

УДК 521.73

О динамике короткопериодических комет**В. В. Емельяненко**

Численно изучена эволюция орбит наблюдавшихся короткопериодических комет на промежутках времени до $5 \cdot 10^4$ лет. Рассмотрены особенности их либрационного и стохастического движения. Выделены кометы, не имеющие вблизи современной эпохи тесных сближений с Юпитером.

ON THE DYNAMICS OF SHORT-PERIOD COMETS, by Emel'yanenko V. V.— The evolution of the observed short-period comets is studied numerically on the time intervals reaching $5 \cdot 10^4$ years. The peculiarities of comet's libratory and stochastic motion are considered. The comets which do not make close approaches to Jupiter near the contemporary epoch are indicated.

В работе рассмотрены закономерности долговременной эволюции орбит короткопериодических комет. Исследование выполнялось с помощью численных методов [1]. Движение комет изучалось вблизи современной эпохи на промежутках времени примерно от 10^2 (для комет, имеющих сближения с Юпитером) до $5 \cdot 10^4$ лет (для комет, находящихся в резонансе с Юпитером). Исходные элементы орбит в основном соответствуют каталогу Маредена [11]. Анализ численных результатов осуществлялся на основе резонансной теории возмущений [2, 6].

Короткопериодические кометы в процессе эволюции могут сблизиться с внешними планетами. Единственное исключение представляет собой комета Энке, орбита которой находится вдали от внешних планет. Она совершает движение вблизи соизмеримости $18:5$ с Юпитером на расстоянии более 0.9 а. е. от орбиты этой планеты. Динамические характеристики кометы Энке в большей степени свойственны астероидам группы Аполлона и в дальнейшем не рассматриваются.

На эволюцию орбит короткопериодических комет преимущественное влияние оказывает Юпитер. Наибольшие возмущения испытывают кометы семейства Юпитера. Для комет, афелии которых лежат вне орбиты Юпитера, функция, характеризующая расстояние между орбитами Юпитера и кометы, имеет два минимума. При вековом изменении орбиты минимальные расстояния непрерывно изменяются, достигая в определенные моменты нулевого значения. Вблизи этих моментов пересечения орбит возможны тесные сближения кометы с планетой, приводящие к большим изменениям орбиты. Избежать пересечения орбит могут объекты с устойчивой либрацией аргумента перигелия, как у астероида Цинцинати. Но ни у одной кометы такое явление не обнаружено.

Поэтому движение всех комет с периодами обращения от четырех до двухсот лет является стохастическим, большая полуось их орбит неустойчива на бесконечно большом промежутке времени. Однако имеются ограниченные интервалы времени, в течение которых орбита кометы удалена от орбит планет и испытывает только умеренные возмущения. При этом движение комет приобретает свойства, хорошо известные для автономных гамильтоновых систем с двумя степенями свободы [2, 6]. Наряду с типично стохастическими движениями существуют и временные либрационные движения короткопериодических комет в резонансе с Юпитером.

При либрационном движении большая полуось орбиты изменяется в небольших пределах вблизи значения, соответствующего соизмеримости периодов обращения кометы и Юпитера.

При стохастическом движении изменения большой полуоси не ограничены пределами одной резонансной зоны. Стохастичность движения может вызываться собственно периодическими возмущениями Юпитера и возмущениями других планет. С увеличением возмущений возрастает диффузия по большой полуоси. Для соизмеримостей высоких порядков даже на больших удалениях от планет существует сплошная стохастичность. Внутренние планеты практически не влияют на характер эволюции орбит корот-

копернических комет, поскольку сближения с ними маловероятны. Умеренные возмущения от Сатурна, Урана и Нептуна могут приводить к нарушению устойчивого движения.

