

DYNAMICAL EVOLUTION OF THE NEAR PARABOLIC COMETS TO HALLEY-TYPE ORBITS ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПОЧТИ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ КОМЕТ НА ОРБИТЫ ГАЛЛЕЕВСКОГО ТИПА

E.E. Biryukov

Department of Computation and Celestial Mechanics, South-Ural State University
pr. Lenina, 76, Chelyabinsk 454080 Russia, *caesare@susu.ac.ru*

ABSTRACT. The capture of comet from the near parabolic flux of the Oort cloud to Halley-type orbits ($P < 200$ yr, perihelion distanses $q < 1,5$ AU, and Tisserand parametr $T < 2$) is investigatet. Two types of capture into Halley-type orbits are found. We show that probability of capture HTC from the near-parabolic flux has the strong dependence on Galactic perturbation. We also show the essential influence of secular perturbations on dynamical evolution of comets in planetary region.

Key words: Oort Cloud, Halley-type comets, Planetary pertubations

орбит к планетной области и переходу комет на короткопериодические орбиты. В 1999 году Емельяненко [5] получил, что захват комет на галлеевские орбиты из почти параболического потока проходит через продолжительную промежуточную стадию кентавров. В работах [6,7,8] оценивалась функция распределения наклона орбит комет галлеевского типа, захваченных из почти параболического потока. Однако, несмотря на обилие работ, посвященных исследованию комет галлеевского типа, до сих пор в научной литературе отсутствует описание процесса захвата комет галлеевского типа.

1. Введение

Исследование захвата комет из почти параболического потока на орбиты галлеевского типа занимает важное место в изучении этого класса комет, поскольку позволяет лучше понять природу комет и динамическую историю Солнечной системы. До сих пор исследование самого процесса захвата остается актуальным. Например, Казимирчак-Полонской [1,2] были рассмотрены тесные сближения почти параболических комет с планетами-гигантами и получены новые интересные результаты, касающиеся анализа возможного влияния тесных возмущений на орбиты комет. В своих работах Казимирчак-Полонская убедительно показала, что при исследовании долговременной эволюции малых тел следует учитывать реальные динамические особенности движения комет и планет. Штейнсом [3,4] был описан механизм малых почти случайных возмущений от планет-гигантов на орбиты почти параболических комет, что приводит к постепенному подтягиванию кометных

2. Модель

Для исследования было взято 50.000 объектов на почти параболических орбитах из внешнего облака Оорта, распределенных случайным образом. Большие полуоси распределены равномерно в пределах (10000, 30000 а.е.). Наклоны орбит равномерно по $\cos(i)$ в пределах (-1,1), аргументы перигелия и восходящего узла равномерно распределены по i в пределах (0° , 360°). Первоначальные перигелийные расстояния находились внутри планетной области, которая была разбита на 5 промежутков: (0, 4 а.е.), (4, 6 а.е.), (6, 10,5 а.е.), (10,5, 18 а.е.), (18, 31 а.е.). В каждой области по 10000 орбит с равномерным распределением перигелийных расстояний в пределах каждого промежутка. В начальный момент времени положение объектов на орбитах определялось случайным образом путем задания равномерного распределения расстояния от кометы до Солнца в пределах (50,500 а.е.). Прослеживалась динамическая эволюция этих объектов за время $4,6 \cdot 10^9$ лет, что соответствует предполагаемому времени жизни Солнечной системы.

3. Результаты

В работе [9] было показано, что имеется два различных механизма или типа захвата комет из почти параболического потока с первоначальными перигелиями орбит, расположенными внутри планетной области ($c q < 31$ а.е.), на короткопериодические орбиты.

3.1. *a*-захват

Первый способ захвата комет на орбиты галлеевского типа, который можно назвать *a*-захват, заключается в том, что объекты из облака Оорта на первом этапе динамической эволюции захватываются на короткопериодические орбиты. Впоследствии происходит уменьшение перигелийных расстояний, и кометы попадают на галлеевские орбиты. Данному типу захвата подвержены кометы со значением перигелийного расстояния орбит $q > 1,5$ а.е.

Было получено, что число оборотов комет вокруг Солнца до захвата их на короткопериодические орбиты сильно зависит от первоначального значения перигелийного расстояния орбит.

