [36], Калладро [25] заложили основы теории происхождения короткопериодических комет в результате преобразования первоначальной вытянутой орбиты под действием сильных планетных возмущений.

В XX веке проблема захвата комет на короткопериодические орбиты вследствие пертурбационного маневра кометы внутри сферы действия планеты стала одной из доминирующих в кометной космогонии. Число известных нам публикаций по проблеме гравитационного взаимодействия комет с планетами составляет более сотни. Среди них цикл работ Е. И. Казимирчак-Полонской [9], удостоенный премии им. Ф. А. Бредихина. В работе Эверхарта [28] методом Монте-Карло были исследованы миллионы фиктивных комет на больших интервалах времени и показано, что Юпитер захватывает на короткопериодические орбиты кометы с параболических орбит, имеющих перигелийные расстояния 4—6 а. е. и наклоны не более 9° . В работах [[27] и [29] рассматривались многоступенчатые захваты и либрационные движения в окрестности резонансов с большими планетами. В. П. Томанов [19, 20] исследовал захват комет Юпитером методом «склеивания» сфер действия. Захват планетами межзвездных комет рассматривалось также в работах [1, 17, 18, 40].

Тесные сближения короткопериодических комет (КПК) с планетами на основе численного интегрирования уравнений движения комет изучалось в работах [2] — 127 КПК на интервале 200 лет, [26] — 132 КПК на интервале 420 лет, [34] — 160 КПК на интервале 4400 лет, [40] — 163 КПК на интервале 2000 лет, [39] — 145 комет на интервале 200000 лет, [11] — 274 КПК на интервале 6000 лет.

В некоторых гипотезах о происхождении комет предполагается, что местом «рождения» кометы является узел ее орбиты. Действительно, если комета вышла на наблюдаемую гелиоцентрическую орбиту из сферы действия планеты, например вследствие извержения [3, 4] или захвата [31], то один из узлов ее орбиты, «рабочий узел», обязательно будет располагаться около орбиты «родительской» планеты. В работе А. С. Гулиева [5] предпринята попытка предсказать наличие трансеплутоновых планет на основе

статистики узлов долгопериодических комет. Согласно работе В. В. Радзиевского [16] почти параболические кометы (период $P > 200$ лет) вышли из сфер действия двух гипотетических планет, движущихся в галактической плоскости. При этом предполагается, что и узлы, и афелии располагаются около трассы «родительской» планеты. Очевидно, что, находясь на невозмущенной орбите, комета при каждом обращении будет проходить через место своего «рождения».

Для проверки концепции о связи комет с планетами будем использовать каталог [32], содержащий 274 короткопериодические кометы (КПК, период $P < 200$ лет) и 792 почти параболические кометы (ППК, $P > 200$ лет, $q > 0.1$ а. е.). В каталоге приведены элементы орбит: наклон i к эклиптике, долгота Ω восходящего узла, аргумент ω перигелия, перигелийное расстояние q в а. е., эксцентриситет e .

Мы вычислили и дополнительно включили в каталог следующие параметры:

— эклиптические координаты афелия

$$\beta_A = -\arcsin(\sin\omega\sin i),$$

$$\lambda_A = 180 + [\Omega + \arccos(\cos\omega/\cos\beta_A)];$$

— эклиптические координаты полюса

$$\lambda_{\Pi} = \Omega - 90^\circ, \quad \beta_{\Pi} = 90^\circ - i;$$

— постоянную Тиссерана

$$C = \frac{A}{a} + 2\sqrt{\frac{(1+e)q}{A}} \cos i,$$

где A — радиус орбиты возмущающей планеты (для Юпитера $A = 5.2028$ а. е.);

— среднее суточное движение

$$n = \frac{3548.33}{p} \text{ [сд/сут]};$$

— гелиоцентрическое расстояние восходящего R_A и нисходящего R_D узла орбит комет

$$R_a = \frac{q(1+e)}{1+e\cos\omega},$$

$$R_d = \frac{q(1+e)}{1-e\cos\omega}. \quad (1)$$

Проблему связи короткопериодических комет с планетами рассмотрим на основе анализа результатов численного интегрирования уравнений движения КПК. В наших работах [11, 23] приведены результаты численного интегрирования уравнений движения 274 КПК на временном интервале 6000 лет. В работе [23] особое внимание уделено выявлению тесных сближений комет с большими планетами. Сближение считается тесным, если комета приближается к планете на расстояние, меньшее радиуса сферы действия планеты $\rho = A(m_{\text{пл}}/m_{\text{sun}})^{2/5}$, где A — радиус орбиты планеты, $m_{\text{пл}}$, m_{sun} — массы планеты и Солнца.

В работах [11, 23] вычисления орбит проведены с применением интегратора Эверхарта с точностью в 11-м знаке и планетной эфемериды Стэндиша DE 406 на 6000 лет. Несмотря на большие затраты машинного времени, с целью получения максимальной точности интегрирование велось

Таблица 1. Сближения комет с Сатурном

| Комета | r_{\min} а. е. | Дата сближения | Q_1 , а. е. | Q_2 , а. е. | q_1 , а. е. | q_2 , а. е. | n_1 , сд/сут | n_2 , сд/сут | i_1 | i_2 |
|-----------|---------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|-------|
| P/1997 T3 | 0.011 | 08.10.1954 | 20.6 | 9.9 | 9.849 | 4.066 | 59.8 | 193.1 | 10.2° | 5.4° |
| P/1999 V1 | 0.181 | 09.12.1990 | 10.2 | 10.1 | 3.435 | 2.839 | 199.9 | 215.1 | 19.0 | 16.9 |
| P/1998 U3 | 0.018 | 19.07.1991 | 10.2 | 10.0 | 8.610 | 2.045 | 122.7 | 241.1 | 27.0 | 20.3 |

