



ISSN 1607–2855

Том 7 • № 1 • 2011 С. 99 – 103

УДК 521+523.6

О влиянии негравитационных сил на динамику комет

Д.В. Кравченко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины

В работе рассмотрены причины возникновения негравитационных сил при движении комет, а также описаны модели различных механизмов возникновения негравитационных эффектов и влияние сближений с Юпитером.

ПРО ВПЛИВ НЕГРАВІТАЦІЙНИХ СИЛ НА ДИНАМІКУ КОМЕТ, Кравченко Д.В. — В роботі розглянуто причини виникнення негравітаційних сил при русі комет, а також описано моделі різних механізмів виникнення негравітаційних ефектів та вплив зближень з Юпітером.

ON THE INFLUENCE OF NON-GRAVITATIONAL FORCES ON COMETARY DYNAMICS, by Kravchenko D.V. — Origin of non-gravitational forces in cometary motions is considered. Models of different mechanism of non-gravitational effects appearing and the influence of approaches with Jupiter are described.

Ключевые слова: динамика комет; негравитационные силы; эволюция орбит короткопериодических комет.

Key words: comet dynamics; non-gravitational forces; short-periodic comets' orbit evolution.

1. ВВЕДЕНИЕ

Важной небесно-механической задачей является определение элементов орбит комет. Благодаря различным численным методам, ученые смогли описать движение комет как тел, находящихся в гравитационном поле других тел. Но характерным отличием комет от астероидов является тот факт, что в их движении присутствует ряд особенностей, которые также вносят вклад в динамику движения, но не носят гравитационного характера. Такие особенности обобщенно называют негравитационными эффектами. Под эту категорию попадают явления, связанные со взаимодействием ядра и межзвездного вещества, в результате которого возникают силы трения, а также возможна аккреция вещества ядром; но, в первую очередь, под негравитационными эффектами подразумевают те явления, которые связаны с потерей вещества с поверхности кометы.

Необходимость исследования негравитационных эффектов вызвана несоответствиями между расчетными и наблюдаемыми орбитами комет. Кроме того, важной задачей также является объяснение процессов, которые приводят к возникновению негравитационных сил, а также математическое моделирование таких процессов. В данной работе рассматриваются основные причины возникновения негравитационных эффектов, рассмотрены различные модели, которые описывают механизм возникновения таких эффектов, и влияние на эти модели сближения с Юпитером.

В результате испарения вещества с поверхности возникает реактивное давление, порождающее дополнительное ускорение. Это негравитационное ускорение может как увеличивать, так и уменьшать скорость движения кометы. На характер ускорения влияет целый ряд факторов: направление и скорость собственного вращения ядра, рельеф поверхности ядра, распределение зон активной сублимации, расстояние до звезды. Поэтому определение негравитационного ускорения является достаточно сложной, но в тоже время важной небесно-механической задачей. Ситуация усложняется тем, что вектор результирующего негравитационного ускорения не всегда проходит через центр ядра, а значит, возникает изменение скорости вращения ядра, прецессия и, как следствие, ведет к изменению величины негравитационного ускорения, вызвавшего эти изменения.

Факторы, вызывающие сублимацию, а значит, и негравитационное ускорение оказывают существенное воздействие лишь на небольшом участке орбиты близости звезды. На остальной части орбиты комета движется в основном под действием гравитационных сил (действие негравитационных сил, связанных с взаимодействием ядра кометы с межзвездным веществом, значительно слабее, чем действие негравитационных сил, вызванных сублимацией вещества с поверхности ядра). Такая особенность действия негравитационных сил позволяла использовать относительно простые методики учета негравитационных ускорений.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ДВИЖЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

При описании движения короткопериодических комет, для которых зафиксировано три и более появлений, обычно необходимо учитывать возникающие в их движении негравитационные эффекты. Впервые