Особо необходимо выделить движение при больших возмущениях вблизи орбит планет. В этом случае эволюция орбит комет определяется случайными сближениями с планетами, при которых происходят скачкообразные изменения орбит. Хотя и при

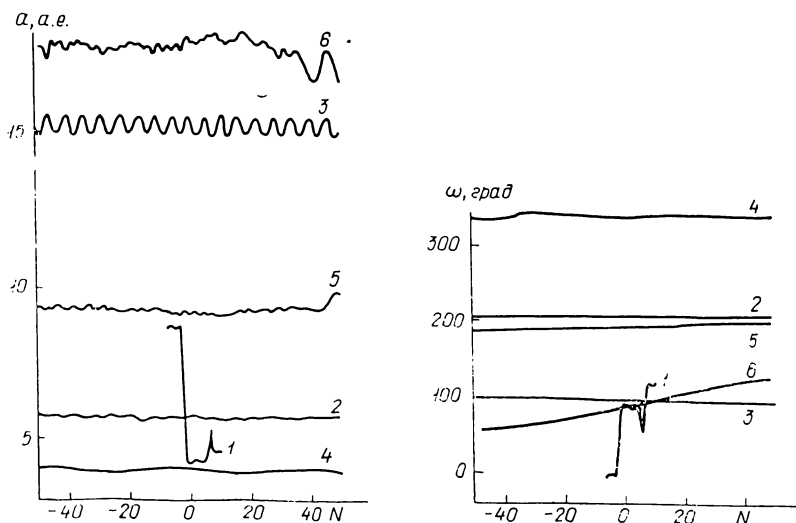


Рис. 1. Изменение большой полуоси a в зависимости от числа прохождений перигелиев N для комет: 1 — Смирновой — Черных (1975 VII); 2 — Тутля (1790 II); 3 — Дубяго (1921 I); 4 — Петерса — Хартли (1982 III); 5 — Кроммелина (1818 I); 6 — Галлея (-239)

Рис. 2. Изменение аргумента перигелия ω в зависимости от числа прохождений перигелиев N для комет: 1 — Смирновой — Черных (1975 VII); 2 — Тутля (1790 II); 3 — Дубяго (1921 I); 4 — Петерса — Хартли (1982 III); 5 — Кроммелина (1818 I); 6 — Галлея (-239)

тесных сближениях возможна либрация большой полуоси [9, 10], но она очень неустойчива, а возмущения других элементов орбиты превышают регулярные вековые изменения.

Вследствие неопределенности исходных элементов орбит комет, координат планет, негравитационных эффектов нельзя надежно установить наличие сближения с планетой уже через несколько столетий после эпохи наблюдения кометы. Как показали расчеты, кометам удается иногда избегать катастрофических сближений с Сатурном, Ураном и Нептуном, несмотря на пересечение их орбит с орбитами этих планет. Но вблизи пересечения с орбитой Юпитера всегда фиксировались большие изменения орбит комет.

На рисунках 1 и 2 приведены изменения большой полуоси и аргумента перигелия для комет с различными типами движения. Кометы Дубяго и Петерса — Хартли совершают либрационное движение, кометы Галлея, Кроммелина и Тутля — стохастическое, а для кометы Смирновой — Черных стохастичность является катастрофической. Нулевой момент соответствует появлению кометы, которое указано в ее числовом обозначении.

При либрациях скорость разбегания соседних траекторий гораздо меньше, чем при типично стохастическом движении. На рис. 3 приведены изменения коэффициента растяжения средней аномалии по большой полуоси $\partial M/\partial a_0$ (M — средняя аномалия, a_0 — начальное значение большой полуоси) для комет Смирновой — Черных, Тутля, Дубяго, вычисленные с учетом возмущений от Юпитера (в невозмущенном варианте этот коэффициент изменяется со временем линейно).

Для либрационного движения возможно долговременное прогнозирование эволюции орбиты кометы на основе учета только вековых возмущений (уточнение расчетов достигается применением схем усреднения, сохраняющих и резонансные члены возмущающей функции). Для стохастического движения учет вековых возмущений дает

значительно менее точные оценки изменений элементов орбиты, поскольку не выполняются условия постоянства большой полуоси. Во всех случаях промежутки времени, на котором учитываются вековые возмущения орбиты кометы, не должны содержать момента пересечения с орбитой Юпитера.

