

УДК 523.24+523.68

А. М. Казанцев

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
04053 Киев-53, ул. Обсерваторная 3

Орбитальная структура пояса Койпера и его вклад в околоземный астероидно-метеорный комплекс

Выполнены численные расчеты эволюции орбит модельных и реальных тел пояса Койпера на длительные интервалы времени. Учитывались гравитационные возмущения от всех больших планет, а для мелких частиц — и негравитационный эффект Пойнтинга — Робертсона. Показано, что широкий разброс орбит тел пояса Койпера в координатах большая полуось — эксцентриситет объясняется их эволюцией за миллионы лет. Относительный вклад крупных тел и метеорных частиц из пояса Койпера в околоземный комплекс должен быть крайне малым.

ОРБИТАЛЬНА СТРУКТУРА ПОЯСУ КОЙПЕРА І ЙОГО ВНЕСОК У БІЛАЗЕМНИЙ АСТЕРОЇДНО-МЕТЕОРНИЙ КОМПЛЕКС, Казанцев А. М. — Виконано чисельні розрахунки еволюції орбіт модельних і реальних тіл поясу Койпера на тривалі інтервали часу. Враховувалися гравітаційні збурення від всіх великих планет, а для дрібних частинок — і негравітаційний ефект Пойнтинга — Робертсона. Показано, що широкий розкид орбіт тіл поясу Койпера в координатах велика піввісь — эксцентриситет пояснюється їхньою еволюцією за мільйони років. Відносний внесок великих тіл і метеорних часток з поясу Койпера в біляземний комплекс повинен бути вкрай малий.

THE ORBITAL STRUCTURE OF THE KUIPER BELT AND ITS CONTRIBUTION TO THE NEAR-EARTH ASTEROID-METEOR COMPLEX, by Kazantsev A. M. — Numerical calculations of orbit evolutions of model and real bodies of the Kuiper belt are carried out on prolonged intervals. Gravitational perturbations from all major planets and in addition the Pointing — Robertson non-gravitational effect for small particles are taken

into account. It is shown that a wide orbit scattering of the real Kuiper belt bodies in semimajor axis — eccentricity co-ordinates is explained by their evolution during millions of years. The conclusion is made that the relative contribution of large bodies and meteor particles from the Kuiper belt to the near-Earth complex should be very small.

ВВЕДЕНИЕ

Открытие пояса Койпера в конце прошлого столетия существенно повлияло на взгляды о происхождении тел Солнечной системы. Этот комплекс малых тел сегодня считается единственным реальным источником кометных ядер. Кроме того, тела пояса Койпера несомненно есть в группе Кентавров [4, 11]. Проникая внутрь орбиты Нептуна, эти тела могут переходить в более близкие к Солнцу области. Сначала такой переход им будут обеспечивать сближения с Нептуном, а потом и с более близкими к Солнцу планетами.

Отдельный интерес представляет переход тел из пояса Койпера в околоземное пространство. В некоторых работах [6] допускается, что около 20 % тел с размерами больше 1 км в околоземном пространстве могут быть из пояса Койпера. Однако это маловероятно в свете более поздних данных о физических свойствах таких тел. В ряде работ [7, 9] показано, что транснептуновые тела содержат значительную часть ледяных веществ и тем самым существенно отличаются от астероидов. Поэтому на орбитах с малыми перигелийными расстояниями такие тела должны проявлять кометную активность. Во всяком случае эти тела должны заметно отличаться от других околоземных астероидов. На сегодня практически все АСЗ по химическому составу поверхностей соответствуют астероидам главного пояса различных типов.

Данное исследование предпринято с целью более детального исследования проблемы перехода вещества из пояса Койпера в околоземное пространство. Понятно, что такие результаты должны полностью согласовываться с данными наблюдений как АСЗ, так и транснептуновых тел.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Большинство интегрируемых орбит были модельными. Их исходные элементы орбит выбирались в диапазонах элементов орбит реальных тел пояса Койпера. Для большей ясности рассмотрим распределение транснептуновых тел в координатах большая полуось — эксцентриситет (рис. 1). Распределение приведено для значений $a = 30...80$ а. е. Количество орбит при больших значениях a относительно небольшое, а расширение диапазона больших полуосей «замывает» структуру распределения в зоне $a = 35...50$ а. е. Скопление орбит при $a = 38...39$ а. е. и