попытки учета этих эффектов были предприняты при построении численной теории движения кометы Энке, так как из сопоставления орбит кометы за четыре появления было установлено, что есть систематическое ускорение, которое не могли объяснить действием больших планет. Первыми теориями было предположение, что на комету действуют силы сопротивления при движении в межзвездном веществе, причем сила такого сопротивления пропорциональна квадрату скорости кометы и обратно пропорциональна квадрату гелиоцентрического расстояния. Из-за действия этой силы эксцентриситет кометы e систематически убывает, среднее движение n получает при каждом обороте постоянное приращение, а в средней аномалии M появляется член, зависящий от квадрата времени:

$$\begin{aligned} M &= M_0 + n(t - t_0) + \frac{n'}{2}(t - t_0)^2, \\ n &= n_0 + n'(t - t_0), \\ e &= e_0 + e'(t - t_0), \end{aligned}$$

где $n' > 0$, $e' > 0$ — коэффициенты вековых возмущений среднесуточного движения и эксцентриситета. Но несмотря на то, что теория сопротивляющейся среды нашла свое подтверждение, Фридрих Бессель отметил, что комета, испуская вещество в радиальном направлении, будет испытывать ускорение, направленное от Солнца. Если выброс вещества происходит несимметрично относительно перигелия, то это будет приводить к уменьшению или увеличению периода обращения. В дальнейшем теория сопротивляющейся среды была окончательно опровергнута.

В 1950–1951 гг. Фред Уиппл предложил модель ледяного кометного ядра [4], согласно которой ядро состоит из замерзшей воды, углекислого газа, аммиака и других летучих веществ. Кроме того, предполагалось, что ядро кометы вращается вокруг своей оси, и при приближении к Солнцу под действием нагрева легкоплавкие вещества испаряются, что и вызывает реактивные силы. Так как орбиты комет вытянуты, то реактивные силы, вызывающие негравитационное ускорение, оказывают существенное воздействие только в небольшой области вблизи перигелия орбиты.

Есть два основных подхода учета негравитационных сил при построении численных теорий движения комет:

1) Ввод эмпирических величин, которые определяются вместе с параметрами орбиты при наблюдениях. При таком подходе опираются на один из вариантов: а) негравитационные силы действуют равномерно вдоль всей орбиты; б) изменение элементов происходит скачкообразно в момент прохождения перигелия. В 1950 году Дубяго [6, 7] сделал предположение, что изменение всех элементов орбиты вблизи перигелия происходит мгновенно. Величина таких изменений может быть определена через сравнение элементов орбиты с предшествующим и последующим появлением кометы. Развитием этой идеи стали работы Медведова [11, 12], в которых был предложен импульсный метод учета негравитационных эффектов в движении комет. Метод заключался в том, что предполагается мгновенное изменение вектора скорости кометы при прохождении через перигелий, а в остальных точках орбиты на кометы действуют только гравитационные силы.

2) Принятие некой физической модели действия негравитационных сил и определение из наблюдений параметров этой модели. Первым методом учета негравитационных сил, в основе которого лежала ледяная модель кометного ядра, явился метод Брайана–Марсдена. Предполагалось, что вследствие вращения ядра область активной сублимации не совпадала с направлением на Солнце — так называемое тепловое запаздывание. В результате этого реактивные силы изменяли скорость и направление вращения ядра.

Марсден предположил зависимость действия негравитационных сил от расстояния до Солнца, которая описывалась следующим образом:

$$F_i = A_i e^{-B_i \tau} g(r)$$

где r — гелиоцентрическое расстояние, F_i — компоненты негравитационного ускорения; A_i , B_i — постоянные; $\tau = \frac{t - t_0}{10^4}$ — время от начальной эпохи; $g(r)$ — функция, зависящая от физических свойств ядра кометы и гелиоцентрического расстояния. Таким образом, при построении теории движения совместно с параметрами движения необходимо определить A_i , B_i (где $i = 1$ для радиальной проекции вектора реактивного ускорения, $i = 2$ для трансверсальной, $i = 3$ для нормальной). Дальнейшим развитием стала модель Марсдена–Секанина, которая предполагала, что функция $g(r)$ симметрична относительно перигелия, одинакова для всех комет, величины A_i в момент определения постоянны.