Далее более подробно характеризуется движение наблюдавшихся короткопериодических комет. Для выяснения основных закономерностей эволюции орбит условно

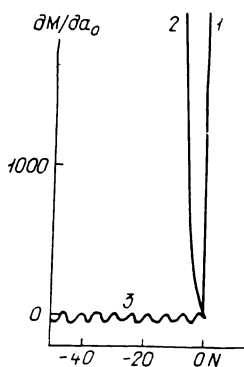


Рис. 3. Изменение величины dM/da_0 (в град/а. е.) в зависимости от числа прохождений перигелиев N в прошлом для комет: 1 — Смирновой — Черных (1975 VII); 2 — Тутля (1790 II); 3 — Дубяго (1921 I)

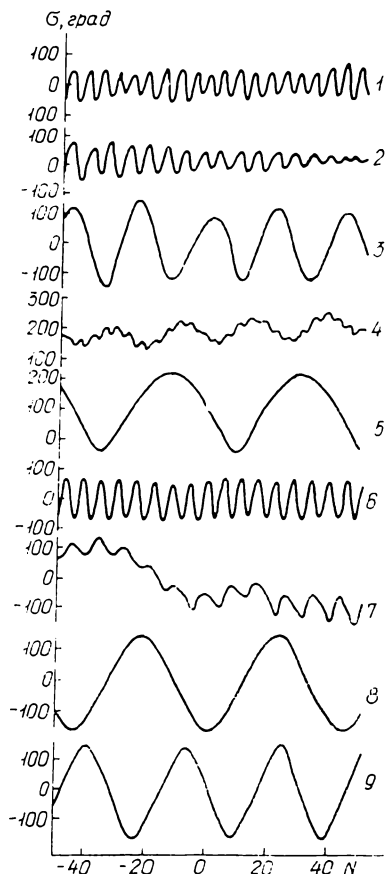


Рис. 4. Изменение величины $\sigma = j'M - j(L_{Ю} - \bar{\omega})$ в зависимости от числа прохождений перигелиев N для комет, движущихся в соизмерности j/j' с Юпитером ($L_{Ю}$ — средняя долгота Юпитера, $\bar{\omega}$ — долгота перигелия кометы): 1 — Брорзена — Меткофа (1919 III); 2 — Понса — Брукса (1954 VII); 3 — Неуймина I (1966 VI); 4 — Дю Туа (1944 III); 5 — Петерса — Хартли (1982 III); 6 — Дубяго (1921 I); 7 — Джакобини (1896 V); 8 — Пигота (1783); 9 — Триттона (1977 XIII)

выбран интервал, содержащий 50 оборотов кометы вокруг Солнца в прошлом и 50 оборотов в будущем, называемый в дальнейшем стандартным. Если устанавливались тесное сближение кометы с планетой и большие возмущения орбиты, то дальнейшее интегрирование уравнений движения прекращалось. Для комет, совершающих либрационное движение, изучение продолжалось за пределы стандартного интервала до пересечения с орбитой внешней планеты. В необходимых случаях использовались точные координаты планет, полученные совместным интегрированием их уравнений движения на основе начальных координат и скоростей [7].

В табл. 1 приведены кометы, совершающие либрационное движение в течение всего стандартного интервала времени, с указанием удаленности Δ (в а. е.) орбиты кометы от орбит внешних планет в современную эпоху. В других последних графах таблицы даны названия планет, с орбитами которых происходит первое пересечение орбит комет в прошлом и будущем (Ю — Юпитер, С — Сатурн, У — Уран, Н — Нептун). Существует неопределенность моментов этих пересечений (очень индивидуальная для каждого объекта) из-за нарастания степени стохастичности кометного движения при приближении к орбите внешней планеты. Обсуждение этого вопроса для каждой кометы и оценки вероятностей сближений с планетами будут приведены в отдельной работе. На рис. 4 показано изменение либрационного аргумента для данных комет в течение стандартного интервала времени.

Движение комет Брорзена — Меткофа, Понса — Брукса, Неуймина I, Дю Туа рассмотрено в работе [1]. Об устойчивости либраций комет Петерса — Хартли, Дубяго,

Джакобини, Пигота, Триттона можно судить только предположительно, поскольку их орбиты определены ненадежно (для последних четырех комет — только по одному появлению).

