

УДК 523.6

Облако Оорта как источник короткопериодических комет

Е.Е. Бирюков

Южноуральский государственный университет, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

Поступила в редакцию 1 марта 2006 г.

Аннотация. Исследуется захват комет из облака Оорта на короткопериодические орбиты. Показано, что происхождением из облака Оорта можно объяснить не только кометы галлеевского типа, но и кентавры и дамоклоиды. В работе учитываются новые оценки увеличения потока новых комет в планетную область с ростом перигелийного расстояния. Это позволяет сделать предположение о существовании троянцев не только у Юпитера, но у Сатурна и Урана.

Ключевые слова: облако Оорта, короткопериодические кометы, малые тела

1 Введение

В 1950 году Оорт, анализируя распределение 19 долгопериодических комет, предложил гипотезу о существовании на периферии Солнечной системы огромного облака, состоящего из комет на почти параболических орбитах, на расстоянии 150 000 а. е. от Солнца (Оорт, 1950). Как полагал Оорт, кометное облако могло образоваться из ледяных фрагментов планеты Фаятон, некогда существовавшей между орбитами Марса и Юпитера. Однако в настоящее время утвердилась теория о том, что облако Оорта является остаточным продуктом формирования Солнечной системы. Основная масса облака Оорта образована планетозималями, выброшенными при аккумуляции планет большей частью из зон питания Урана и Нептуна. Вейсман и Левисон (1997) полагают, что 0.8 % массы облака могло прийти из области внутри Юпитера. Под действием проходящих около Солнца звезд, галактического потока и гигантских молекулярных облаков некоторые кометы облака Оорта устремляются внутрь Солнечной системы и становятся долгопериодическими кометами. Предположительно, внутренняя граница облака Оорта находится на расстоянии 10 000 а. е. от Солнца. Облако содержит $10^{12} - 10^{13}$ комет, движущихся по почти параболическим орбитам. Все гипотезы о составе облака Оорта, о распределении в нем орбит комет основываются на наблюдениях долгопериодических комет с перигелийными расстояниями орбит меньше 2 а. е., поскольку именно эта часть облака Оорта доступна наблюдениям. Однако необходимость существования облака Оорта также следует из распределения короткопериодических комет и некоторых малых тел Солнечной системы, предположительно имеющих кометную природу.

Короткопериодические кометы – это кометы с периодом обращения вокруг Солнца менее 200 лет. Они делятся на две основные группы: кометы семейства Юпитера (КСЮ) и кометы галлеевского типа (КГТ). Кометы семейства Юпитера движутся по орбитам с периодом меньше 20 лет и параметром Тиссерана $T_5 > 2$. У комет галлеевского типа период обращения вокруг Солнца $20 < P < 200$ лет и параметр Тиссерана $T_5 < 2$. Большинство исследователей показали, что пояс

Койпера обеспечивает необходимый поток объектов с малыми наклонами для формирования комет семейства Юпитера. Для формирования КГТ необходим другой источник с большими наклонами орбит. Это вызвано тем, что на галлеевских орбитах наблюдаются объекты с обратным движением, в то время как у объектов, захваченных из пояса Койпера, малый наклон орбит. Этим источником может быть облако Оорта.

Во внутренней части Солнечной системы наблюдаются две достаточно многочисленные популяции малых тел, которые, вполне возможно, имеют кометное происхождение: кентавры и дамоклоиды. Кентаврами называют объекты, перигелийные расстояния которых больше 5 а. е. Долгое время считалось, что кентавры происходят из пояса Койпера и объектов рассеянного диска. Моделирование динамической эволюции объектов из транснептуновой области, проведенное Емельяненко и др. (2005), показало, что объяснить распределение кентавров происхождением из транснептуновой области невозможно. На основании этого было сделано предположение о происхождении некоторой части кентавров из облака Оорта. Подтверждают эти выводы данные фотометрических наблюдений Джевита (2005), показавшего что некоторые кентавры, а также все дамоклоиды не могут происходить из транснептуновой области. Дамоклоиды – это объекты на короткопериодических орбитах, перигелийные расстояния которых меньше 5 а. е. Параметр Тиссерана орбит дамоклоидов меньше 2. Поскольку среди дамоклоидов, как впрочем и среди комет галлеевского типа, имеются объекты, движущиеся по обратным орбитам, никакого другого источника этих классов объектов, кроме облака Оорта, не может быть.

В современной кометной астрономии неоднократно исследовался захват комет на короткопериодические орбиты (Емельяненко, Бэйли, 1997; Напье и др., 2004; Левисон и др., 2001). Однако в этих работах не рассматривались механизмы захвата, а также не учитывалось, что поток комет в планетную область растет с увеличением перигелийных расстояний (Фернандез, Ип, 1992; Женг и др., 1996).