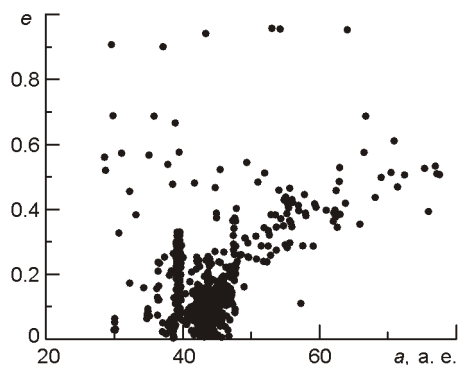


Рис. 1. Распределение орбит тел пояса Койпера в координатах $a — e$

$e = 0.05...0.35$ соответствует соизмеримости 3:2 с Нептуном. Здесь расположена и орбита Плутона. Поэтому все другие орбиты, находящиеся в данной соизмеримости, получили название «плутончики». Максимальная концентрация орбит соответствует диапазону $a = 42...47$ а. е. Дальше по шкале больших полуосей расположена еще одна соизмеримость с Нептуном — 2:1. Здесь нет орбит с эксцентриситетами меньше 0.1, и лишь одна орбита имеет значение e меньше 0.2. Дальше для большинства орбит с увеличением больших полуосей возрастают и эксцентриситеты, причем такая графическая зависимость имеет вид некоторого рукава. Остальная часть орбит имеет большие значения эксцентриситетов при всех значениях a .

Для интегрирования начальные элементы орбит выбирались в различных зонах больших полуосей. Отдельный интерес представляют «плутончики», поэтому интегрировались реальные и модельные орбиты в этой группе. Справа от «плутончиков» ($a = 40...41$ а. е.) наблюдается некоторый пробел в распределении, где также были выбраны модельные орбиты для расчетов. Рассчитывались реальные и модельные орбиты в зоне максимальной концентрации (42...46 а. е.) и модельные орбиты в соизмеримости 2:1 с Нептуном (47...48 а. е.). Кроме того, интегрировались модельные орбиты с большими полуосями 35...36 а. е. Здесь относительно небольшая концентрация реальных орбит. Однако тела именно на таких орбитах имеют наибольшую вероятность сближений с Нептуном, и следовательно, наибольшую вероятность перехода во внутренние области планетной системы.

Исходные значения наклонов орбит выбирались в соответствующих диапазонах реальных орбит, а остальные угловые элементы — равномерно от 0 до 360°. Значения эксцентриситетов выбирались относительно небольшие (0.05...0.15), так как нас в первую очередь интересует миграция тел пояса Койпера из зон их первоначальных орбит. Понятно, что эксцентриситеты их орбит должны быть относительно небольшими, а орбиты с большими эксцентриситетами образованы позднее под действием тех или иных возмущений. Происхождение таких орбит само по себе представляет интерес и является предметом нашего исследования. Кроме того, как будет видно ниже, в наших расчетах орбиты с небольшими исходными значениями эксцентриситетов в процессе эволюции приобретают заметные значения e и запол-

няют практически все пространство в координатах $a — e$, соответствующее реальным телам пояса Койпера. Поэтому в выборе больших исходных значений e не было необходимости.

Численные расчеты проводились в прямоугольных координатах с учетом возмущений от всех планет. Метод интегрирования описан в работе [1]. Интервалы интегрирования выбирались так, чтобы охватить несколько периодов изменений всех угловых элементов. Максимальные интервалы составляли 40 млн лет. Понятно, что точность отдельной орбиты на таких интервалах интегрирования очень низкая. Ошибки в угловых элементах превышают значения самих элементов. При тесных сближениях с планетами это может касаться и значений большой полуоси, и эксцентриситета. Поскольку здесь интегрируется сразу большое число модельных орбит то качественный ход вычисленной эволюции комплекса орбит будет близок к ходу эволюции реальных орбит с выбранными исходными элементами и на очень больших интервалах времени.

Отдельно просчитывалась эволюция мелких частиц. При этом, кроме упомянутых гравитационных возмущений, учитывался негравитационный эффект (НГЭ) Пойнтинга — Робертсона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

«Плутончики». Нами была просчитана эволюция более ста орбит реальных тел этой группы. Интервалы интегрирования составляли около 40 млн лет. Из расчетов следует, что размах колебаний больших полуосей всех орбит на всем интервале постоянен.