Для объектов из первой и пятой областей среднее число оборотов захвата почти параболических комет на короткопериодические орбиты различается на три порядка. Кометы из первой области первоначальных перигелийных расстояний переходят на короткопериодические орбиты в среднем через 650 оборотов вокруг Солнца, из пятой – через 165000 оборотов. Поскольку коэффициенты диффузии элементов орбит сильно зависят от перигелийного расстояния почти параболических комет [3,4], использование диффузионного процесса для описания захвата комет на короткопериодические орбиты является неплохим. Необходимо отметить, что под диффузионным механизмом или механизмом диффузии Штейнса следует понимать малые почти случайные возмущения от планет.

Кроме диффузионного механизма в захвате комет из почти параболического потока принимают участие другие механизмы (тесные сближения с планетами, возмущения от Галактики). В частности, в отсутствии тесных сближений с планетами, сильное влияние на почти параболические кометы оказывают возмущения от Галактики. В работах [6,10,11,12] было получено, что возмущения от Галактики способны играть значительную роль в эволюции комет на почти параболических орбитах. Например, один объект из пятой области перешел на короткопериодическую орбиту очень быстро - всего за 200 оборотов. При этом изменение перигелийного расстояния орбиты кометы q составило 14,63 а.е., что невозможно объяснить влиянием только диф-

фузионного механизма Штейнса. Такое быстрое и сильное изменение перигелийного расстояния вызвано возмущениями от Галактики. На рис.1 представлена эволюция элементов орбит a и q другой кометы на первых этапах динамической эволюции.

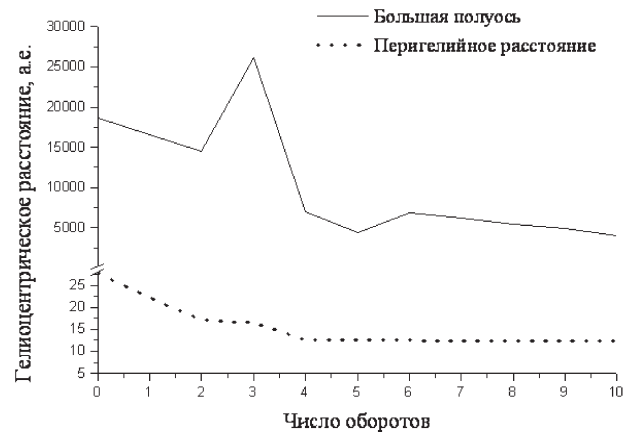


Рис. 1: Динамическая эволюция почти параболической кометы на первых оборотах вокруг Солнца.

На первом и втором оборотах, в результате диффузии большая полуось орбиты кометы сократилась с $1,6 \cdot 10^4$ а.е. до 10^4 а.е. и произошло постепенное уменьшение перигелийного расстояния на $\Delta q \approx 5$ а.е. под действием возмущений от Галактики. На последующих оборотах комета практически не испытывала возмущений со стороны планет-гигантов, и значение большой полуоси оставалось 10^4 а.е.. Для этого значения большой полуоси орбиты кометы галактические возмущения практически не вызывают изменения q . На 8 обороте в результате возмущений со стороны планет-гигантов комета перешла на орбиту со значением $\sim 2,5 \cdot 10^4$ а.е.. Изменение перигелийного расстояния орбиты кометы пропорционально квадрату большой полуоси и на 9 обороте оно составило $\Delta q \approx 5$. На 10 обороте комета оказалась на орбите с перигелийным расстоянием ~ 11 а.е., в результате возмущений от планет-гигантов большая полуось орбиты сократилась до $a < 10^4$ а.е., последующая динамическая эволюция кометы проходила без ощутимого влияния возмущений от Галактики и перигелийное расстояние орбиты кометы почти не менялось.

Практически у всех комет в момент захвата на короткопериодические орбиты значения больших полуосей $a > 29,5$ а.е., это свидетельствует о том, что происходило постепенное накапливание кометами случайных возмущений со стороны планет-гигантов и кометные орбиты постепенно подтягивались к планетной области. Только 6 комет были захвачены на короткопериодические орбиты со значением больших полуосей меньше 20 а.е. Эти

объекты захвачены на короткопериодические орбиты вследствие тесных сближений с планетами-гигантами [1,2], поскольку для этих комет изменение большой полуоси за один оборот составило более 15 а.е., что невозможно в случае диффузии. У двух комет с перигелием вблизи орбиты Урана произошла реверсия линии апсид, описанная в работе Казимирчак-Полонской [2]. Например, одна из комет до сближения двигалась по орбите с $a = 300,67$ а.е., $q = 18,918$ а.е., после сближения с Ураном - $= 17,14$ а.е., $q = 11,905$ а.е. Как было отмечено самой Казимирчак-Полонской, это очень редкое явление.

