

# РЕЗОНАНСНЫЕ ТРАНСНЕПТУННЫЕ ОБЪЕКТЫ КАК ИСТОЧНИК КОМЕТ СЕМЕЙСТВА ЮПИТЕРА

*Е.Л. Киселёва*

Обсуждается динамическая взаимосвязь резонансных объектов транснептуновой зоны и короткопериодических комет. Исследование основано на модели, предполагающей формирование семейства резонансных объектов в процессе миграции планет. Динамика объектов этой популяции рассчитывалась в течение  $4,5 \cdot 10^9$  лет. Исследование базируется на долговременном симплектическом интегрировании уравнений движения объектов. Показано, что многие объекты захватываются во внутреннюю часть Солнечной системы. Получено, что доля объектов из резонанса 2/3, проникающих в год на орбиты комет семейства Юпитера с перигелийными расстояниями менее 2,5 а.е., составляет  $0,4 \cdot 10^{-10}$ . Резонансные объекты, захваченные в планетную область, дают лучшее соответствие наблюдаемому распределению элементов орбит кентавров, чем соответствующие транснептунные объекты на орбитах с большими эксцентриситетами.

## Введение

Динамические и физические характеристики короткопериодических комет предполагают, что источником этих малых тел является внешняя часть Солнечной системы. Весьма актуальным в связи с этим становится изучение динамики малых тел транснептуновой области, включая исследование миграции этих тел в планетную область.

Первые предположения о происхождении короткопериодических комет были связаны с облаком Оорта. Позднее, в 1980 году, в качестве источника комет семейства Юпитера был предложен пояс Койпера [1]. В некоторых из работ [2, 3] предполагалось, что доминантным источником КСЮ являются объекты на орбитах с большими эксцентриситетами. В том числе, в работе [3] было получено, что доля объектов из резонанса 2/3, проникающих в год на орбиты комет семейства Юпитера с перигелийными расстояниями менее 2,5 а.е., составляет  $0,3 \cdot 6 \cdot 10^{-10}$ .

Механизм захвата транснептунных объектов на орбиты комет семейства Юпитера был описан в работах [2, 3]. Эти исследования показали, что тела из транснептуновой зоны проникают во внутреннюю часть Солнечной системы в результате постепенной эволюции через всю планетную область. Таким образом, на пути из внешней части Солнечной системы к кометам семейства Юпитера малые тела проходят через промежуточный класс кентавров, чьи перигелии располагаются между орбитами Юпитера и Нептуна. В работе [4] было показано, что существует два перекрывающихся динамических класса кентавров, один из которых произошел из облака Оорта, а другой - из класса объектов на орбитах с высокими эксцентриситетами. Распределения элементов орбит, полученные при исследовании двух механизмов происхождения КСЮ, не дают полного соответствия наблюдаемому распределению.

Начальный этап перехода транснептунных объектов в планетную область связан с большими возмущениями их орбит Нептуном. Захвату подвергаются объекты, чьи орбиты подходят к орбите Нептуна. Распределение объектов с перигелиями в окрестности Нептуна, наблюдавшихся не менее чем в двух оппозициях, показывает, что они подразделяются на два класса: объекты на орбитах с большими эксцентриситетами и резонансные. Предполагается, что темп захвата резонансных объектов мал вследствие устойчивости резонансного движения по отношению к возмущениям от Нептуна [5, 6]. В одной из работ [5] было показано, что плутиносы могут выводиться из резонанса под действием механизма хаотической диффузии, и после сближения с гигантскими планетами переходят на орбиты КСЮ.

В данной работе предпринята попытка рассмотреть особенности динамической эволюции резонансных объектов транснептуновой области и, таким образом, оценить эти объекты как возможный источник малых тел, захватываемых во внутреннюю часть Солнечной системы. Необходимо отметить, что орбиты наблюдаемых резонансных объектов на данный момент известны недостаточно точно для того, чтобы делать окончательные заключения о скорости захвата таких

объектов. Однако мы можем исследовать орбиты объектов, захваченных в резонанс при миграции Нептуна на стадии формирования внешней части Солнечной системы, и надежно оценить темп захвата резонансных объектов в планетную область. Исследование основывается на долговременном симплектическом интегрировании уравнений движения объектов, захваченных в резонанс при миграции Нептуна на стадии формирования внешней части Солнечной системы.