На рис. 2 для примера приведены изменения большой полуоси одной из орбит. Хорошо видно, что хотя границы изменений a зафиксированы не очень четко, и в разные периоды отличаются на тысячные доли а. е., но в среднем они сохраняются постоянными. Постоянным остается и среднее значение большой полуоси, относительно которого происходят колебания. Следовательно, орбиты в соизмеримости 3:2 с Нептуном являются устойчивыми в течение многих миллионов лет.

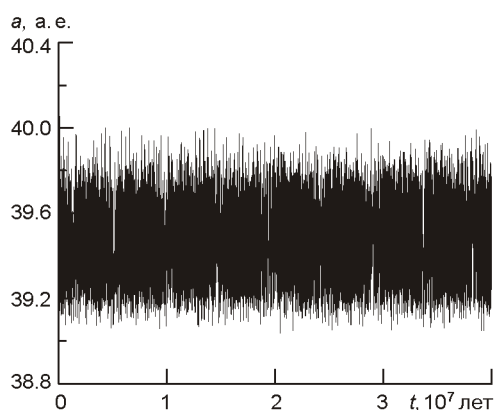


Рис. 2. Зависимость большой полуоси от времени одной из орбит в группе «плутончиков»

Существования сгущения тел в данной области может свидетельствовать о том, что эта устойчивость простирается и на миллиарды лет. Таким образом, «плутончики» не поставляют тела во внутренние зоны Солнечной системы.

Показательным параметром устойчивости орбит в соизмеримости является амплитуда колебаний аргумента либрации. Параметр введен Шубартом в 1968 г. [10] и определяется выражением

$$q_p - p_a (p - q),$$

где p и a — средние долготы планеты и астероида, q — долгота перигелия орбиты астероида, p и q — целые числа, характеризующие соизмеримость (p/q равно отношению среднего суточного движения планеты к среднему суточному движению астероида). Амплитуды колебаний аргумента либрации лежат в пределах $0 \dots 180^\circ$. При значениях q , близких к 180° , орбита имеет возможность выйти из соизмеримости.

Как известно, в поясе астероидов в одних соизмеримостях наблюдаются люки, а в других — сгущения. В люках значения q изменяются со скоростью около 1° за 2000 лет [8], а в местах сгущений (группа Гильды) остаются постоянными. Значения q отдельных «плутончиков» лежат в пределах от 10° до 120° и не изменяются в течение всего интервала интегрирования. Поэтому «плутончики» в поясе Койпера являются аналогом группы Гильды среди астероидов.

Соизмеримость 2:1 с Нептуном. Поскольку в данной области при малых эксцентриситетах практически нет данных о реальных орбитах, то численные расчеты выполнялись для модельных орбит. Исходные значения больших полуосей соответствовали значению точной соизмеримости 47.6 а. е. Начальные эксцентриситеты выбирались в интервале $0.05 \dots 0.10$, наклоны — от 5° до 15° . Всего было просчитано 50 модельных орбит, которые показали типичную картину для соизмеримости. Некоторые орбиты постоянно остаются в соизмеримости, т. е. их большие полуоси постоянно колеблются относительно значения 47.6 а. е. Другие орбиты в результате изменения q со временем выходят из соизмеримости, но значения их больших полуосей остаются в пределах $47.0 \dots 49.0$ а. е. Эксцентриситеты колеблются в пределах $0.0 \dots 0.15$. Перигелийные расстояния всех орбит в течение всего интервала интегрирования (до 20 млн лет) не опускаются ниже 40 а. е. Поэтому тела на таких орбитах не могут приближаться к Нептуну, и следовательно, не могут переходить во внутренние зоны Солнечной системы. Отсутствие реальных тел на таких орбитах скорее всего свидетельствует об их изначальном отсутствии.