Таблица 2. Кометы, имевшие особо тесные сближения с Юпитером

| Обозначение | P , лет | Q , а. е. | q , а. е. | e | i | R_A , а. е. | R_D , а. е. | λ_A | β_A | C | Дата | r , а. е. |
|--------------|--------------|----------------|----------------|-------|------|------------------|------------------|-------------|-----------|------|-------------|----------------|
| 31P/1929 B1 | 90.0 | 35.3 | 4.826 | 0.759 | 4.9 | 34.7 | 4.5 | 222.2 | -0.5 | 2.80 | 14.01.1547 | 0.022 |
| | 6.4 | 4.8 | 2.090 | 0.395 | 3.7 | 2.1 | 4.8 | 304.8 | 0.1 | 3.00 | | |
| 43P/1924 Y1 | 126.5 | 45.4 | 5.020 | 0.801 | 3.0 | 10.4 | 8.0 | 64.7 | 2.9 | 2.84 | 23.11.1841 | 0.005 |
| | 7.6 | 5.3 | 2.428 | 0.372 | 23.7 | 5.3 | 2.4 | 261.6 | 0.1 | 2.81 | | |
| 51P/1953 P1 | 151.0 | 51.6 | 5.075 | 0.821 | 5.2 | 5.1 | 50.7 | 238.7 | 0.5 | 2.84 | 05.02.-2069 | 0.005 |
| | 7.0 | 5.6 | 1.694 | 0.536 | 11.6 | 4.4 | 1.8 | 176.1 | 7.3 | 2.81 | | |
| 57P/1941 O1 | 110.3 | 40.8 | 5.200 | 0.774 | 7.0 | 35.0 | 5.3 | 140.2 | -2.1 | 2.87 | 21.03.526 | 0.004 |
| | 5.6 | 4.9 | 1.305 | 0.584 | 3.3 | 1.7 | 2.6 | 119.6 | -3.1 | 2.92 | | |
| 74P/1967 EU | 134.0 | 47.2 | 5.213 | 0.801 | 3.7 | 5.4 | 36.7 | 159.5 | 1.4 | 2.88 | 25.12.938 | 0.205 |
| | 8.5 | 4.8 | 3.546 | 0.148 | 6.7 | 4.1 | 4.1 | 348.4 | -6.7 | 3.01 | | |
| 75P/1975 C1 | 142.7 | 49.1 | 5.548 | 0.797 | 1.7 | 7.9 | 13.5 | 332.7 | -1.6 | 2.96 | 22.07.1256 | 0.018 |
| | 6.2 | 5.2 | 1.568 | 0.537 | 5.4 | 5.1 | 1.6 | 263.7 | -0.9 | 2.89 | | |
| 79P/1945 G1 | 59.0 | 25.5 | 4.842 | 0.681 | 6.4 | 7.5 | 8.8 | 198.6 | 6.3 | 2.83 | 03.11.1812 | 0.020 |
| | 5.3 | 4.8 | 1.243 | 0.588 | 6.9 | 4.4 | 1.3 | 20.9 | 2.5 | 2.94 | | |
| 86P/1980 G1 | 141.3 | 48.9 | 5.350 | 0.803 | 2.6 | 33.9 | 5.6 | 239.3 | 1.2 | 2.91 | 24.11.1634 | 0.030 |
| | 6.9 | 4.9 | 2.286 | 0.368 | 15.5 | 4.9 | 2.3 | 72.1 | -0.2 | 2.93 | | |
| 94P/1984 E1 | 119.8 | 42.6 | 6.003 | 0.753 | 8.9 | 14.4 | 8.3 | 359.0 | -8.4 | 3.02 | 31.05.1772 | 0.250 |
| | 6.4 | 4.8 | 2.125 | 0.383 | 6.3 | 2.9 | 2.9 | 343.8 | -6.3 | 3.00 | | |
| 106P/1977 T1 | 88.1 | 34.6 | 4.988 | 0.748 | 15.8 | 25.3 | 5.3 | 111.6 | -7.6 | 2.75 | 01.10.299 | 0.063 |
| | 7.5 | 6.0 | 1.628 | 0.574 | 20.5 | 1.6 | 5.9 | 225.8 | 2.1 | 2.68 | | |
| 131P/1990 R1 | 78.2 | 27.5 | 9.065 | 0.504 | 5.0 | 23.7 | 9.6 | 232.2 | 2.7 | 3.51 | 03.01.1837 | 0.243 |
| | 6.6 | 4.9 | 2.083 | 0.406 | 7.1 | 4.9 | 2.1 | 209.9 | -1.1 | 2.97 | | |
| P/1998 QP54 | 51.5 | 23.4 | 4.293 | 0.689 | 4.1 | 13.1 | 5.0 | 315.0 | -3.2 | 2.73 | 05.08.-182 | 0.033 |
| | 8.6 | 6.5 | 1.882 | 0.552 | 17.7 | 1.9 | 5.6 | 190.8 | -8.8 | 2.67 | | |
| P/2000 Y3 | 68.3 | 28.0 | 5.377 | 0.678 | 8.4 | 20.3 | 5.8 | 160.7 | 4.8 | 2.92 | 21.09.1998 | 0.057 |
| | 11.4 | 6.1 | 4.048 | 0.201 | 2.3 | 4.8 | 4.9 | 263.9 | -2.3 | 2.96 | | |
| P/2001 TU80 | 55.8 | 24.2 | 4.962 | 0.660 | 6.5 | 21.6 | 5.1 | 173.8 | -2.3 | 2.86 | 04.02.-326 | 0.005 |
| | 7.0 | 5.4 | 1.933 | 0.472 | 6.6 | 1.9 | 5.4 | 284.3 | 0.6 | 2.89 | | |

с шагом 1 сут. Результаты [11, 23] хорошо согласуются с результатами работ [34] и [39], где численное интегрирование КПК выполнено на интервале 4400 и 200000 лет соответственно. К примеру, эпоха сближения комет с планетами в [11, 23] отличается от соответствующих данных в [34, 39] не более чем на 2-3 дня.

Тесных сближений не обнаружено у 54 КПК. У большинства из этих комет элементы орбит за 6000 лет претерпели незначительные изменения. С Ураном сближалась одна комета — C/1999 E1 Li.