Таким образом, при а-захвате кометы из облака Оорта попадают в планетную область с помощью диффузионного механизма Штейнса [3,4]. Благодаря возмущениям от Галактики происходит уменьшение перигелийных расстояний орбит и кометы переходят во внутреннюю планетную область, где более сильные возмущения от планет. Имеют место и довольно редкие тесные сближения комет с планетами - гигантами.

Рассмотрим второй этап а-захвата почти параболических комет на галлеевские орбиты - трансформации короткопериодических комет в галлеевские, - на примере динамической эволюции одной кометы. На движение комет в планетной области важную роль играют вековые возмущения.

На рис. 2а представлена динамическая эволюция объекта, испытавшего а-захват. У этого объекта первоначальное значение перигелийного расстояния было равно 23,2 а.е. Этому объекту потребовалось совершить всего 233 оборота вокруг Солнца для захвата на короткопериодическую орбиту. Это вызвано тем, что в результате галактических возмущений у объекта произошло уменьшение перигелийного расстояния орбиты до 5,3 а.е.. Под действием возмущений от Юпитера объект очень быстро эволюционировал на короткопериодическую орбиту. В момент времени $12,9 \cdot 10^6$ лет объект попал на орбиту резонанса 1:4 с Юпитером, на которой просуществовал 10^5 лет. В момент времени $13,08 \cdot 10^6$ лет объект был захвачен на орбиту соизмеримости 2:3 (= 6,8 а.е) с Юпитером на которой просуществовал 50000 лет. В момент времени $13,08 \cdot 10^6$ лет и $13,15 \cdot 10^6$ лет у кометы произошло резкое уменьшение наклона орбиты до 15° , после чего в момент времени $13,18 \cdot 10^6$ лет комета перешла на обратную орбиту. На данном интервале времени имеет место вековой резонанс ν_5 . На интервале времени $12,9 \cdot 10^6$ лет - $13 \cdot 10^6$ комета движется по резонансной орбите соизмеримости среднего движения 1:4 с Юпитером. Судя по поведению кривой на диаграмме $q - \omega$ (рис.2 б), на этом интервале времени имеют место вековые осцилляции. Не смотря на то, что вековые возмущения много слабее орбитальных резонансов, можно обнаружить довольно сильные вековые ос-

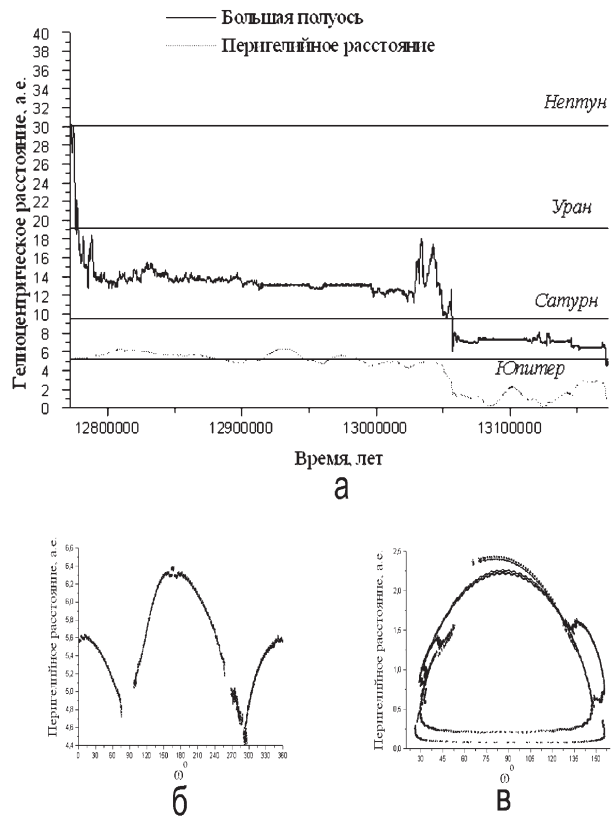


Рис. 2: Динамическая эволюция элементов орбиты кометы, испытавшей а-захват. а: эволюция a и q ; б: резонанс 1:4 с Юпитером на интервале времени $12,9 \cdot 10^6$ лет - $13,0 \cdot 10^6$ лет, диаграмма $q - \omega$; в: резонанс 2:3 с Юпитером на интервале времени $13,14 \cdot 10^6$ лет - $13,19 \cdot 10^6$ лет, диаграмма $q - \omega$

цилляции перигелийного расстояния орбиты кометы. Необходимо отметить, что комета выходила из зоны резонанса в момент времени $12,949 \cdot 10^6$ лет и вернулась на резонансную орбиту в момент времени $12,961 \cdot 10^6$ лет (рис.2), однако вековые осцилляции не сохранились на этом интервале времени.