2 Результаты

Для исследования было взято 50 000 объектов с почти параболическими орбитами из внешнего облака Оорта, распределенных случайным образом. Большие полуоси распределены равномерно в пределах (10 000 – 30 000) а. е., наклоны орбит - равномерно по $\cos i$ в пределах $(-1 - 1)$, аргументы перигелия и восходящего узла равномерно распределены по i в пределах $(0^\circ, 360^\circ)$. 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 10 000 орбит с равномерным распределением по перигелийному расстоянию 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. Учитывались возмущения галактики и четырех гигантских планет (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). При вычислениях использовался интегратор Емельяненко (2001). В работе учитывались количественные оценки потока новых комет в планетную область из облака Оорта, полученные Мазевой О.А. (2006). На основании ее результатов для каждой области первоначальных перигелийных расстояний был вычислен вес, который есть отношение потока новых комет из этой области к потоку новых комет из первой области первоначальных перигелийных расстояний (таблица 1).

В таблице 1 представлено количество комет, захватываемых из пяти областей первоначальных перигелийных расстояний в основные классы короткопериодических орбит. В таблице 2 оценено среднее динамическое время жизни и предполагаемое количество объектов, которое постоянно должны двигаться по этим орбитам. Вероятность захвата есть отношение количества комет из таблицы 1 к первоначальному количеству комет в данной области (10 000).

Наблюдаемый поток новых комет из внешнего облака Оорта с абсолютной звездной величиной ярче, чем $H_{10} = 7$ и перигелийным расстоянием в пределах (0 – 4) а. е. равен 0.2 кометы в год на

Таблица 1. Захват из облака Оорта в основные классы короткопериодических орбит

Первоначальные перигелийные расстояния	Вес	КГТ КСЮ Кентавры Дамоклоиды				Троянцы	
		Урана	Сатурна	Урана	Сатурна		
0–4	1	89	11	16	149	0	1
4–6	0.59	19	14	72	89	1	2
6–10.5	2.81	5	2	52	32	1	1
10.5–18	11.35	4	1	19	13	2	1
18–31	35.7	3	2	14	5	1	1

Таблица 2. Среднее динамическое время жизни и предполагаемое количество объектов на орбитах КГТ, КСЮ, кентавров и троянцев

	КГТ		Кентавры	Дамоклоиды	Троянцы	
	Урана	Сатурна			Урана	Сатурна
Среднее динамическое время жизни, лет	$1.5 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$	10^6	$7 \cdot 10^4$
Постоянное	3200	100	500000	15000	5000	500

1 а. е. (Бэйли и Стаг, 1988). Это достаточно крупные кометы, с диаметром ядра 5 – 15 км. Для того, чтобы определить, какова популяция объектов на орбитах определенного класса, можно воспользоваться формулой: $N = 4\nu P_i L$, где 4ν – поток новых комет из первой области первоначальных перигелийных расстояний, P_i – вес объектов i -ой области, L – среднее динамическое время жизни на орбитах рассматриваемого класса.

Как видно из таблицы 1, вероятность захвата на орбиты КГТ из первой области значительно выше, чем из всех остальных. На основании этого Емельяненко и Бэйли (1996) ограничились анализом захвата на орбиты КГТ только из этой области. Но учет веса приводит к тому, что объекты из первой области первоначальных q составляют меньше половины популяции КГТ, захваченных из облака Оорта. Таким образом, игнорировать вклад комет с первоначальными перигелийными расстояниями орбит больше 4 а. е. в образование, в частности, объектов на орбитах галлеевского типа, не следует. Из таблицы 2 видно, что на орбитах галлеевского типа должно находиться около 3 000 комет. Однако наблюдениям доступно всего 24 кометы. Такая диспропорция не наблюдается для комет семейства Юпитера. Происхождением из облака Оорта можно объяснить 100 комет, в то время как наблюдается больше 120. Как справедливо было замечено в работе Емельяненко и Бэйли (1997), скорее всего многие кометы семейства Юпитера происходят из пояса Койпера. Недостаток комет галлеевского типа можно объяснить тем, что до 99% комет из облака Оорта затухают после нескольких прохождений перигелия (Левисон и др., 2001).

Среднее количество оборотов, необходимое для эволюции орбит комет из облака Оорта в орбиты КГТ или КСЮ, составляет около 13 000 оборотов. Большую часть этого времени объекты движутся в планетной области по короткопериодическим орбитам. Распределение всех полученных элементов орбит с учетом веса представлено на рис. 1 и рис. 2. Данные объекты относятся к группе кентавров.