Три кометы (табл. 1) приближались к Сатурну на расстояние $r < 0.02$ а. е. Элементы орбит этих комет изменялись весьма существенно. В табл. 1 приведены значения Q_1 , Q_2 , q_1 , q_2 , n_1 , n_2 , i_1 , i_2 — до сближения и после сближения с Сатурном. У кометы P/1997 T3 в два раза уменьшилось афелийное расстояние Q , у кометы P/1998 U3 более чем в четыре раза уменьшилось перигелийное расстояние q . У всех комет увеличилось среднее суточное движение n , у всех комет уменьшился наклон i .

206 комет имели тесные сближения с Юпитером. Из них 46 комет на выходе из сферы действия Юпитера получили дополнительную энергию, их большая полуось увеличилась, изменились и другие элементы орбит. Все эти кометы вошли в полусферу действия Юпитера, расположенную внутри орбиты планеты.

В результате пертурбационного маневра кометы внутри сферы действия Юпитера может произойти существенная трансформация кометной орбиты. В табл. 2 приведены основные параметры 14 комет, особенно глубоко проникавших в сферу действия Юпитера: период P , афелийное и перигелийное расстояния Q и q , эксцентриситет e , наклон i , гелиоцентрические расстояния восходящего (R_A) и нисходящего (R_D) узлов, долгота λ_A и широта афелия β_A постоянная Тиссерана, вычисленная по отношению к Юпитеру. В первой строчке даны элементы орбит на эпоху -3000 г., во второй — по каталогу [32]. Некоторые кометы сближались с Юпитером многократно. В последней графе табл. 2 указаны обстоятельства того сближения с Юпитером, которое привело к наиболее существенному изменению орбиты: дата сближения, минимальное расстояние r кометы от Юпитера в а. е. Если в -3000 г. указанные 14 комет имели периоды от 51.5 до 150.0 лет (первая строка для каждой кометы), средний период $\bar{P} = 101$ г., то после захвата кометы оказались на орбитах с периодами от 5.3 до 11.4 лет, $\bar{P} = 7$ лет (вторая строчка для каждой кометы).

Этот результат нам представляется исключительно важным: впервые экспериментально подтвержден критерий Эверхарта [28] о захвате комет Юпитером. Эверхарт методом Монте-Карло исследовал миллионы фиктивных комет на больших интервалах времени и показал, что КПК образуются в результате захвата Юпитером не только из числа долгопериодических, но даже из начальных парабол, если их перигелийные расстояния равны 4—6 а. е., а наклон не более 9° . Модельные кометы в эпоху -3000 г. (табл. 2) имели малые наклоны — среднее значение $\bar{i} = 6^\circ$, а среднее значение перигелийного расстояния составляло $\bar{q} = 5.4$ а. е. Итак, комета имеет шанс быть захваченной в семейство Юпитера, если ее орбита удовлетворяет следующему критерию:

$$i < 9^\circ, \quad q = 4\text{—}6 \text{ а. е.} \quad (2)$$

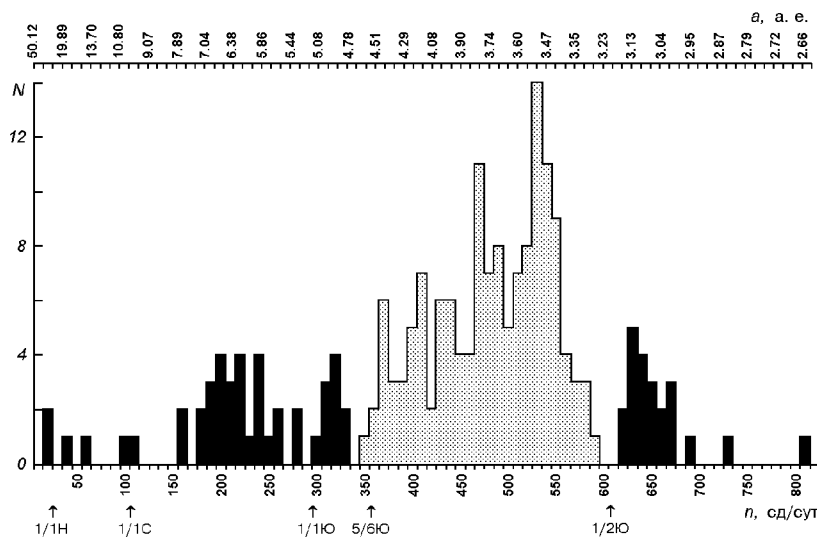


Рис. 1. Распределение короткопериодических комет по среднему суточному движению n

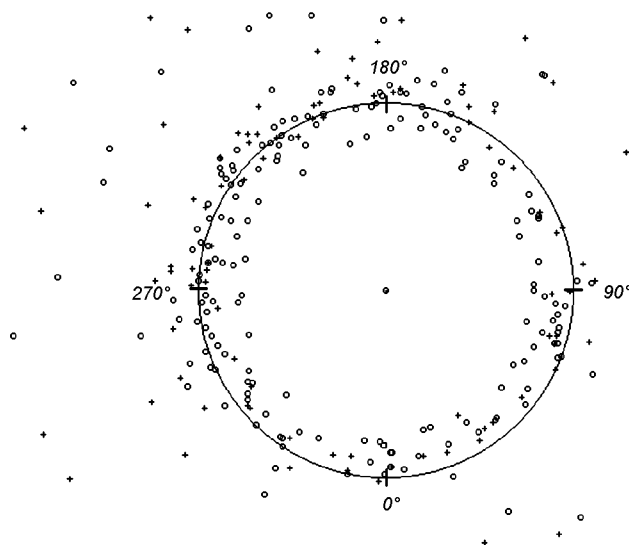


Рис. 2. Распределение узлов и афелиев короткопериодических комет по долготам. Окружность — орбита Юпитера, кружки — узлы, крестики — проекции афелиев на плоскость эклиптики

На рис. 1 дано распределение комет по среднему суточному движению n . Здесь представлены значения n для первого появления. Выделяется группа комет ($N = 147$) отмеченных серым цветом. Сюда вошли кометы с $360 \text{ сд/сут} < n < 610 \text{ сд/сут}$. Данная группа отделена от остальных комет люками. Эту группу комет назовем «семейство» Юпитера. Все эти кометы имели тесные сближения с Юпитером, узлы и афелии их орбит лежат около орбиты Юпитера.