На интервале времени $13,14 \cdot 10^6$ лет - $13,19 \cdot 10^6$ лет, комета двигалась вблизи орбитального резонанса 2:3 с Юпитером ($a = 6,81$ а.е.). Движение сопровождается вековыми либрациями. Анализ рис. 2а и рис.2в показывает, что, несмотря на то, что комета выпадала из зоны орбитального резонанса с Юпитером, диаграмма $q - \omega$ практически не искажалась, что привело к тому, что комета очень быстро опять вернулась на орбиту резонанса среднего движения.

Таким образом, захват на галлеевские орбиты состоит из двух стадий. На первой стадии динамической эволюции кометы захватываются на короткопериодические орбиты. Захват на короткопериодические орбиты осуществляется в результате планетных возмущений с помощью либо диффузионного

механизма Штейнса [3,4], либо механизма тесных сближений Казимирчак-Полонской [1,2]. Возмущения от Галактики переводят почти параболические кометы вглубь планетной области, где они попадают под влияние Юпитера.

После захвата на короткопериодические орбиты, кометы, в результате возмущений от планет - гигантов, постепенно подтягиваются к внутренней части планетной области и переходят на галлеевские орбиты. Причем для данной стадии динамической эволюции комет характерны сильные вековые возмущения. Среднее время трансформации короткопериодических орбит в галлеевские составляет $\sim 10^6$ лет. Основное значение в захвате комет с короткопериодических орбит на орбиты галлеевского типа принадлежит Юпитеру. Захват на галлеевские орбиты происходит следующим образом:

1. Кометы захватываются на короткопериодические орбиты с перигелийным расстоянием за орбитой Юпитера. В результате вековых возмущений происходят осцилляции перигелийного расстояния орбит комет. Это приводит к тому, что орбита кометы может оказаться вблизи орбиты Юпитера, который переводит ее на орбиту с меньшим значением перигелийного расстояния и постепенно переводит на галлеевскую орбиту. На этом этапе вековые возмущения продолжают оказывать влияние на динамическую эволюцию комет. Захват происходит без тесных сближений комет с Юпитером.
2. Кометы захватываются из облака Оорта на короткопериодические орбиты с перигелием вблизи орбиты Юпитера. Кометы практически сразу оказываются под сильным влиянием Юпитера. Переход на галлеевские орбиты происходит либо в результате тесных сближений с Юпитером, либо, в результате механизма диффузии в сочетании с вековыми возмущениями.
3. Возможно диффузионное изменение перигелийного расстояния орбит короткопериодических комет. Однако скорость изменения q очень мала. Если исключить влияние вековых возмущений и тесных сближений с планетами, в результате диффузионных изменений перигелийных расстояний кометы окажутся на галлеевских орбитах не ранее чем через 5000 оборотов. В работе [9] было получено, что перейти на галлеевские орбиты могут только те кометы, у которых значение перигелийного расстояния в момент захвата на короткопериодические орбиты было $q < 13$ а.е..

Таким образом, процесс перехода комет с короткопериодических орбит на галлеевские происходит очень медленно, через промежуточные динамические стадии движения комет на орбитах резонансов

с планетами - гигантами (вековые резонансы, резонансы среднего движения), и на орбитах, вековых либраций и осцилляций. Вековые возмущения играют важную роль в динамической эволюции короткопериодических орбит, в том числе и комет галлеевского типа [13]. Вековые возмущения способствует сохранению комет на орбитах, с которых возможен захват на орбиты галлеевского типа. Благодаря тесным сближениям с планетами - гигантами кометы могут быстро переходить к области орбит галлеевского типа. Например, как следует из анализа рисунка 2а. комета достаточно долго двигался на орбитах резонансов, пока в результате тесного сближения с Юпитером у него не произошло резкое уменьшение перигелийного расстояния орбиты с 5,2 а.е. до 2 а.е.