Зона максимальной концентрации орбит (42...46 а. е.). Здесь численные расчеты велись как для реальных, так и для модельных орбит. Модельные орбиты выбирались для удобства, чтобы обеспечить равномерную выборку начальных элементов. Исходные эксцентриситеты не превышали 0.10 , а наклоны — 15° . Эти значения соответ-

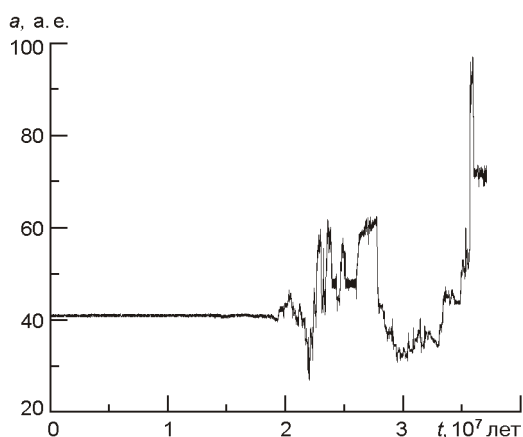
тствуют диапазонам наибольшей концентрации орбит реальных тел. Расчеты показали, что данные орбиты не ощущают влияния резонансов, между которыми они расположены (3:2 и 2:1). Большие полуоси орбит изменяются в очень узких пределах, а эксцентриситеты испытывают лишь вековые изменения. При этом перигелийные расстояния не уменьшаются ниже 32 а. е., что делает невозможным сближение таких тел с Нептуном и переход на более близкие к Солнцу орбиты.

Зона за «плутончиками». В распределении орбит тел пояса Койпера при $a = 40...41$ а. е. наблюдается некоторый пробел. Поэтому эволюция таких орбит представляет интерес. В наших расчетах исходные значения больших полуосей выбирались в середине пробела: 40.5 и 40.7 а. е. Эксцентриситеты — от 0.05 до 0.15, наклоны — от 5 до 10°. Эти значения соответствуют зоне с минимальной концентрацией реальных орбит. Всего было просчитано эволюцию 50 орбит.

Из расчетов можно сделать вывод, что подобные орбиты ощущают влияние соседнего резонанса с Нептуном 3:2. Эксцентриситеты многих орбит увеличиваются от 0.05 и 0.07 до значений больше 0.2 и 0.3. За интервал интегрирования (20...40 млн лет) перигелийные расстояния почти половины орбит уменьшаются до значений меньше 30 а. е., достаточных для сближений с Нептуном. Около 20 % тел испытывают такие сближения и переходят на орбиты, типичные для группы Кентавров. Перигелийные расстояния орбит достигают значений от 10 до 20 а. е. В дальнейшем некоторые тела уходят на более удаленные от Солнца орбиты. Большие полуоси орбит достигают 100 а. е. и даже больше (рис. 3). Перехода тел в группу АСЗ не было.

Хотя далеко не все интегрируемые орбиты существенно изменили свои начальные значения больших полуосей и эксцентриситетов, все же заметная часть орбит ушла далеко от соседней с «плутончиками» зоны. Поскольку орбиты в этой зоне не находятся в каком-либо устойчивом резонансе, то в течение более длительного интервала времени все они могут попасть в условия, обеспечивающие сближения с Нептуном. Следовательно, можно сделать вывод, что наблюдаемый здесь небольшой пробел в распределении реальных орбит тел пояса Койпера

Рис. 3. Изменение со временем большой полуоси орбиты при начальных значениях: $a_0 = 40.7$ а. е., $e_0 = 0.07$, $i_0 = 5^\circ$



ра можно объяснить эволюцией этих орбит под действием гравитационных возмущений больших планет.

Ближайшая к Солнцу зона пояса Койпера. Эта зона расположена в области больших полуосей 35...36 а. е. Здесь следует сделать некоторые оговорки. Как видно из рис. 1, имеются реальные орбиты пояса Койпера и при меньших значениях а. Однако все они, за исключением четырех (расположенных почти на орбите Нептуна) имеют весьма большие эксцентриситеты. Очевидно, что эти орбиты не могут рассматриваться как первичные орбиты в поясе Койпера. А как уже отмечено выше, нас в первую очередь интересует миграция тел из первичных зон пояса.

В отмеченной зоне сравнительно мало орбит реальных тел. И все же здесь есть орбиты с эксцентриситетами несколько меньше и несколько больше 0.1. Наклоны этих орбит небольшие — от 1 до 15°. Для численных расчетов было выбрано модельных 50 орбит с большими полуосями 35 и 36 а. е., эксцентриситетами от 0.05 до 0.15 и наклонами 5°. Интервалы интегрирования составляли от 4 до 12 млн лет. Такие относительно короткие интервалы объясняются тем, что в процессе интегрирования орбиты некоторых тел становились параболическими и даже гиперболическими, т. е. в результате тесных сближений с планетами тела навсегда покидали Солнечную систему. В таких случаях численные расчеты прекращались.