Рассмотрим теперь распределение узлов и афелиев по долготам. На рис. 2 окружность — орбита Юпитера, кружочками изображены узлы, крестиками — проекции афелиев на плоскость эклиптики. Из рисунка наглядно видно, что афелии и узлы концентрируются к орбите Юпитера преимущественно на долготах $150^\circ < \lambda < 330^\circ$. На данном интервале сосредоточено 111 афелиев, на интервале $330^\circ < \lambda < 150^\circ$ расположено только 49 афелиев. На долготах от 150 до 330° расположено 125 узлов, в интервале $330^\circ < \lambda < 150^\circ$ — 53 узла. На долготах от 150 до 330° имеется 73 нисходящих узла (58.4 %), на долготах $330^\circ < \lambda < 150^\circ$ нисходящих узлов всего лишь 6 (11.3 %). Таким образом, нисходящие узлы лежат практически в зоне повышенной концентрации афелиев.

Феномен исключительно высокой концентрации афелиев на одной половине орбиты Юпитера может быть интерпретирован в рамках теории захвата комет [19—21, 28]. Для захвата долгопериодической кометы на короткопериодическую орбиту с прямым движением необходимо, чтобы догоняющая Юпитер комета вошла в сферу действия планеты на гелиоцентрическом расстоянии, превышающем расстояние планеты от Солнца. При этом кометное ядро выходит на короткопериодическую орбиту в районе афелия, а рабочий узел находится недалеко от афелия. В зоне повышенной концентрации афелиев и узлов кометных орбит (рис. 2) расположен афелий орбиты Юпитера ($\lambda = 194^\circ$). В афелии радиус сферы действия планеты на 10 % больше, чем на перигелийном участке. В афелии скорость планеты минимальна, а это значит, что увеличивается вероятность сближений с планетой догоняющих Юпитер долгопериодических комет. Согласно резуль-

татам [28], эффективность захвата будет максимальна, если долгопериодическая комета в эпоху сближения с Юпитером находится вблизи своего перигелия. Но, как известно, перигелии долгопериодических комет концентрируются около долгот $250\text{--}260^\circ$. Итак, названные факторы могут в совокупности обеспечить повышенную частоту сближения комет с Юпитером на значительном отрезке его орбиты. В действительности более 43 % исследованных сближений реальных комет с Юпитером проходило на долготах $194 \pm 45^\circ$.

Итак, группа комет ($N = 147$), имеющих в настоящую эпоху периоды P от 5.8 до 10 лет, может рассматриваться как семейство Юпитера.

В семейство Сатурна можно отнести три кометы (табл. 1): P/1997 T3, $R_D = 8.6$ а. е., $P = 17.3$ г.; P/1998 U3, $R_A = 10.0$ а. е., $P = 14.9$ г.; P/1999 V1, $R_A = 10.1$ а. е., $P = 16.8$ г.

Уран может считаться родительской планетой кометы C/1999 E1 ($R_D = 20.1$ а. е., $P = 65.9$ г.) после тесного сближения 09.12.1073 г.

Почти параболические кометы и планеты земной группы. Рассмотрим сначала пространственную ориентацию плоскостей орбит ППК, которую, как известно, определяют два угла: наклон к эклиптике i и долгота восходящего узла Ω . В литературе традиционно распределение орбит по наклонам приводят в виде гистограммы с постоянным шагом по i . При такой методике создается иллюзия дефицита орбит с малыми и большими наклонами. На рис. 3 дана соответствующая гистограмма для 792 ППК, из которой виден дефицит орбит с наклонами $i < 40^\circ$ и $i > 150^\circ$. В данном случае недопустимо использовать постоянный шаг по i , поскольку распределение наклонов пропорционально $\cos i$.

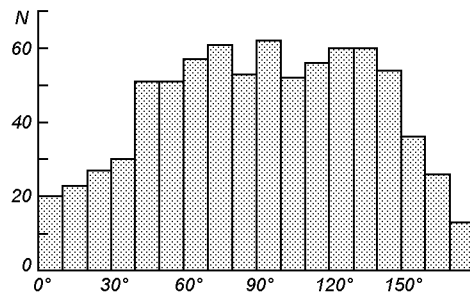


Рис. 3. Распределение 792 почти параболических комет по наклону орбиты

Объективное пространственное распределение кометных плоскостей орбит можно получить, исследуя плотность σ полюсов кометных орбит на шаровых слоях небесной сферы, соответствующих данному интервалу Δi наклона:

$$\sigma = \frac{N}{2\pi R^2(\cos i_1 - \cos i_2)}. \quad (3)$$

Принимая $R = 1$, размерность σ будет составлять: [число полюсов/единичная площадка]. Результаты подсчетов по формуле (3) приведены в табл. 3. Как видим, полюса кометных орбит имеют наибольшую плотность вблизи полюсов эклиптики: около северного полюса эклиптики $\sigma = 210$, около южного — $\sigma = 136$ при средней плотности $\sigma = 63$. Это означает, что реально наблюдается высокая концентрация плоскостей орбит ППК вблизи плоскости эклиптики.

Для дополнительной проверки этого результата мы вычислили, используя метод Натансона [14], плоскость, к которой концентрируются кометные

Таблица 3. Плотность полюсов орбит почти параболических комет

| Δi , град | N | σ , (а. е.) ⁻² | Δi , град | N | σ , (а. е.) ⁻² |
|-------------------|-----|----------------------------------|-------------------|-----|----------------------------------|
| 0—10 | 20 | 210 | 100—110 | 52 | 49 |
| 10—20 | 23 | 81 | 110—120 | 56 | 56 |
| 20—30 | 27 | 58 | 120—130 | 60 | 67 |
| 30—40 | 30 | 48 | 130—140 | 60 | 77 |
| 40—50 | 51 | 66 | 140—150 | 54 | 86 |
| 50—60 | 51 | 57 | 150—160 | 36 | 78 |
| 60—70 | 57 | 57 | 160—170 | 26 | 92 |
| 70—80 | 61 | 58 | 170—180 | 13 | 136 |
| 80—90 | 53 | 49 | 0—180 | 792 | 63 |
| 90—100 | 62 | 57 | | | |