### Модель Миграция

Мы проверяем гипотезу, согласно которой Нептун мигрировал наружу на несколько астрономических единиц во время формирования внешней части Солнечной системы и, таким образом, способствовал появлению резонансной популяции в поясе Койпера [7]. Подчеркнем, что в данной работе не учитывалось взаимодействие между частицами.

Параметры моделирования были идентичны тем, которые приводились в работе [7]. Начальные большие полуоси 1000 тестируемых частиц были расположены в интервале от 27 до 42 а.е. Таким образом, все эти объекты являются потенциальными кандидатами на захват в резонанс 2/3. Мы рассмотрели 4 модели. В них начальные эксцентриситеты  $e$  и наклоны  $i$  объектов были распределены следующим образом: 0 и 0,001, 0 и 0,01, 0 и 0,05, и 0 и 0,1 для каждой из 4 моделей соответственно. Величины аргумента перигелия  $\omega$ , долготы восходящего узла  $\Omega$  и средней аномалии  $M$  были взяты распределенными случайным образом в интервале между 0 и  $2\pi$ .

Большие полуоси каждой из планет изменялись в соответствии со следующей формулой:  $a(t) = a_f - \Delta a \exp(-t/\tau)$ , где параметр миграции  $\tau = 10^6$  лет. Были взяты следующие начальные и конечные большие полуоси планет  $(a_i, a_f)$ : (5,21; 5,2), (9,5; 9,53), (14,5; 19,19), (21,3; 30,06) для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна соответственно.

Результаты моделирования для объектов резонанса 2/3 во всех четырех моделях оказались приблизительно равными (за исключением вероятности захвата) и соответствуют тем, что были приведены в подобной работе [7]. Мы обнаружили, что в случае четвертой модели, где рассматривался динамически возбужденный начальный диск частиц, вероятность захвата в резонанс 2/3 меньше чем в остальных, однако распределение наклонов в этом случае хорошо соответствует наблюдаемому.

### Долговременная эволюция

В зоне резонанса 2/3 к концу миграции планет по модели 4 находилось 332 объекта. Для их исследования было проведено симплектическое интегрирование уравнений движения [8] на промежутке 4,5 млрд лет. При этом учитывались возмущения от Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Для каждой из частиц вычисления прекращались при достижении орбиты с  $q < 2,5$  а.е. или  $a > 1000$  а.е..

### Результаты

Исследование долговременной эволюции объектов из резонанса 2/3 в планетную область проводилось и ранее [5], но рассматривались, как правило, равномерные распределения элементов орбит объектов, покрывающие всю резонансную зону с малыми амплитудами либрации. Таким образом, не учитывались особенности происхождения резонансной популяции, вследствие которых у объектов появляются специфические динамические свойства.

Как упоминалось выше, выход из резонанса происходит вследствие действия механизма хаотической диффузии [5], после чего объект захватывается в планетную область. В результате нашего исследования было получено, что к концу интегрирования на орбитах резонанса 2/3 осталось 44 объекта из 332. Таким образом, можно утверждать, что за время существования Солнечной системы резонансные зоны транснептуновой области истощились приблизительно в 10 раз. Необходимо отметить, что мы не получили «стабильных» орбит, описанных Морбиделли [5]. Поэтому мы можем предполагать, что со временем резонансная популяция 2/3 истощится полностью.

Из 44 объектов, сохранившихся в резонансе 2/3 за время жизни Солнечной системы, 5 находились в этой области еще до начала миграции планет. У этих объектов за время миграции увеличились эксцентриситеты, однако далее их элементы орбит не претерпели значительных изменений. В соответствии с нашей моделью можно говорить о том, что 0,5% наблюдаемых ныне в резонансе 2/3 объектов всегда находились на этих орбитах.