Расчеты для этой группы орбит показали, что из данной зоны пояса Койпера тела могут переходить далеко вглубь планетной системы. Из 50 модельных тел 14 на некоторое время переходили в группу Кентавров. Среднее время пребывания их в этой группе составило около 2 млн лет. Два тела на короткое время (около 80 тыс. лет) были в числе АСЗ, т. е. перигелийные расстояния их орбит были меньше 1.3 а. е. Однако большие полуоси при этом превышали 15 а. е. На рис. 4 приведены изменения со временем больших полуосей двух орбит. Наши расчеты не выявили перехода тел из пояса Койпера на типичные орбиты АСЗ, т. е. с большими полуосями меньше 4 а. е.

Поскольку переход во внутренние зоны планетной системы возможен для тел, расположенных в малозаселенных зонах пояса Койпера (35...36 и 41...42 а. е.), то приток таких тел в околоземное пространство должен быть очень небольшим. Понятно, что выборка из 100 орбит не может быть достаточной для определения численного значения интенсивности перехода тел из пояса Койпера в группу АСЗ. Тем не менее, приблизительную оценку о соотношении тел, перешедших в группу Кентавров и в АСЗ, можно получить. Общее количество тел, перешедших в АСЗ, в несколько раз меньше общего количества тел, перешедших в группу Кентавров. Среднее время пребывания Кентавров на соответствующих орбитах примерно в 20 раз превышает среднее время пребывания тел на орбитах АСЗ. Следовательно, количество тел, перешедших из пояса Койпера в группу Кентавров, должно быть в десятки раз больше, чем перешедших в популяцию АСЗ.

Этот вывод хорошо согласуется с наблюдательными данными. Так, в каталоге MPC на 2008 г. насчитывается 46 тел с большими полуосями от 8 до 25 а. е. (Кентавров) и четыре тела с большими полуосями больше 4 а. е. и перигелийными расстояниями меньше 1.3 а. е. Последние тела можно с некоторой оговоркой считать принадлежащими в прошлом к поясу Койпера. Только у одного тела большая полуось больше 10 а. е. Понятно, что среди этих четырех АСЗ, как и среди 46 Кентавров, могут быть тела, вышедшие из пояса астероидов. Такая возможность показана в работе [8]. Однако это не должно заметно повлиять на соотношение между количеством Кентавров и АСЗ, перешедших из пояса Койпера. Если учесть эффект селекции (замечаемость АСЗ гораздо выше, чем Кентавров), то можно уверенно говорить, что на сегодняшний день число тел, перешедших из пояса Койпера в группу Кентавров, в десятки раз превышает число тел, перешедших в АСЗ.

Оценка миграции мелких частиц. Приведенные выше результаты показывают, что вклад тел пояса Койпера в комплекс АСЗ крайне мал. Интересно рассмотреть вопрос о вкладе мелких частиц в околоземный метеорный комплекс. Могут ли мелкие частицы под влиянием НГЭ мигрировать во внутренние зоны планетной системы более интенсивно, чем крупные? Для ответа на этот вопрос мы просчитали эволюцию частиц в поясе Койпера с учетом вышеупомянутых гравитационных сил, а также эффекта Пойнтинга — Робертсона. Известно, что под действием этого эффекта происходит постепенное уменьшение больших полуосей орбит частиц. Обычно при учете этого эффекта вычисляются лишь вековые изменения a и e на основании выражений, полученных Робертсоном. В нашем случае был выполнен полный учет эффекта Пойнтинга — Робертсона. Выражения для полного учета этого эффекта вместе с гравитационными возмущениями в прямоугольных координатах приведены в работе [2].

Вначале была просчитана эволюция орбит частиц в зоне наибольшей концентрации ($a = 43...47$ а. е.). Интервалы интегрирования составляли до 5 млн лет. Рассчитывались пары орбит, где при полностью одинаковых исходных элементах для одной из орбит учитывались лишь гравитационные силы, а для другой — те же силы вместе с эффектом Пойнтинга — Робертсона. При этом плотности частиц принимались равными 2 г/см^3 , а размеры — от 0.5 до 2 мм. Эти размеры близки к минимальным размерам метеорных частиц, регистрируемых оптическими камерами в земной атмосфере.

Расчеты показали, что эффект Пойнтинга — Робертсона практически не сказывается на эволюции орбит частиц. Никакого систематического уменьшения больших полуосей или перигелийных расстояний на интервале 5 млн лет не обнаружено.