Таблица 4. Распределение гелиоцентрических расстояний узлов и перигелиев почти параболических комет

| r , а. е. | Узлы | | Перигелии | |
|-------------|------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| | N | σ , (а. е.) ⁻² | N | σ , (а. е.) ⁻³ |
| 0—2 | 675 | 53.71 | 615 | 18.35 |
| 2—4 | 286 | 7.59 | 114 | 0.48 |
| 4—6 | 122 | 1.94 | 48 | $7.54 \cdot 10^{-2}$ |
| 6—8 | 75 | 0.85 | 12 | $9.68 \cdot 10^{-3}$ |
| 8—10 | 50 | 0.44 | 2 | $9.78 \cdot 10^{-4}$ |
| 10—20 | 117 | 0.12 | 1 | $3.41 \cdot 10^{-5}$ |
| 20—30 | 53 | $3.37 \cdot 10^{-2}$ | — | — |
| 30—40 | 25 | $1.14 \cdot 10^{-2}$ | — | — |
| 40—50 | 21 | $7.43 \cdot 10^{-3}$ | — | — |
| 50—60 | 9 | $2.60 \cdot 10^{-3}$ | — | — |
| 60—70 | 12 | $2.94 \cdot 10^{-3}$ | — | — |
| 70—80 | 12 | $2.55 \cdot 10^{-3}$ | — | — |
| 80—90 | 8 | $1.50 \cdot 10^{-3}$ | — | — |
| 90—100 | 4 | $6.70 \cdot 10^{-4}$ | — | — |
| 100—200 | 23 | $2.44 \cdot 10^{-4}$ | — | — |
| 200—300 | 18 | $1.15 \cdot 10^{-4}$ | — | — |
| 300—400 | 16 | $7.28 \cdot 10^{-5}$ | — | — |
| 400—500 | 9 | $3.18 \cdot 10^{-5}$ | — | — |
| 500—1000 | 17 | $7.22 \cdot 10^{-5}$ | — | — |
| > 1000 | 32 | — | — | — |

орбиты, отдельно для прямых и обратных орбит. Эта «средневзвешенная» плоскость имеет для прямых орбит параметры: $i = 4.4^\circ$; $\Omega = 323.4^\circ$, для обратных — $i = 173.5^\circ$; $\Omega = 219.0^\circ$. Таким образом, как прямые, так и обратные ППК обнаруживают тенденцию группироваться около плоскости эклиптики. На этом основании можно предполагать, что источник возмущений ППК может находиться в плоскости эклиптики. Не исключено, что в плоскости эклиптики находится и сам источник комет.

Рассмотрим сначала распределение узлов ППК в плоскости эклиптики. В табл. 4 дано распределение гелиоцентрических расстояний 1584 узлов 792 почти параболических комет. Максимальное число узлов ($N = 675$, или 42.6 % от общего числа) расположено на гелиоцентрических расстояниях $R < 2$ а. е. На гелиоцентрических расстояниях $R < 6$ а. е. расположено $N = 1083$, или 68 % узлов. Плотность $\sigma = N / [\pi(r_2^2 - r_1^2)]$ в зоне планет земной группы составляет $\sigma = 53.7$ (а. е.)⁻². Около орбиты Юпитера плотность уменьшается до $\sigma = 1.94$ (а. е.)⁻². В поясе Койпера $\sigma \approx 0.0026$ (а. е.)⁻². Наличие узлов за пределами планетной системы, как будет показано ниже,

есть следствие геометрического эффекта. Подводя итоги, можно констатировать наличие исключительно важного феномена для системы почти параболических комет: узлы ППК располагаются преимущественно в зоне планет земной группы.

Перигелии обнаруживают еще более высокую степень концентрации в близкой около солнечной области (табл. 4): 615 перигелиев (77.7 %) расположены на гелиоцентрических расстояниях $r < 2$ а. е., объемная плотность перигелиев здесь составляет $\sigma = 18.35$ (а. е.)⁻³. В зоне Юпитера $\sigma = 0.00968$ (а. е.)⁻³. Таким образом, орбиты реальных ППК пронизывают Солнечную систему в основном через зону планет земной группы.

Итак, есть основания для проверки планет земной группы на возможность их сближений с ППК. С этой целью мы провели численное интегрирование уравнений движения ППК на предмет выявления сближений этих объектов с планетами Солнечной системы в сорокалетнем временном интервале, центром которого является момент прохождения кометой перигелия орбиты. Использовались элементы 714 орбит с $q > 0.35$ а. е. Обнаружены тесные сближения с Юпитером пяти комет: C/1664 W1, C/1760 A1, C/1840 E1, C/1976 E1, C/1980 E1. С Меркурием, Венерой, Землей, Марсом, Сатурном, Ураном и Нептуном тесных сближений на исследуемом интервале времени (40 лет) не найдено.

В числе ППК каталога [32] есть 110 комет с периодами от 200 до 5000 лет. Мы провели интегрирование уравнений движения этих комет от эпохи прохождения перигелия до -3000 г. с целью выявления тесных сближений комет с большими планетами. Обнаружены тесные сближения с Юпитером комет C/1885 R1 (244 год, $r_{\min} = 0.15$ а. е.) и C/1932 G1 (-88 год, $r_{\min} = 0.31$ а. е.). Имела сближение с Сатурном комета C/1861 G1 (-2626 г., $r_{\min} = 0.36$ а. е.). Тесных сближений эллиптических комет с планетами земной группы не обнаружено.

Почти параболические кометы и трансеплутоновые планеты. Связь ППК с гипотетическими трансеплутоновыми планетами рассматривалось в работах [5—7, 13, 24, 32, 37, 38]. Методика сводилась к следующему. По признакам некоторого сходства кометных орбит комплектовалась небольшая группа, обычно около десятка комет, и для этой группы подбирались «родительская» планета. Радиус орбиты A родительской планеты принимается равным среднему афелийному расстоянию Q кометных орбит. Далее определяется плоскость, отклонение от которой кометных афелиев минимально, и постулируется, что в данной плоскости движется «планета-родоначальница». В работе [12] предпринята попытка проверить реальность существования гипотетических трансеплутоновых планет, применяя для этой цели 792 почти параболические кометы (ППК, $P > 200$ лет). Тестирование на предмет кинематической связи комет с трансеплутоновыми планетами дало отрицательный результат. В работе не рассматривалась гипотеза [5].