Изменение параметров орбиты за один оборот (от $-\pi$ до $+\pi$ по истинной аномалии v) можно определить, исходя из формул:

$$\Delta a = \frac{2a^2}{\mu^2} \int_{-\pi}^{+\pi} r g(r) \left(\frac{r}{p} e A_1 \sin v + A_2 \right) dv,$$

Таблица 1. Значения негравитационных параметров в 10^{-8} а.е./сут², приведенные в каталоге кометных орбит Марсдена

Период, гг.	A_1	A_2
1906–1926	0,85	0,0267
1926–1945	0,66	0,0078
1945–1958	0,66	–0,0455
1958–1970	0,23	–0,0831
1970–1983	0,45	–0,1059
1983–1995	–0,03	–0,1127
1995–2010	0,04	–0,1073

Таблица 2. Эволюция основных параметров сближения кометы Швассмана–Вахмана 2

Номер сближения	p_1 , а.е.	t_{p1} , JD	p_2 , а.е.	t_{p2} , JD
1	0,179491 (0178900)	2424588,00 (2424591,75)	1,082180 (1,082461)	2423368,00 (2423369,25)
2	1,442954 (1,428624)	2408421,75 (2408581,75)	1,185674 (1,154477)	2406821,75 (2406824,75)
3	1,460663 (1,209761)	2385641,75 (2385746,75)	1,540422 (1,442760)	23838314,75 (2383826,75)
4	1,829086 (0,996603)	2369900,00 (2369146,75)	2,450096 (0,085716)	2367840,00 (2367984,875)

$$\Delta e = \frac{1}{\mu'^2} \int_{-\pi}^{+\pi} r^2 g(r) [A_1 \sin v + A_2 (\cos v + \cos E)] dv,$$

$$\Delta i = \frac{1}{\mu' p} \int_{-\pi}^{+\pi} r^3 g(r) A_3 \cos(v + \omega) dv,$$

$$\Delta \Omega = \frac{1}{\mu' p} \int_{-\pi}^{+\pi} r^3 g(r) A_3 \sin(v + \omega) \operatorname{cosec} i dv,$$

$$\Delta \omega = \frac{1}{\mu'^2 p} \int_{-\pi}^{+\pi} r^2 g(r) \left\{ \frac{1}{e} [-p A_1 \cos v + (r + p) A_2 \sin v] - r A_3 \sin(v + \omega) \operatorname{ctg} i \right\} dv,$$

$$\Delta M_0 = \frac{1}{\mu'^2 p} \int_{-\pi}^{+\pi} r^2 g(r) [p (\cos v - 2er) A_1 - (r + p) A_2 \sin v] dv,$$

где μ' — постоянная Гаусса; v и E — истинная и эксцентриская аномалии; p — параметр орбиты; a , e , Ω , ω , M — орбитальные элементы.

Для данной модели характерно то, что Δa и Δe зависят от A_2 , а результирующий эффект от A_1 за оборот равен нулю, поскольку $g(r)$ симметрична относительно перигелия. В результате этого предположение о вращении ядра становится обязательным, иначе A_2 тоже будет равным нулю (при отсутствии вращения отсутствует тепловое запаздывание).

Хотя методы Дубяго и Марсдена имеют свои недостатки и достоинства, тем не менее, оба дают близкие результаты как по точности представления наблюдений, так и по точности эфемериды. Однако, метод Марсдена оказался более удобным при вычислениях, он легко допускает модификации и позволяет интерпретировать характеристики кометного ядра через значения негравитационных эффектов.

Анализ значений негравитационных параметров A_i и B_i для комет привел к следующим выводам: 1) наиболее уверенно определяется параметр A_2 (трансверсальная составляющая ускорения), а наименее уверенно — A_3 ; поэтому обычно принимают, что $A_3 = 0$; 2) положительные и отрицательные значения для A_2 встречаются одинаково часто; это означает, что прямое и обратное вращение кометных ядер равновероятны; 3) из теории следовало, что радиальная составляющая негравитационных сил направлена к Солнцу, а значит, A_1 положительно, однако для ряда комет это не так, что противоречит теории Уиппла; 4) существуют кометы как с возрастающими, так и с убывающими негравитационными эффектами; 5) значение негравитационных параметров для одной кометы могут быть постоянными для всех появлений, изменяться регулярно или скачкообразно, а для некоторых комет в разные периоды могут быть все эти варианты; 6) для некоторых комет обнаружено изменение знака A_2 , что может быть объяснено изменением направления вращения ядра кометы (ярким примером может служить изменение негравитационных параметров для кометы Копфа).