Долгое время предполагалось, что кентавры появились в результате динамической эволюции объектов пояса Койпера. В работе Емельяненко и др. (2005) рассматривался захват на орбиты кентавров из транснептуновой области. В полученном распределении перигелийных расстояний орбит количество объектов увеличивается с ростом q . Это противоречит полученному в той же работе наблюдаемому распределению орбит кентавров с учетом эффекта наблюдательной селекции. На основании этих результатов было сделано предположение, что по крайней мере 2/3 всех кентавров происходят из облака Оорта. Действительно, распределение объектов, захваченных на короткопериодические орбиты, согласуется с распределением кентавров, полученным с учетом эффекта наблюдательной селекции (Емельяненко и др., 2005). Совпадает положение явных пиков

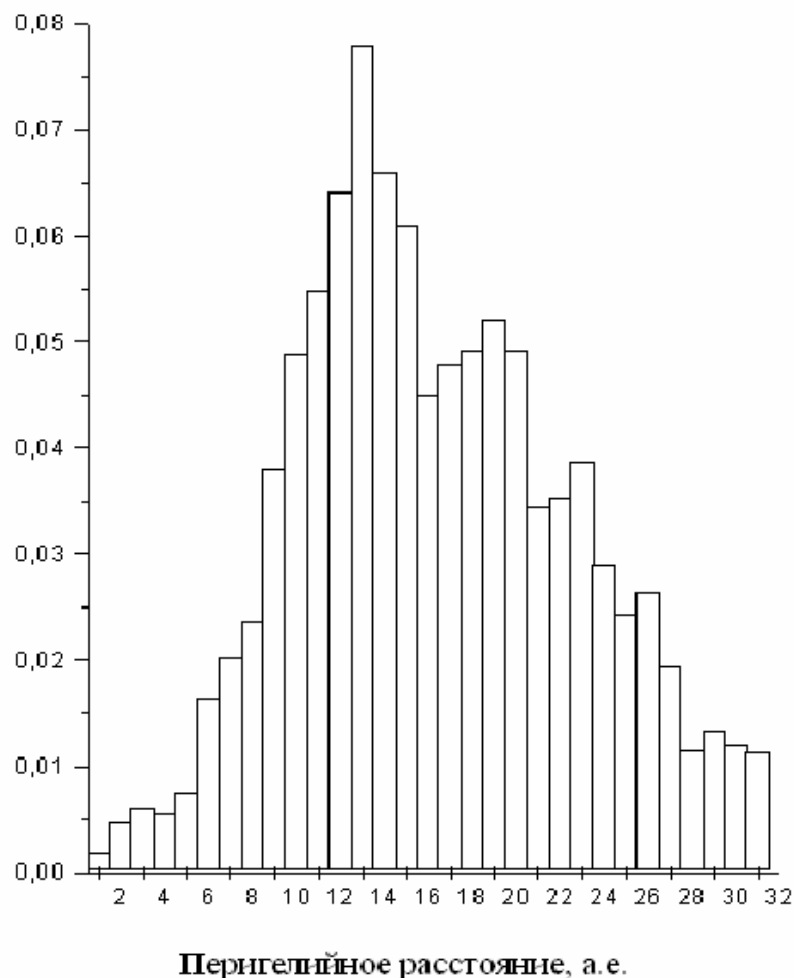


Рис. 1. Распределение перигелийных расстояний кентавров, захваченных из облака Оорта, с учетом веса

в распределениях перигелийных расстояний на 13 а. е. (рис. 1) и больших полуосей в пределах (20 – 40 а. е.) (рис. 2). На рис. 1 наблюдается небольшой пик на 19 а. е., что на первый взгляд, может показаться статистической ошибкой. Однако этот пик наблюдается в распределении кентавров с учетом эффекта наблюдательной селекции. Его наличие можно объяснить влиянием Урана.

Из таблицы 2 видно, что кентавры являются довольно многочисленной популяцией тел в планетной области Солнечной системы. На орбитах кентавров должно существовать до $5 \cdot 10^5$ объектов с диаметром 5 – 15 км. Было также получено, что около 20 % кентавров эволюционирует в КГТ и КСЮ, что хорошо согласуется с оценкой Хорнера и др. (2004). При этом промежуточной стадией этой эволюции являются дамоклоиды. На орбитах дамоклоидов должно существовать до 15 000 объектов с диаметром ядра больше 5 – 15 км. Но данная оценка не учитывает, проявляет ли объект кометную активность или нет.