Еще 6 объектов в конце интегрирования имели большие полуоси, соответствующие периферии резонансной зоны, где устойчивость орбит крайне мала. Однако они находились на почти круговых орбитах, что и защитило их от сближения с Нептуном. Эти объекты попали на круговые орбиты еще во время миграции планет, и сохранились на них в течение времени жизни Солнечной системы. Существование подобных орбит противоречит результатам работы [5], поскольку им было получено, что скорость динамического выброса объектов с подобными элементами орбит является максимальной.

На рис. 1-3 представлены распределения элементов орбит объектов из резонанса 2/3 в начале долговременной эволюции, на момент окончания интегрирования, а также наблюдаемое распределение.

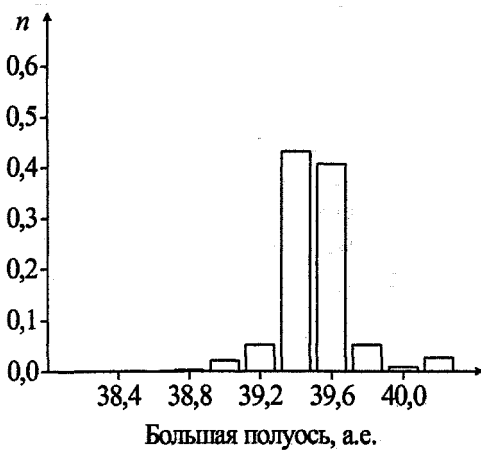


Рис. 1. Распределение больших полуосей объектов резонанса 2/3 в момент окончания миграции Нептуна



Рис. 2. Распределение больших полуосей объектов резонанса 2/3 после долговременной эволюции

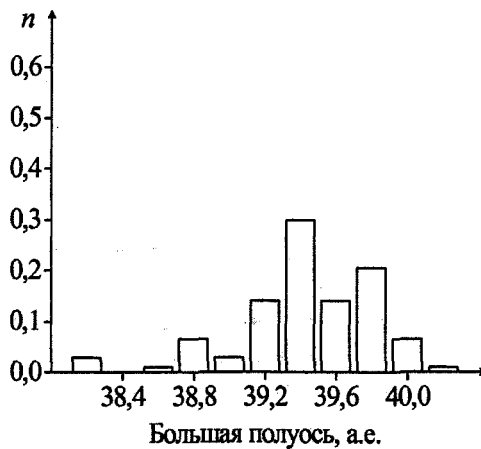


Рис. 3. Распределение больших полуосей наблюдаемых объектов резонанса 2/3

### Захват объектов резонанса 2/3 на орбиты КСЮ

Как было упомянуто выше, на пути из внешней части Солнечной системы к кометам семейства Юпитера малые тела проходят через промежуточный класс кентавров Мы исследовали орбитальное распределение Кентавров, произошедших из резонанса 2/3 и сравнили его с наблюдаемым. Наблюдаемые объекты составляют выборку из многочисленного семейства объектов, имеющих различные элементы орбит и разные шансы обнаружения. Поэтому должны быть учтены эффекты наблюдательной селекции в открытии объектов с различными орбитами и звездными величинами. В работе [4] была разработана специальная методика, учитывающая вероятность попада-

ния далеких объектов в узкую полосу служб поиска вблизи эклиптики, распределение транснептуновых объектов по размерам и эффективность обнаружения объектов с различным блеском.

Распределение по большим полуосям показывает, что основная часть Кентавров, произошедших из резонанса  $2/3$  (рис. 4), расположена в интервале (20; 60) а.е., что лучше соответствует наблюдаемому распределению (рис. 5), чем в случае захвата транснептуновых объектов, расположенных на орбитах с большими эксцентриситетами. В распределении по перигелийным расстояниям обнаружилось расхождение в области высоких перигелиев. Это объясняется возможной кометной активностью кентавров на относительно малых расстояниях от Солнца [4].