Известно, что на изменение орбит мелких частиц кроме эффекта Пойнтинга — Робертсона действует также эффект Ярковского. Однако в работе [3] показано, что эффект Ярковского на таких расстояниях

для частиц размеров $d < 1$ см оказывает влияние в десятки раз меньше, чем эффект Пойнтинга — Робертсона. Поэтому в наших расчетах эффект Ярковского не учитывался. Таким образом, приток вещества в околоземный комплекс из наиболее густо населенной зоны пояса Койпера не осуществляется ни под действием гравитационных возмущений, ни под влиянием упомянутых НГЭ.

Вычисления с учетом эффекта Пойнтинга — Робертсона были выполнены также для частиц на орбитах, расположенных в наиболее близкой к Солнцу зоне пояса Койпера ($a = 35...36$ а. е.). Здесь также рассчитывалась эволюция пар орбит при тех же значениях плотности и размеров частиц. Расчеты показали, что если частицы не испытывают сближений с Нептуном, то ход эволюции больших полуосей орбит на всем интервале интегрирования происходит практически одинаково как для самых мелких частиц (0.5 мм), так и для крупных тел. Иными словами, эффект Пойнтинга — Робертсона не оказывает никакого влияния на приток частиц метеорного размера даже из ближайших к Солнцу участков пояса Койпера во внутренние зоны планетной системы.

Если частицы испытывают сближения с планетами, то ход эволюции их орбит определяют условия сближения. На рис. 4 представлены зависимости больших полуосей орбит с одинаковыми начальными значениями всех элементов, но с разными условиями интегрирования. Орбита 1 просчитана с учетом эффекта Пойнтинга — Робертсона, а орбита 2 — без него. Видно, что первые 700 тыс. лет изменения больших полуосей практически совпадают, т. е. эффект Пойнтинга — Робертсона не оказывает никакого заметного влияния на эволюцию частицы. Однако за это время накапливаются незначительные различия в элементах орбит, которые приводят к разным условиям сближений частиц с Нептуном. Как известно, эффект Пойнтинга — Робертсона приводит к вековому уменьшению больших полуосей орбит частиц,

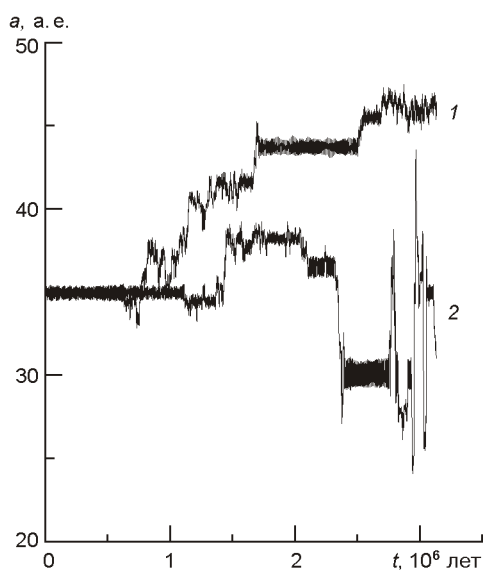


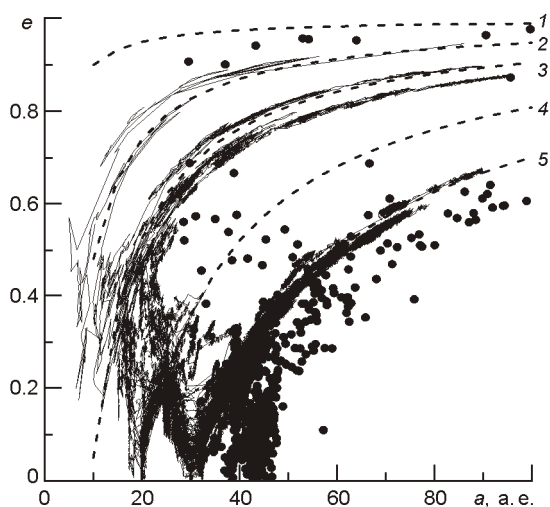
Рис. 4. Эволюция больших полуосей орбит частиц пояса Койпера: 1 — с учетом эффекта Пойнтинга — Робертсона, 2 — без учета эффекта

но после сближений частицы, на которые мог оказывать влияние НГЭ, начали удаляться от Солнца, а остальные — приближаться. Это говорит о том, что именно условия сближения и гравитационное влияние Нептуна, а не НГЭ стали причиной дальнейших расхождений в эволюции орбит.