Рассмотрим гипотезу А. С. Гулиева [5] о двух трансеплутоновых планетах, основанную на некотором преобладании узлов кометных орбит в двух зонах. Согласно этой гипотезе есть избыток узлов на гелиоцентрических расстояниях 48.5—56.6 а. е. в плоскости

$$\Omega = 262.9^\circ, \quad i = 29.6^\circ, \quad (4)$$

а также преобладание узлов на интервале 102—112 а. е. в плоскости

$$\Omega = 341^\circ, \quad i = 30.5^\circ. \quad (5)$$

Для проверки гипотезы о трансеплутоновых планетах в плоскостях (4) и (5) мы создали два кометных каталога в координатных системах, где за основные плоскости приняты плоскости (4) и (5).

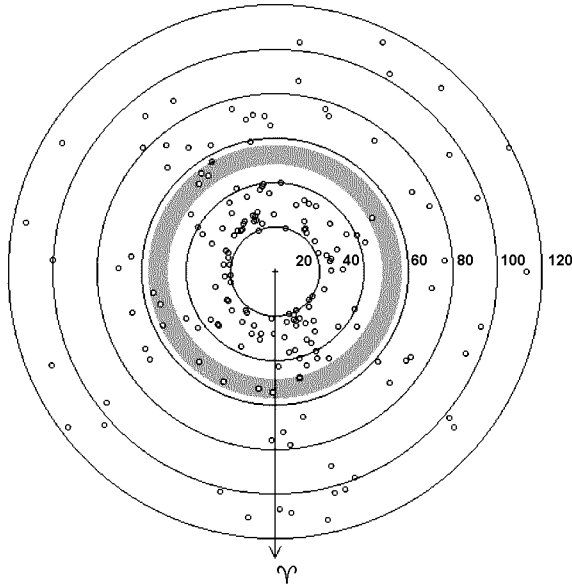


Рис. 4. Положение узлов на плоскости ($\Omega = 262.9^\circ$, $i = 29.6^\circ$) в интервале $20 \text{ а. е.} < R < 120 \text{ а. е.}$

Распределение кометных узлов на плоскости (4) имеет такой же характер распределения, как и на эклиптике (табл. 4): наблюдается очень высокая концентрация узлов на малых гелиоцентрических расстояниях, а далее идет резкий спад по экспоненте. На расстоянии $R < 2 \text{ а. е.}$ расположено 687 (46 %) узлов, плотность $\sigma = 54.7 \text{ (а. е.)}^{-2}$. На интервале $10 \text{ а. е.} < R < 20 \text{ а. е.}$ находится 103 узла, плотность здесь $\sigma = 0.1 \text{ (а. е.)}^{-2}$, что в 500 раз меньше, чем в околосолнечной области ($R < 2 \text{ а. е.}$). Узлы, расположенные на расстояниях $R > 20 \text{ а. е.}$ можно считать спорадическими: на гелиоцентрических расстояниях $20 \text{ а. е.} < R < 120 \text{ а. е.}$ на площади $S = 43982 \text{ (а. е.)}^2$ расположены 184 узла, что в среднем составляет 4.2 узла на 1000 (а. е.)^2 . Положение узлов на плоскости (4) в интервале $20 \text{ а. е.} < R < 120 \text{ а. е.}$ изображено на рис. 4. Концентрические окружности проведены через 20 а. е. На рис. 4 затонировано кольцо между радиусами 48.5 а. е. и 56.6 а. е. , на котором согласно [5] якобы наблюдается избыток узлов кометных орбит, и где находится трансеплутоновая планета. Данная версия несостоятельна: на указанном кольце расположено всего лишь 14 узлов, плотность $\sigma = 0.0052 \text{ (а. е.)}^{-2}$. Другими словами здесь содержится 5.2 узла на 1000 (а. е.)^2 . При столь мизерном статистическом материале даже вероятностные оценки уже становятся не корректными.

Наличие узлов кометных орбит на периферии Солнечной системы есть следствие определенной ориентации орбит в плоскости движения кометы, задаваемой величиной аргумента перигелия ω . Как следует из формул (1), гелиоцентрическое расстояние восходящего узла R_A будет достаточно большим, если значение $\cos\omega$ близко к -1 , расстояние до нисходящего узла R_D примет большие значения при $\cos\omega \rightarrow +1$. Математический прогноз подтверждается данными наблюдений. На диаграмме «аргумент перигелия ω — гелиоцентрическое расстояние узла $R_{A,D}$ » (рис. 5) имеют место всплески около значений $\omega = 0$ и 180° . Таким образом, описанный эффект в кометной системе имеет геометрическую интерпретацию.

В комплексе ППК имеются 182 кометы с узлом за пределами планетной системы ($R_{A,D} > 40 \text{ а. е.}$). По версии А. С. Гулиева [5] 14 комет генетически связаны с планетой, движущейся в плоскости (4) на расстояниях 48.5 — 56.6 а. е. В табл. 5 приведены элементы орбит этих комет в системе

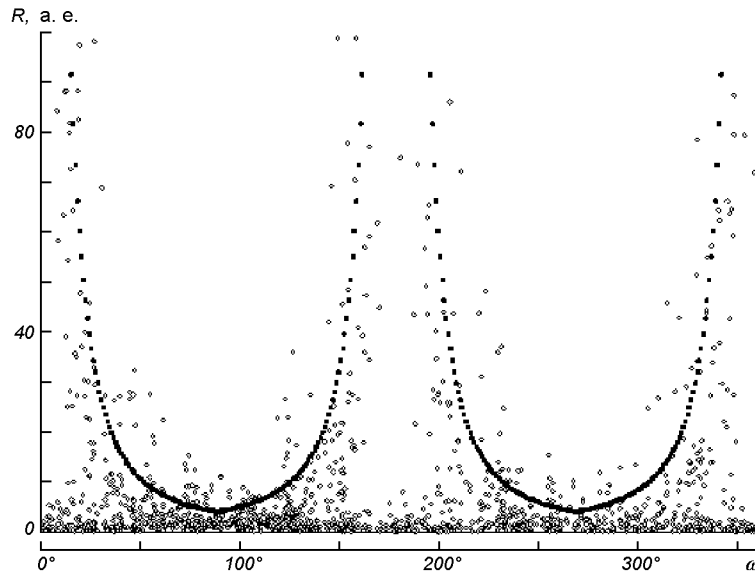


Рис. 5. Диаграмма «аргумент перигелия ω — гелиоцентрическое расстояние узла $R_{A,D}$ »