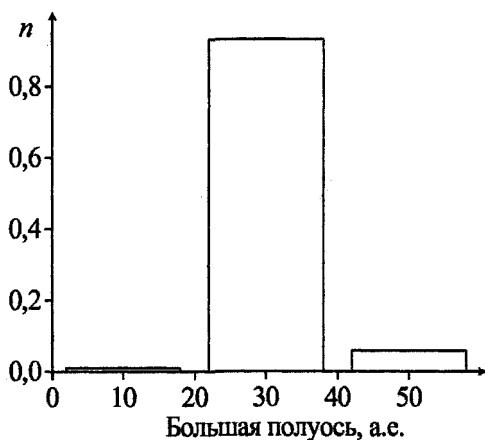


Рис. 4. Распределение кентавров, захваченных из резонанса  $2/3$ , по большим полуосям

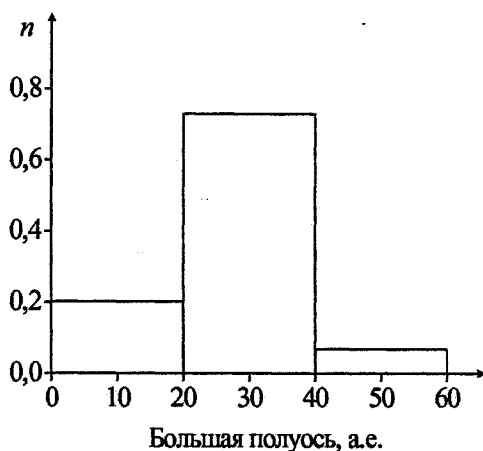


Рис. 5. Распределение наблюдаемых кентавров по большим полуосям

#### Распределение наклонов комет семейства Юпитера

На рис. 6 показано распределение наклонов и параметра Тиссерана для объектов, которые эволюционировали на орбиты с  $q < 2,5$  а.е. с орбит резонанса  $2/3$ . Распределение наклонов согласуется с наблюдаемым для комет семейства Юпитера. Отметим, что многие объекты имеют параметр Тиссерана  $T \sim 2,9$ . Это значение больше, чем те, что были получены при исследовании захвата объектов с орбит с высокими эксцентриситетами ( $\Gamma \sim 2,6$  [3]) и с орбит из облака Оорта[4].

#### Темп захвата на короткопериодические орбиты

На рис. 7 представлен график зависимости числа сохранившихся в резонансе  $2/3$  частиц  $N_{2/3}$  от времени  $t$  в последние два миллиарда лет. Производная от функции  $N_{2/3}(t)$  дает в точности скорость захвата объектов на короткопериодические орбиты. Наши исследования показали, что изменение количества частиц в резонансе  $2/3$  со временем описывается функцией вида:

$$N_{2/3}(t) = A + B \exp(-t/C).$$

Окончательно, результат представляется в виде:

$$N_{2/3}(t) = 39 + 218 \cdot \exp(-t/1180).$$

Этот результат отличается от того, который был получен в исследовании [5]; это опять же свидетельствует об особенных динамических свойствах орбит, произошедших путем захвата в резонанс.

Вычисление доли объектов  $\lambda_{jf}$ , проникающих в год на орбиты комет семейства Юпитера с перигелийными расстояниями менее 2,5 а.е. из резонанса  $2/3$ , было проведено по методике работы [3]. Согласно этой методике

$$\lambda_{jf} = \frac{P}{N_{2/3}} \frac{dN}{dt},$$

где  $P$  - вероятность захвата короткопериодических комет с орбит Кентавров. Мы получили, что эта оценка составляет  $0,4 \cdot 10^{-10}$  комет в год, что аналогично оценке для объектов с орбит с высокими эксцентриситетами.