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ОРБИТ В КООРДИНАТАХ $a — e$

Эволюция рассматриваемых орбит в координатах $a — e$ представляет отдельный интерес. Из рис. 1 видно, что даже в интервале больших полуосей 30...60 а. е. эксцентриситеты достигают значений 0.9 и больше. Интересно, где изначальный источник таких орбит? Кроме того, интересно происхождение уже упомянутого «рукава», тянущегося изогнутой дугой в сторону увеличения больших полуосей и эксцентриситетов. Для выяснения поставленных вопросов рассмотрим рис. 5. Здесь, как и на рис. 1, точками обозначены орбиты реальных тел пояса Койпера. Штриховыми линиями 1—5 обозначены зависимости $a(e)$ при постоянных значениях перигелийных расстояний ($q = 1, 5.2, 9.5, 19.2$ и 30 а. е. соответственно). Эти перигелийные расстояния близки к большим полуосям орбит планет. Понятно, что для реальных орбит, расположенных между двумя соседними штриховыми линиями, перигелийные расстояния имеют промежуточные значения. Тонкими линиями обозначен ход эволюции модельных орбит, просчитанных в данной работе. На рисунке отмечен ход эволюции лишь нескольких орбит с начальными большими полуосями в интервалах 41...42 и 35...36 а. е. В некоторых местах эти линии очень густо покрывают координатное пространство и закрывают реальные орбиты, но основные особенности эволюции видны хорошо. Видно также, что перигелии реальных орбит избегают значений, близких к большим полуосям орбит планет. Это понятно, поскольку вероятности сближений малых тел с планета-

Рис. 5. Эволюция орбит тел пояса Койпера в координатах $a — e$



ми максимальны вблизи перигелиев орбит этих тел. Хотя несколько орбит имеют перигелийные расстояния между орбитами Земли и Юпитера, но к самим орбитам планет значения q не приближаются.

Также видно, что эволюция орбит в координатах $a — e$ происходит приблизительно вдоль штриховых линий. Это понятно, поскольку заметные изменения элементов происходят в основном при сближении малых тел с планетами вблизи перигелиев орбит малых тел. Кроме того, такие изменения большой полуоси и эксцентриситета происходят при незначительном изменении перигелийного расстояния.

В целом ход эволюции модельных орбит вписывается в распределение орбит реальных тел пояса Койпера. Это значит, что распределение этих тел в координатах $a — e$ можно объяснить эволюцией таких тел с исходными значениями больших полуосей орбит в интервалах 35...36 и 41...42 а. е. Однако здесь имеется одна особенность. Речь идет о «рукаве» орбит, который тянется в сторону увеличения a и e от зоны наибольшей концентрации ($a = 42...46$ а. е., $e = 0...0.20$). «Рукав» изгибается так, что его верхний край касается штриховой линии, обозначающей зависимость $a(e)$ при $q = 30$ а. е. По форме «рукав» также близок к зависимости $a(e)$ модельных орбит (сплошная ломаная линия). Это говорит о том, что происхождение «рукава», скорее всего, является следствием эволюции орбит, изначально расположенных примерно в зоне наибольшей концентрации ($a = 42...46$ а. е., $e = 0...0.20$). Однако, как видно из рис. 5, большинство орбит «рукава» не может иметь сближений с планетами — перигелийные расстояния этих орбит расположены за орбитой Нептуна.

Перигелийные расстояния некоторых модельных орбит в процессе эволюции также расположены за орбитой Нептуна, потому что их эволюционные зависимости расположены несколько ниже зависимости $a(e)$ при $q = 30$ а. е. Этот факт объясняется вековой эволюцией эксцентриситетов таких орбит, которая показывает относительно небольшие долгопериодические колебания даже без сближений с планетами. Диапазоны таких колебаний доходят до 0.04, чего достаточно для объяснения удаления перигелиев модельных орбит за орбиту Нептуна. Но перигелии реальных орбит в «рукаве» удалены гораздо больше. Для объяснения происхождения этих орбит в результате эволюции под действием известных гравитационных возмущений диапазоны вековых колебаний эксцентриситетов должны доходить до 0.2 и даже больше, чего в действительности нет.