Некоторые кометы совершают неустойчивое либрационное движение на близких расстояниях от орбиты Юпитера, которое нарушается в пределах стандартного интервала. Из них наиболее длительные либрации имеют кометы Ботина (в соизмеримости 1 : 1), Слотера — Бернса (1 : 1), Понса — Виннеке (2 : 1), Копфа (2 : 1), Форбса (2 : 1), Темпеля 1 (2 : 1), Темпеля — Свифта (2 : 1), Герелса 1 (4 : 5). Сведения о движении этих комет, а также о некоторых других временных либрациях содержатся в работах [8—10].

Таблица 1. Кометы, совершающие либрационное движение в течение стандартного интервала времени

Комета	Соизмеримость с Юпитером	$\Delta_{Ю}$	$\Delta_{С}$	$\Delta_{У}$	Δ_{H}	Пересечение с орбитой планеты	
						в прошлом	в будущем
Брорзена — Меткофа	1 : 6	0.5	1.7	3.8	7.6	Ю	Ю
Понса — Брукса	1 : 6	2.0	1.6	1.1	5.3	С	У
Неуймина 1	2 : 3	1.0	0.8	6.2	18.0	С	С
Дю Туа	4 : 5	0.9	2.6	9.3	20.0	Ю	Ю
Петерса — Хартли	3 : 2	0.5	2.9	13.0	23.5	Ю	Ю
Дубяго	1 : 5	0.8	2.2	6.7	10.5	Ю	Ю
Джакобини	9 : 5	0.5	3.8	12.8	24.6	Ю	Ю
Пигота	2 : 1	0.3	4.9	13.7	25.3	Ю	Ю
Триттона	2 : 1	0.2	4.7	13.7	24.8	Ю	Ю

Таблица 2. Кометы, движущиеся по орбитам, удаленным в течение стандартного интервала времени от орбит внешних планет

Комета	$\Delta_{Ю}$	$\Delta_{С}$	$\Delta_{У}$	Δ_{H}	Комета	$\Delta_{Ю}$	$\Delta_{С}$	$\Delta_{У}$	Δ_{H}
Ольберса	0.7	3.4	9.1	16.4	Меллиша	1.5	3.0	7.9	11.9
Тутля	0.8	1.8	10.1	20.6	Вяйсяля	1.6	0.9	1.2	4.7
Аренда	0.6	4.3	12.7	24.6	Де Вико	2.3	1.9	0.6	3.8
Борелли	0.5	4.2	13.1	24.5	Сангвина	0.7	1.1	9.4	21.4
Джонсона	0.5	4.2	13.5	25.2	Рассела 2	0.7	4.0	13.6	24.8
Кларка	0.6	4.4	14.3	25.2	Барнарда 1	0.6	4.3	13.7	25.2
Темпеля 2	0.6	4.4	13.8	25.3					

В табл. 2 представлены кометы, удаленные от орбит внешних планет более чем на радиусы сфер действия планет на протяжении всего стандартного интервала времени. Эти кометы не имеют вблизи современной эпохи тесных сближений с внешними планетами, поэтому угловые элементы их орбит изменяются регулярно.

Наряду с кометами, приведенными в табл. 2, существуют кометы, также не имеющие сейчас тесных сближений с Юпитером, но движущиеся вблизи орбит других внешних планет: Гершеля — Риголле ($\Delta_{С} = 0.3$), Стефана — Отермы ($\Delta_{У} = 0.6$), Темпеля — Тутля ($\Delta_{С} = 0.5$, $\Delta_{У} = 0.3$), Кроммелина ($\Delta_{С} = 0.7$), Вильда 1 ($\Delta_{С} = 0.4$), Брэдфилда ($\Delta_{С} = 0.2$), Свифта — Тутля ($\Delta_{С} = 0.8$), Понса — Гамбара ($\Delta_{С} = 0.8$), ИРАС ($\Delta_{С} = 0$).