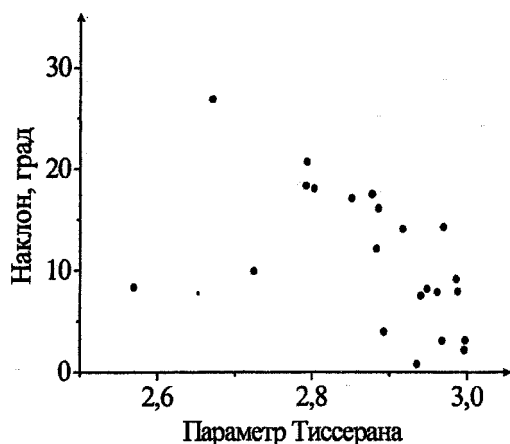


Рис. 6. Распределение параметров Тиссерана и наклонов для объектов, которые были захвачены на орбиты КСЮ из резонанса 2/3

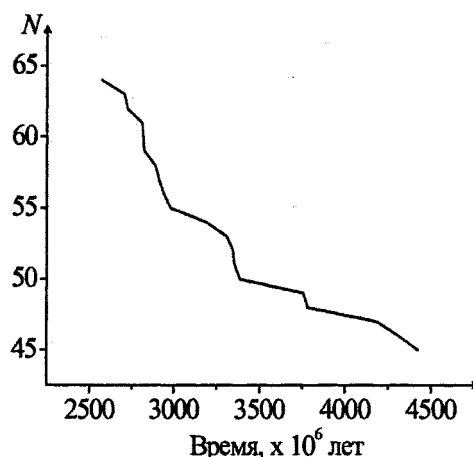


Рис. 7. График зависимости числа сохранившихся в резонансе 2/3 частиц  $N_{2/3}$  от времени

### Заключение

В работе изучалась динамическая взаимосвязь резонансных объектов транснептуновой зоны и короткопериодических комет. Исследование основано на модели, предполагающей формирование семейства резонансных объектов в процессе миграции планет. Наши вычисления показали, что многие объекты из резонанса 2/3 захватываются в планетную область. Было получено, что доля объектов из резонанса 2/3, проникающих в год на орбиты комет семейства Юпитера с перигелийными расстояниями менее 2.5 а.е., составляет  $0,4 \cdot 10^{-10}$ . Эта оценка соответствует той, что была получена в работе [3] для транснептуновых объектов с большими эксцентриситетами. Однако распределение элементов орбит исследуемых нами объектов лучше согласуется с наблюдаемым распределением Кентавров, чем подобные распределения для объектов с высокими эксцентриситетами.

*Данная работа была поддержана грантами РФФИ 04-02-96042 и 06-02-16512, а также грантом Правительства Челябинской области*

### Литература

1. Fernandez J.A. On the existence of a comet beyond Neptune // MNRAS. -1980. - № 192. - P. 481-491.
2. Duncan M.J., Levison H.F. A disk of scattered icy objects and the origin of Jupiter-family comets // Science - 1997. - № 276. - P. 1670-1672.
3. Emel'yanenko V., Asher D., Bailey M. High-eccentricity trans-Neptunian objects as a source of Jupiter-family comets // Mon. Not. Astron. Soc. - 2004. - № 350. - P. 161-166.
4. Emel'yanenko V., Asher D., Bailey M. Centaurs from the Oort cloud and the origin of Jupiter-family comets // Mon. Not. Astron. Soc. - 2005. - № 361. - P. 1345-1351.
5. Morbidelli A. Chaotic diffusion and the origin of comets from the 2/3 resonance in the Kuiper Belt // Icarus -1997. - № 127. - P. 1-12.
6. Nesvornyy D. and Roig F. Mean motion resonances in the trans-Neptunian region. The 2:3 resonance with Neptune // Icarus. - 2000. - № 148. - P. 282-300.
7. Malhotra R. The origin of Pluto's orbit: implications for the Solar system beyond Neptune // Astron. Journal - 1995. - № 110. - P. 420-429.
8. Emel'yanenko V. An explicit symplectic integrator for cometary orbits // Celest. Mech. Dynam. Astron. - 2002. - № 84. - P. 331-341.

*Поступила в редакцию 30 сентября 2006 г.*