Таблица 5. Кометы, имеющие узлы на интервале 48.5—56.6 а. е. (плоскость $\Omega = 262^\circ$, $i = 29.6^\circ$)

| Комета | q | Q | ω | Ω | i | λ_π | β_π | R_A | R_D |
|-----------|------|------|----------|----------|-------|---------------|-------------|-------|-------|
| C/1665 F1 | 0.11 | — | 174.9 | 320.6 | 80.9 | 139.8 | 5 | 53.79 | 0.11 |
| C/1826 P1 | 0.85 | 679 | 346.2 | 155.8 | 50.7 | 147 | -10.6 | 0.87 | 54.43 |
| C/1852 K1 | 0.91 | — | 15.1 | 35.1 | 108.4 | 30.2 | 14.3 | 0.92 | 52.45 |
| C/1911 N1 | 0.68 | 369 | 168.3 | 296.1 | 147.9 | 126.1 | 6.2 | 55.94 | 0.69 |
| C/1922 U1 | 2.26 | — | 156.6 | 280.9 | 38.4 | 82.2 | 14.3 | 55.42 | 2.36 |
| C/1929 Y1 | 0.67 | 1382 | 192.6 | 286.5 | 120.9 | 99.9 | -10.8 | 53.68 | 0.68 |
| C/1948 R1 | 4.71 | — | 214.0 | 217.6 | 75.3 | 47.3 | -32.7 | 55.08 | 5.15 |
| C/1952 H1 | 1.28 | 148 | 165.5 | 221.4 | 136.5 | 52 | 9.9 | 52.45 | 1.30 |
| C/1954 O2 | 3.87 | — | 148.6 | 352.1 | 71 | 160.9 | 29.5 | 53.02 | 4.18 |
| C/1984 K1 | 2.70 | — | 206.7 | 119.4 | 135.4 | 279.7 | -18.4 | 50.90 | 2.85 |
| C/1984 U1 | 5.49 | 2286 | 216.7 | 359.1 | 149.7 | 146.4 | -17.5 | 54.20 | 6.09 |
| C/1992 J2 | 0.59 | — | 12.7 | 315 | 151.6 | 303.7 | 6 | 0.60 | 48.42 |
| C/1998 M1 | 3.12 | 858 | 153.8 | 210.2 | 11.6 | 4.5 | 5.1 | 56.88 | 3.29 |
| C/2000 B2 | 3.78 | — | 148.0 | 13.4 | 64.7 | 178.4 | 28.6 | 49.70 | 4.09 |

координат на плоскости (4). Легко видеть, что перигелии расположены около узлов: перигелийное расстояние q почти равно гелиоцентрическому расстоянию $R_{A,D}$ одного из узлов, долгота перигелия λ_π либо близка к долготе восходящего, либо нисходящего узла. У комет C/1948 R1 и C/1984 U1 и перигелий, и узел лежат около орбиты Юпитера. Таким образом, можно предполагать, что кометы испытали планетные возмущения в районе перигелия.

В отличие от перигелиев афелии с узлами не связаны. Среди 14 орбит есть две гиперболы и пять парабол. У эллиптических орбит величина афелийного расстояния Q находится в пределах от 148 а. е. (C/1952 H1) до 15210 а. е. (C/1954 O2). Таким образом, афелии располагаются вне зоны гипотетической трансеплутоновой планеты.

Распределение наклонов i кометных орбит имеет случайный характер: от 11.6 до 151.6° (табл. 5). Если кометы динамически связаны с трансеплу-

тоновой планетой, то они имели бы какое-то преимущественное направление движения. Например, известно, что все короткопериодические кометы семейства Юпитера имеют прямые движения и малые наклоны i . Весьма существенно, что аргумент перигелия ω близок либо к нулю, либо к 180° , что обеспечивает большое гелиоцентрическое расстояние узла.

Замечания относительно планеты в плоскости (4) имеют место и для плоскости (5). Так, А. С. Гулиев [5] предполагает наличие планеты в плоскости (5) на основании якобы наблюдаемого избытка узлов на интервале 102—112 а. е. Но фактически в этом интервале гелиоцентрических расстояний находится всего лишь 10 узлов или 1.5 узла на 1000 (а. е.)², в то время как в целом на интервале 20—120 а. е. расположено 153 узла или в среднем 3.5 узла на 1000 (а. е.)².

В работе исследовалась связь с планетами *только реальных* комет, внесенных в кометный каталог. Учет наблюдательной селекции в данном случае не требуется, так как в работах [10, 15] показано, что наблюдаемое распределение комет практически совпадает с истинным.

Основные результаты статьи.

1. Подтвержден факт динамической связи большинства короткопериодических комет с Юпитером.

2. Не выявлено связи почти параболических комет с планетами земной группы.

3. Показана несостоятельность версии о генетической связи комет с гипотетическими планетами.

Автор выражает благодарность В. В. Кузьмичеву за помощь в техническом оформлении статьи.