3.2 q - захват

При q -захвате на первом этапе динамической эволюции кометы переходят на орбиты с малым перигелийным расстоянием ($q < 1,5$ а.е.). Захват комет происходит очень быстро по причине сильного влияния возмущений от Галактики, способных перевести перигелии кометных орбит глубоко в планетную область. В результате чего кометы очень быстро оказываются на орбитах с малым значением перигелийного расстояния, где очень сильны возмущения от Юпитера.

На втором этапе динамической эволюции в результате возмущений от Юпитера орбиты комет трансформируются в галлеевские. На этом этапе действует классический механизм диффузии больших полуосей Штейнса [3,4]. Перигелийные расстояния орбит практически не меняются. Уменьшение больших полуосей орбит комет происходит очень быстро по причине сильных возмущений от Юпитера. По этой причине очень мало комет захватывается на галлеевские орбиты таким способом. Почти все кометы, оказавшиеся на орбитах с $q < 1,5$ а.е. выбрасываются на гиперболические орбиты. Вековые возмущения для данного способа захвата не характерны. Они реализуются в том случае, если кометы движутся вблизи галлеевских орбит. Совместное действие возмущений от Галактики и Юпитера обеспечивает относительно быстрый захват комет на галлеевские орбиты с помощью этого способа. Среднее время захвата на галлеевские орбиты как с помощью a - захвата, так и с помощью q - захвата одного порядка. Однако среднее количество оборотов, необходимое для a - захвата на галлеевскую орбиту примерно в 25 раз больше, чем для q - захвата. Это объясняется тем, что кометы, попадающие на галлеевские орбиты с помощью q - захвата продолжительное время остаются на сильно эллиптических орбитах с боль-

шим периодом обращения вокруг Солнца. С другой стороны, короткопериодические кометы переходят на орбиты галлеевского типа в среднем за 10^6 лет, в то время как кометы, захваченные на орбиты с $q < 1,5$ а.е., переходят на галлеевские орбиты за 10^5 лет, поскольку при а-захвате трансформация короткопериодических орбит в галлеевские сопровождается продолжительным движением на орбитах резонансов и вековыми либрациями и осцилляциями.

4. Заключение

Таким образом, существует два способа захвата комет из почти параболического потока на орбиты галлеевского типа, которые можно назвать — и q —. Эти способы захвата отличаются не только скоростью захвата на орбиты галлеевского типа, но и разными динамическими механизмами, работающими при захвате: механизм диффузии, тесные сближения с планетами-гигантами, вековые либрации и резонансы, резонансы среднего движения. Мы показали, что вековые возмущения оказывают заметное влияние на динамическую эволюцию комет и способствуют переводу орбит короткопериодических комет с перигелиями во внешней планетной области в область малых перигелиев.

Благодарности. Выражаю благодарность В.В. Емельяненко за обсуждение и ценные рекомендации. Работа поддержана грантом РФФИ 06-02-16512.

Литература

- Казимирчак-Полонская Е.И.: 1978, *Астрономия и небесная механика*, **7**, 340.
 Казимирчак-Полонская Е.И.: 1978, *Астрономия и небесная механика*, **7**, 384.
 Штейнс К.А.: 1961, *АЖ*, **38**, 107.
 Штейнс К.А.: 1964, *Уч. Зап. Латв. Гос. Унив.*, **68**, 39.
 Emel'yanenko V.V.: 1999, *in: Evolution and Source Regions of Asteroids and Comets*, **Proc. IAU Coll.** **173**, 339.
 Levison H.F., Dones L., Duncan M.J.: 2001, *AJ*, **121**, 2253.
 Levison H.F., Morbidelli A., Dones L., et al.: 2002, *Science*, **296**, 2212.
 Napier W.M., Wickramasinghe J.T., Wickramasinghe N.C.: 2004, *MNRAS*, **355**, 191.
 Бирюков Е.Е.: 2007, *Астрон.В.*, **41**, 232.
 Byl J.: 1983, *The Moon and Planets*, **29**, 121.
 Byl J.: 1986, *Earth, Moon and Planets*, **36**, 262.
 Duncan M., Quinn T., Tremaine, S.: 1987, *AJ*, **94**, 1330.
 Bailey M.E. and Emel'yanenko V.V.: 1996, *MNRAS*, **278**, 1087.