Неожиданным результатом вычислений явилась возможность захвата комет из облака Оорта

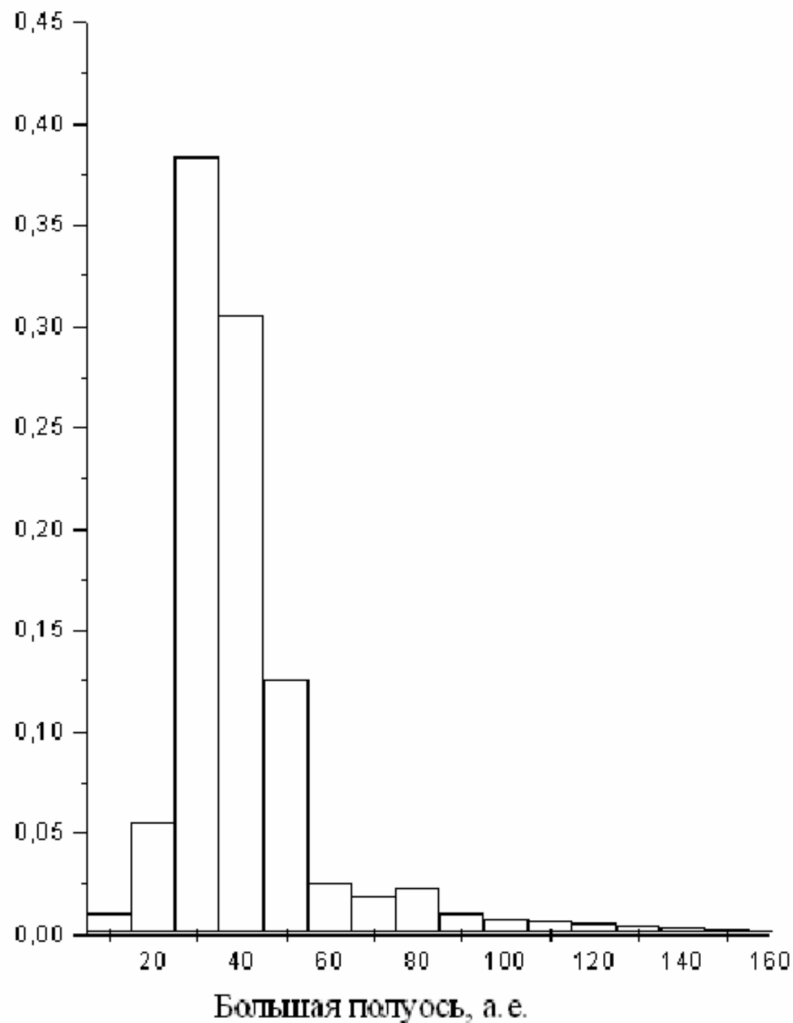


Рис. 2. Распределение больших полуосей кентавров, захваченных из облака Оорта, с учетом веса

на орбиты троянцев Сатурна и Урана. Более того, троянцы Урана имеют эксцентриситет орбиты больше 0.26. Однако количество объектов этого класса должно быть на 2–3 порядка меньше, чем количество кентавров. вполне возможно, что объект 2001BL41 ($a = 9.774$ а. е., $q = 6.95$ а. е., $i = 12.5^\circ$) является представителем троянцев Сатурна, а объект 2002GO9 ($a = 19.527$ а. е., $q = 14.044$ а. е., $i = 12.8^\circ$) можно отнести к троянцам Урана. В настоящее время наблюдается 150/500 000 доля кентавров, 1/500 и 1/5 000 доли троянцев Сатурна и Урана соответственно. Таким образом, имеется мало оснований полагать, что в ближайшее время будут обнаружены новые объекты на орбитах троянцев Сатурна и Урана.

3 Выводы

Рассмотренное более детальное исследование захвата из облака Оорта на орбиты КГТ и КСЮ показало, что сохранилась неопределенность в количестве активных комет галлеевского типа, полученная в работе Емельяненко и Бейли (1997). Единственным возможным решением этой

проблема является предположение Левисона и др. (2001), что 99 % комет затухают еще до того, как они захватываются на короткопериодические орбиты. Было получено, что несмотря на наибольшее значение вероятности захвата на орбиты галлеевского типа для области первоначальных значений перигелийных расстояний (0 – 4) а. е, вес объектов из этой области ниже, чем вес объектов с первоначальными значениями перигелийного расстояния (6 – 31) а. е. В результате этого около трети объектов, захваченных на орбиты галлеевского типа, имеют первоначальное значение перигелийного расстояния (0 – 4) а. е. Таким образом, захват из других областей на орбиты КГТ игнорировать не следует.