Из анализа рис. 5 напрашивается предположение о существовании неизвестного возмущающего тела, масса которого заметно больше массы Плутона, и которое движется либо по круговой орбите на расстоянии 48...50 а. е., либо достигает этих значений в афелии орбиты. Такое ограничение следует из того, что учет Плутона практически не сказывается на эволюции орбит модельных тел. В то же время масса предполагаемого тела должна быть заметно меньше массы Нептуна. Это условие следует из населенности «рукава» орбитами. Понятно,

что орбиты реальных тел пояса Койпера, расположенные между штриховыми линиями 4 и 5, могут испытывать сближения лишь с Нептуном. Поскольку это пространство заметно больше очищено от орбит, чем область «рукава», то и масса Нептуна должна быть заметно больше массы предполагаемого тела.

Все же наличие «рукава» вряд ли может быть достаточным основанием для утверждения о существовании нового массивного тела. Подобных предположений делалось достаточно (см. [5]), но ни одно пока не подтвердилось. Поэтому отметим, что наличие «рукава» орбит тел пояса Койпера еще требует своего объяснения.

ВЫВОДЫ

Численные расчеты реальных и модельных орбит тел пояса Койпера показывают, что среди наблюдаемого комплекса АСЗ вклад тел из пояса Койпера должен быть крайне мал, а их общее количество должно быть в десятки раз меньше, чем количество тел, перешедших в группу Кентавров. Такой вывод согласуется с данными наблюдений.

Негравитационные эффекты практически не оказывают никакого влияния на переход частиц метеорного размера из пояса Койпера во внутренние зоны планетной системы. Приток таких частиц к орбите Земли может осуществляться только за счет сближений с планетами.

Распределение орбит тел пояса Койпера в координатах большая полуось — эксцентриситет в основном объясняется эволюцией орбит таких тел с исходными значениями больших полуосей орбит в интервалах 35...36 и 41...42 а. е. Наличие «рукава» орбит, который тянется в сторону увеличения a и e от зоны наибольшей концентрации ($a = 42...46$ а. е., $e = 0...0.20$) еще требует объяснения.

1. *Казанцев А. М.* Простой метод численных расчетов эволюции орбит околоземных астероидов // *Астрон. вестн.*—2002.—**36**, № 1.— С. 48—54.
2. *Казанцев А. М.* Учет эффекта Пойнтинга — Робертсона на коротких интервалах эволюции метеорных орбит // *Кинематика и физика небес. тел.*—2005.—**21**, № 4.—С. 312—316.
3. *Катасев Л. А., Куликова Н. В.* Эффект Ярковского — Радзиевского в эволюции метеорных роев // *Астрон. вестн.*—1972.—**6**, № 4.—С. 237—241.
4. *Barucci M. A., Belskaya I. N., Fulchignoni M., Birlan M.* Taxonomy of Centaurs and trans-neptunian objects // *Astron. J.*—2005.—**130**, N 3.—P. 1291—1298.
5. *Brunini A., Melita M. D.* The existence of a planet beyond 50 AU and the orbital distribution of the classical Edgeworth-Kuiper-Belt objects // *Icarus.*—2002.—**160**, N 1.—P. 32—43.
6. *Ipatov S. I., Mardon A. A.* Delivery of meteorites to the Earth from the Edgeworth—Kuiper belt // 30th Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 15—29, 1999, Houston, TX. Abstr. 1147.
7. *Jewitt D. C., Luu J.* Crystalline water ice on the Kuiper belt object (50000) Quaoar // *Nature.*—2004.—**432**.—P. 731—733.

8. *Kazantsev A. M.* Migration velocities of asteroids from MBA to NEA's and Centaurs // *Romanian Astron. J.*—2005.—**15** Suppl.—P. 81—86.
9. *Moore M. H., Hudson R. L., Ferrante R. F.* Radiation products in processed ices relevant to Edgeworth-Kuiper-Belt objects // *Earth, Moon, and Planets.*—2003.—**92**, N 1.—P. 291—306.
10. *Shubart J.* Long-period effects in the motion of Hilda-type planets // *Astron. J.*—1968.—**73**.—P. 99—103.
11. *Stern A., Campins H.* Chiron and the Centaurs: escapees from the Kuiper belt // *Nature.*—1996.—**382**.—P. 507—510.

Поступило в редакцию 06.05.09