Как видно из табл. 1, комета Копфа относится к группе комет с сильно изменяющимися со временем негравитационными параметрами. Это означает, что объединение всех появлений данной кометы с использованием одного набора негравитационных параметров приведет к большим ошибкам в представлении наблюдений.

Так как модель нуждалась в доработке, то были предприняты попытки ее улучшения в различных направлениях. Например, переход от симметричной функции $g(r)$ к несимметричной позволил отказаться от обязательного условия вращения ядра кометы, кроме того, в ряде случаев такой переход позволил связать негравитационные эффекты с изменениями блеска кометы. И хотя в ряде случаев получено

существенно лучшее представление наблюдений, однако при этом параметры A_i для разных комет значительно отличались, что не позволяло формально сравнивать негравитационные параметры данных комет.

Как уже было сказано, негравитационные параметры для различных комет могут быть постоянными, либо изменяться от появления к появлению. Возможными причинами таких изменений являются: уменьшение активности кометы из-за истощения летучих компонент поверхности ядра (в таком случае негравитационные параметры уменьшаются) или, наоборот, увеличение активности (что вызывает увеличение негравитационных параметров), изменение ориентации ядра из-за прецессии, столкновений с другими малыми телами. К сожалению, в данный момент не существует единой для всех комет зависимости негравитационных параметров от положения кометы на орбите, кроме того, долгосрочный прогноз движения может быть сделан только после учета всех гравитационных возмущений, анализа и сравнения различных моделей действия негравитационных сил и выбора модели, которая обеспечит наилучшее представление наблюдений.

В работах Н.Беляева и К.Ивановской [16], на примере комет Швассмана–Вахмана 2 и Хонда–Маркоса–Пайдушакковой, которые испытывали тесное сближение с Юпитером, было показано, что через достаточно большой промежуток времени, выбранный произвольно, расхождение между элементами орбит, вызванные негравитационными эффектами, могут достигать значительных величин (больше, чем ошибки вычислений). На основании этого Емельяненко [8, 9] был сделан вывод о необходимости учета негравитационных эффектов при исследовании динамики эволюции элементов орбит комет, испытывающих тесное сближение с Юпитером, а это привело к необходимости определить временной промежуток, на котором влиянием негравитационных сил на динамическую эволюцию элементов орбиты можно пренебречь.

Результаты показали, что сближения с Юпитером увеличивают расхождения между элементами орбит комет, вызванными негравитационными эффектами. В произвольный момент времени эти расхождения зависят от класса сближения: медленные сближения оказывают более значительное влияние, чем быстрые. Например, для кометы Швассмана–Вахмана 2 сравнение эволюции основных параметров сближения дает возможность оценить важность учета негравитационных эффектов и влияние на них Юпитера. В табл. 2 представлены численные значения, полученные для первого (p_1) и второго (p_2) сближений, а также моменты достижения этих сближений, в скобках указан вариант эволюции с учетом негравитационных сил. Как видно из табл. 2, расхождение параметров далеких сближений увеличиваются с каждым последующим сближением.

Анализ показал, что временной промежуток, на котором влиянием негравитационных сил на динамическую эволюцию элементов орбит комет можно пренебречь, включает как минимум два тесных быстрых сближения, но не более одного тесного медленного. Эта зависимость не может быть объяснена более долгим действием негравитационных сил на комету с медленным сближением, так как наблюдается при небольших различиях параметров негравитационных сил, а также потому, что на промежутке времени между сближениями негравитационные силы не учитывались. Было установлено, что оптимальным временем изучения является промежуток, который включает в себя два быстрых и одно медленное сближение.

В работе [10] была предпринята попытка построения численной теории с учетом новых наблюдений. Она предполагала, что в момент сближения кометы с Юпитером у нее изменились негравитационные ускорения из-за действующих в окрестности Юпитера дополнительных возмущений, таких как гипотетическое столкновение кометы с микрометеоритами в окрестности Юпитера.