Учет роста потока новых комет из облака Оорта в планетную область по мере увеличения перигелийного расстояния приводит к тому, что полученное распределение орбит кентавров согласуется с наблюдаемым распределением. Высокое время жизни объектов на орбитах кентавров приводит к тому, что должно существовать до 500 000 таких объектов.

Неожиданностью явился результат захвата из облака Оорта на орбиты троянцев Сатурна и Урана, количество которых с H_{10} ярче, чем 7, должно быть 500 и 5 000 соответственно. Вполне возможно, что 2001BL41 является представителем троянцев Сатурна, а объект 2002GO9 – это троянец Урана. Необходимо отметить, что полученные троянцы Урана двигались по орбитам с $e > 0.26$. Данный результат также согласуется с наблюдениями, несмотря на то, что по одному обнаруженному объекту сложно судить о какой-либо закономерности.

Данная работа поддержана грантом РФФИ-Урал 04-02-96042. Выражаю благодарность Емельяненко В.В. и Мазевой О.А. за обсуждение результатов и рекомендации.

Литература

- Бэйли (Bailey M.E.) // The structure and evolution of the solar system comet Cloud / Mon. Not. R. Astron. Soc. 1983. V. 204. P. 603.
- Бэйли и Емельяненко (Bailey M.E., Emel'yanenko V.V.) // Dynamical evolution of Halley-type comets / Mon. Not. R. Astron. Soc. 1996. V. 278. P. 1087.
- Бэйли и Стаг (Bailey M.E., Stagg C.R.) // Cratering constraints on the inner Oort cloud / Mon. Not. R. Astron. Soc. 1988. V. 235. P. 1.
- Вейсман и Левисон (Weissman P.R., Levison, H.F.) // The Population of the Trans-Neptunian Region: the Pluto-Charon Environment / Pluto and Charon. / Edited by S. Alan Stern, and David J. Tholen; with the editorial assistance of A.S. Ruskin, M.L. Guerrieri and M.S. Matthews. Tucson: University of Arizona Press. 1997. P. 559.
- Джевитт и др. (Jewitt D., Luu J., Chen J.) // The Mauna-Cerro-Tololo (МКСТ) Kuiper belt and Centaur survey / Astron. J. 1996. V. 112. P. 1225.
- Дункан и др. (Duncan M., Quinn T., Tremaine, S.) // The formation and extent of the solar system comet Cloud / Astron. J. 1987. V. 94. P. 1330.
- Емельяненко и Бэйли (Emel'yanenko V.V., Bailey M.E.) // The capture of Halley-type and Jupiter-family comets from the near-parabolic flux / Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies., 1997. P. 159.
- Емельяненко и Бэйли (Emel'yanenko V.V., Bailey M.E.) // Capture of Halley-type comets from the near-parabolic flux / Mon. Not. R. Astron. Soc. 1998. V. 298. P. 212.
- Емельяненко (Emel'yanenko V.V.) // An Explicit Symplectic Integrator for Cometary Orbits / Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2002. V. 84. P. 331.
- Емельяненко и др. (Emel'yanenko V.V., Asher D.J., Bailey M.E.) // Centaurs from Oort cloud and the origin of Jupiter-family comets / Mon. Not. R. Astron. Soc. 2005. V. 361. P. 1345.
- Женг и др. (Zheng J.O., Valtonen M.J., Mikkola S. & Rickman H.) // Orbits of short-period comets captured from the Oort cloud / Earth, Moon and Planets. 1996. V. 72. P. 45.
- Ирвин и др. (Irwin M., Tremaine S., Zitkow A.N.) // A search for slow-moving objects and the luminosity function of the Kuiper belt / Astron. J. 1995. V. 10. P. 3082.

- Левисон и др. (Levison H.F., Dones L., Duncan M.J.) // The origin of Halley-type comets: probing the inner Oort cloud // *Astron. J.* 2001. V. 121. P. 2253.
- Мазеева // Поток долгопериодических комет в планетной области: динамическая эволюция из облака Оорта / *Астрономический вестник.* (в печати).
- Напье и др. (Napier W.M., Wickramasinghe J.T., Wickramasinghe N.C.) // Extreme albedo comets and the impact hazard // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2004. V. 355. P. 191.
- Фернандез и Ип (Fernandez J.A., Ip W.-H.) // Statistical and Evolutionary aspects of cometary orbits / *Comets in the Post-Halley Era.* 1991. V. 1. P. 487.
- Хорнер и др. (Horner J., Evans N.W., Bailey M.E.) // Simulations of the Population of Centaurus II: Individual Objects / *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2004. V. 355. P. 321.