1. Аксеновский А. Г., Кузьмин С. В., Томанов В. П. Захват межзвездных комет // Астрон. вестн.—1994.—28, № 2.—С. 83—94.
2. Беляев Н. А., Кресак Л. К., Питтих Э. М., Пушкарев А. Н. Каталог короткопериодических комет. — Братислава: АИСАН, 1986.—400 с.
3. Всехсвятский С. К. Физические характеристики комет. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958.—575 с.
4. Всехсвятский С. К. Природа и происхождение комет и метеорного вещества. — М.: Просвещение, 1967.—183 с.
5. Гулиев А. С. О возможности существования двух трансеплутоновых планет // Письма в Астрон. журн.—1992.—18, № 2.—С. 183—189.
6. Гулиев А. С. Об одном трансеплутоновом планетном семействе // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—11, № 2.—С. 44—46.
7. Гулиев А. С., Дадашов А. С. О трансеплутоновых кометных семействах // Астрон. вестн.—1989.—23, № 1.—С. 88—95.
8. Дробышевский Э. М. Крупномасштабная электрохимия в ледяных луноподобных телах и природа малых тел Солнечной системы. — М., 1984.—22 с.—(Препринт / АН СССР, Физ.-тех. ин-т, № 897).
9. Казимирчак-Полонская Е. И. Обзор исследований тесных сближений короткопериодических комет с Юпитером (1770—1960) // Тр. Ин-та теор. астрон. АН СССР.—1961.—7.—С. 19—190.
10. Калининцева О. В. Наблюдательная селекция при открытии комет // Астрон. вестн.—2002.—36, № 3.—С. 282—288.
11. Кузьмичев В. В., Томанов В. П., Горшкова О. А. Эволюция орбит короткопериодических комет. — Вологда, 2004.—278 с.—Деп. в ВИНТИ 16.12.04, № 2017-В2004.
12. Кузьмичев В. В., Томанов В. П. Поиски трансеплутоновых планет с помощью долгопериодических комет // Письма в Астрон. журн.—2006.— 32, № 5.—С. 392—400.
13. Науменко Б. Н. О заплутоновых планетах в Солнечной системе // Астрон. циркуляр.—1982.—№ 1217.—С. 6—8.
14. Натансон С. Г. О происхождении комет // Тр. Астрон. обсерватории Ленингр. ун-та.—1923.—4.—С. 18—24.
15. Радзиевский В. В. Вероятность открытия комет как критерий их происхождения // Астрон. журн.—1981.—58, № 6.—С. 1286—1294.

16. Радзиевский В. В. Происхождение и динамика кометной системы // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 1.—С. 66—67.
17. Радзиевский В. В., Томанов В. П. О захвате комет по схеме Лапласа // Астрон. журн.—1977.—54, № 2.—С. 388—397.
18. Радзиевский В. В., Томанов В. П. Статистические следствия захвата комет по схеме Лапласа // Астрон. журн.—1977.—54, № 4.—С. 890—896.
19. Томанов В. П. К вопросу захвата комет Юпитером // Астрон. журн.—1980.—57, № 4.—С. 816—823.
20. Томанов В. П. К вопросу захвата комет Юпитером. II // Астрон. журн.—1981.—58, № 2.—С. 408—415.
21. Томанов В. П. О происхождении короткопериодических комет // Кометы и метеоры.—1980.—№ 28.—С. 26—32.
22. Чоманов В. П. Кометная космогония. — Вологда, 1989.—96 с.
23. Томанов В. П., Кузьмичев В. В., Горшкова О. А., Бахвалов Р. Н. Сближения короткопериодических комет с большими планетами. — Вологда, 2005.—237 с.—Деп. в ВИНТИ 06.10.05, № 1282-B2005.
24. Чеботарев Г. А. Поиски транс-плутоновых планет с помощью периодических планет // Бюл. Ин-та теор. астрономии.—1972.—13, № 3.—С. 145—147.
25. Calladorean C. Etude sur la Theorie des cometes periodiques // Ann. Observ., Paris. Mem.—1892.—20.—P. 1—64.
26. Carussi A., Kresak L., Perozzi E., Valsecchi G. Long-term evolution of short-period comets. — Bristol, Boston: Adam Hilder Ltd., 1986.—152 p.
27. Carussi A., Valsecchi G. Dynamical evolution of short-period comets // Publ. Astron. Inst. Czech.—1987.—N 67.—P. 21—28.
28. Everhart E. Origin and evolution of comets // Symp. Origine. Syst. Solaire. — Nice. Paris, 1972.—P. 302—304.
29. Fernandez J. A. Dynamical capture and physical decay of short-period comets // Icarus.—1985.—64, N 2.—P. 308—309.
30. Lagrange J. L. Sur l'origine des cometes // Additions a la connaissance des Temps pour.—1812.—P. 381—395.
31. Laplace P. S. Exposition du Systeme du Monde. — Paris, 1796.—Ed. 1—5.
32. Marsden B. G., Williams G. V. Catalogue of Cometary Orbits 2003: 15th Ed. — Cambridge, MA: Smithsonian Astrophys. Observ., 2003.—152 p.
33. Matese J. J., Whitman P. G., Whitmire D. P. Cometary evidence of a massive body in the outer Oort cloud // Icarus.—1999.—141, N 2.—P. 354—366.
34. Nakamura T., Yoshikawa M. Invisible comets on evolutionary track of short-period comets // Celest. Mech. and Dynamical Astron.—1992.—54, N 1—3.—P. 261—266.
35. Newton H. A. On the capture of comets // Mem. Nat. Acad. Sci.—1891.—1.—P. 55—63.
36. Schulhof L. Sur les grandes perturbations des cometes periodiques // Bull. Astron. Paris.—1891.—8.—P. 147—157.
37. Schuette C. H. Two new families of comets // Pop. Astron.—1949.—57, N 4.—P. 176—182.
38. Schuette K. Drei weitere Mitglieder der Transplutokometenfamilie // Acta Astronomica.—1965.—15, N 1.—P. 11—13.
39. Tancredi G. The dynamical memory of Jupiter family comets // Astron. and Astrophys.—1995.—299, N 1.—P. 288—292.
40. Tancredi G., Rickman H. The evolution of Jupiter family comets over 2000 years // Chaos. Resonance and Collective Dynamical Phenomena in the Solar System.—1992.—152.—P. 269—274.
41. Tisserand F. Sur la theorie de la capture des cometes periodiques // Bull. Astron. Paris.—1889.—6.—P. 241—257, 289—292.
42. Torbett M. V. Capture of $V_{\infty} = 20$ km/s interstellar comets by three-body interactions in the planetary system // Astron. J.—1986.—92, N 1.—P. 171—175.

Поступила в редакцию 27.11.06