3. ВЫВОДЫ

В настоящее время общепринято, что негравитационные эффекты в движении комет возникают в результате сублимации вещества (перехода вещества из твердой фазы в газообразную, минуя жидкую) с поверхности их ядер, которая является одним из важнейших свойств, выделяющих кометы из ряда других малых тел Солнечной системы и порождающих большое количество проблем при изучении их движения. Сублимация, вызываемая нагревом солнечной радиацией поверхностных слоев ядер комет, оказывает влияние на их движение, что необходимо учитывать при определении орбит. Сублимация вызывает несколько эффектов. Во-первых, реактивное давление на поверхность кометных ядер, которое, в свою очередь, изменяет их поступательно-вращательное движение. Во-вторых, в результате сублимации изменяются химический состав поверхностных слоев, а также масса и форма кометных ядер. В-третьих, в результате сублимации вещества с поверхности комет в их комы выносятся большое количество газа и пыли. Это вещество окружает ядра достаточно плотными облаками, центры яркости которых далеко не всегда совпадают с ядрами комет. Это может приводить к систематическим отклонениям в позиционных наблюдениях, которые могут интерпретироваться как негравитационные ускорения, что, в свою очередь, приводит к ненадежному определению элементов движения таких комет.

1. Андриенко Д.А., Карпенко А.В. Физические характеристики комет 1981–1985 гг. — К., 1993.
2. Белоусов А.А. Численная теория движения кометы Темпель 1 с учетом результатов космической миссии Deep Impact // Труды ИПА РАН. — 2006. — вып. 14. — С. 199–209.
3. Бондаренко Ю.С., Медведев Ю.Д. Долгосрочные численные теории движения комет // *Астрономический Вестник*. — 2010. — **44**, № 2. — С. 158–166.
4. Всехсвятский С.К. Физические характеристики комет. — М.: Гос. изд-во. физ.-мат. литературы, 1958. — 575 с.
5. Всехсвятский С.К., Ильчишина Н.И. Физические характеристики комет 1965–1970 гг. — М.: Наука, 1974.
6. Дубяго А.Д. Движение короткопериодической кометы Брукса 2 с 1883 по 1946 гг. // *Уч. записки Казанск. унив.* — 1950. — **110**. — С. 5–8.
7. Дубяго А.Д. О вековом ускорении движения короткопериодических комет // *Астрон. журн.* — 1948. — **25**. — С. 361–368.
8. Емельяненко Н.Ю. Анализ влияния негравитационных эффектов // *Комет. Циркуляр*. — 1990. — № 411. — С. 11–12.
9. Емельяненко Н.Ю. Влияние негравитационных сил на эволюцию орбит комет, тесно сближающихся с Юпитером // *Кинематика и физика небесных тел*. — 1995. — **9**, № 5. — С. 22–26.
10. Огнева О.Ф. Движение комет, сближающихся с Юпитером: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — Ярославль, 2007.
11. Медведев Ю.Д. Определение орбит комет, имеющих сближения с планетами: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — Ленинград, 1986.
12. Медведев Ю.Д. Эффекты сублимации в орбитальном и вращательном движении кометного ядра: дисс. ... докт. физ.-мат. наук. — СПб., 1995.
13. Маковер С.Г. Комета Энке–Баклунда. Сообщение первое. Движение за 1937–1951 гг. // *Труды ИТА*. — 1955. — Вып. 4.
14. Савченко В.В. Теория движения кометы Галлея // *Кометный циркуляр* — 1982. — № 311.
15. Чернетенко Ю.А. Движение кометы Энке: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — ГАО РАН, СПб., 1992.
16. Belyaev N.A., Ivanovskaya K.P. Influence of non-gravitational forces on the orbital evolution of the short-period comets // *Dyn. comets, origin and evolution: Proc 83rd Colloq., Rome, 11–15 June, 1984*. — Dordrecht: Reidel, 1985. — P. 371–379.

Поступила в редакцию 30.11.2011