Степень стохастичности отмеченных комет различна. Стохастичность движения комет Свифта — Тутля, Вяйсяля 2, Понса — Гамбара, Темпеля — Тутля, Кроммелина вызвана близостью к орбитам Сатурна и Урана. Если учесть только возмущения от Юпитера, то комета Вяйсяля 2 совершала бы либрации вблизи соизмеримости 1 : 7, комета Кроммелина — 3 : 7, комета Темпеля — Тутля — 5 : 14, а кометы Свифта — Тутля и Понса — Гамбара двигались бы соответственно вблизи сепаратрис резонансов 1 : 10 и 1 : 5. Движение такого вида сохраняется у комет некоторое время вблизи современной эпохи, пока возмущения Сатурна или Урана не приводят к его нарушению. В прошлом

за границу стандартного интервала продолжают либрации комет Ольберса (в соизмеримости 1:6), Аренда (3:2), Кларка (2:1), временные либрации имеет также комета Темпеля 2 (вблизи соизмеримостей 9:4 и 11:5). Нарушение либрационных движений в этих случаях связано с умеренными сближениями с Юпитером. Для комет Де Вико, Стефана — Отермы, Темпеля — Тутля, Тутля скорость диффузии по большой полуоси невелика, и их движение похоже на циркуляции вблизи соизмеримостей соответственно 1:6, 1:3, 1:3, 1:1. А у комет Гершеля — Риголле, Меллини, Брэдфилда с большими периодами обращения (около 150 лет) изменения большой полуоси полностью случайные. Такое движение характерно и для комет с более долгими периодами обращения.

Для нескольких комет зафиксирована удаленность от орбит внешних планет при интегрировании уравнений движения на стандартном интервале времени только вперед или только назад: в прошлом не имели тесных сближений с планетами кометы Галлея, Аренда — Риго (находится в соизмеримости 7:4 с Юпитером), а в будущем — кометы Шомасса, Шпиталера, Холмса (находится в соизмеримости 5:3 с Юпитером), Биэли. Лишь вблизи грани стандартного интервала становятся возможными тесные сближения комет Свифта — Герелса и Ловаша, имеющих очень сходные орбиты, с Юпитером.

Остальные короткопериодические кометы, не упомянутые здесь, вблизи современной эпохи движутся по орбитам, находящимся на малом удалении от орбиты Юпитера, и испытывают тесные сближения с этой планетой. Наиболее фундаментальные исследования преобразований орбит комет при больших возмущениях выполнены Е. И. Казимирчак-Полонской [3—5]. В ее статьях содержится также обзор других работ. Неизбежная неопределенность результатов не позволяет проводить долговременное прогнозирование движения комет при тесных сближениях с планетами.

1. Емельяненко В. В. Движение комет в резонансе с Юпитером // Письма в Астрон. журн.— 1985.—11, № 12.— С. 924—929.
2. Заславский Г. М., Чириков Б. В. Стохастическая неустойчивость нелинейных колебаний // Успехи физ. наук.— 1971.—105, вып. 1.— С. 3—39.
3. Казимирчак-Полонская Е. И. Некоторые актуальные задачи кометной астрономии с современных позиций небесной механики // Тр. Ин-та теорет. астрон. АН СССР.— 1967.— Вып. 12.— С. 3—23.
4. Казимирчак-Полонская Е. И. Захват комет Юпитером и некоторые закономерности в вековой эволюции кометных орбит // Пробл. исслед. Вселенной. Астрометрия и небес. механика.— 1978.— Вып. 7.— С. 340—383.
5. Казимирчак-Полонская Е. И. Численная теория движения кометы Вольфа (1884 III) на интервале 1884—1984 гг. // Тр. Ин-та теорет. астрон. АН СССР.— 1982.— Вып. 18.— С. 3—77.
6. Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика.— М.: Мир, 1984.—528 с.
7. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / Под ред. Г. М. Дубошина.— М.: Наука, 1976.—864 с.
8. Carusi A., Kresak L., Perozzi E., Valsecchi G. B. Long-term evolution of short-period comets.— Rome, 1984.—184 с.— (Prepr. Inst. Astrofis. Spaz. Int. Rept; N 12).
9. Franklin F. A., Marsden B. G., Williams J. G., Bardwell C. M. Minor planets and comets in libration about the 2:1 resonance with Jupiter // Astron. J.— 1975.—80, N 9.— P. 729—746.
10. Marsden B. G. On the relationship between comets and minor planets // Ibid.— 1970.—75, N 2.— P. 206—217.
11. Marsden B. G. Catalogue of cometary orbits.— Cambridge: Smithsonian Astrophys. Observ., 1982.—98 p.