

К ВОПРОСУ О СУЩЕСТВОВАНИИ ДЕСЯТОЙ ПЛАНЕТЫ

Е.Е. Бирюков

В работе предпринята попытка объяснения распределения обнаруженных транснептуновых объектов действием десятой, пока не открытой, планеты. Было показано, что действием планеты, имеющей значение большой полуоси порядка 60 а.е. несмотря на результаты Брунини и Мелиты, невозможно объяснить наблюдаемое распределение ТНО, как впрочем и возмущениями планеты из внутреннего облака Оорта. Это связано с тем, что времени, проводимого этой планетой вблизи Нептуна недостаточно для возмущения исследуемых орбит и формирования их распределения, близкого к наблюдаемому. Наиболее интересными представляются результаты, полученные действием планеты со значениями большой полуоси a пределах 80–200 а.е. Планета со значением большой полуоси порядка 200 а.е. способствует формированию объектов на сильноэллиптических орбитах со значением большой полуоси больше 80 а.е. С другой стороны, планета со значением большой полуоси порядка 80 а.е. и наклоном около 180° формирует распределение объектов, сильно напоминающее распределение обнаруженных ТНО. В частности, появилось немало объектов, движущихся в резонансе с Нептуном и имеющих большие наклоны.

Введение

Недавно открытый пояс Эджеворта-Койпера дал новую богатую информацию о происхождении малых тел Солнечной системы и взаимосвязи объектов различных классов. Структура этого образования оказалась очень сложной, но можно выделить две основные группы транснептуновых объектов: классический пояс объектов со значениями большой полуоси $a < 50$ а.е. и семейство тел, движущихся по орбитам с эксцентриситетами $0,2 < e < 0,9$ и $a > 50$ а.е. Существование последней группы объектов явилось большим сюрпризом для астрономов, поскольку большие тела не могли образоваться в результате аккреции на орбитах с такими большими эксцентриситетами. К тому же наклоны орбит этих объектов достигают 35 градусов, несмотря на то, что наблюдения сконцентрированы вблизи плоскости эклиптики.

В течение определенного времени эти объекты рассматривались как тела, выброшенные из зоны формирования Нептуна в процессе формирования данной планеты. Однако, более детальное изучение различных моделей происхождения далеких транснептуновых объектов показало, что модель объектов, выброшенных Нептуном, не согласуется с наблюдениями и распределение их орбит не может быть объяснено в рамках возмущений от известных тел Солнечной системы.

1. Теории происхождения и распределения ТНО

С момента обнаружения транснептуновых объектов начались попытки объяснения причин их современного распределения их орбит как по большим полуосям и эксцентриситетам, так и по наклонам. Последние годы ознаменовали собой появление множества теорий, объясняющих динамическую эволюцию пояса Эджеворта-Койпера. Сложности заключаются в том, что если рассматривать влияние всех планет, расположенных на современных орбитах, на классический пояс Койпера, то данные возмущения недостаточны для формирования наблюдаемого распределения транснептуновых объектов. Было исследовано влияние Нептуна и Урана на объекты классического пояса Койпера, расположенные на круговых орбитах и имеющие нулевые наклоны. Время интегрирования составило $4,9 \cdot 10^9$ лет, т.е. время жизни Солнечной системы. В результате не удалось получить объекты на сильноэллиптических орбитах, аналогичных орбите *2000CR105*, наклоны орбит исследуемых объектов не превысили 20° , однако, обнаружены объекты с наклоном орбиты, достигающим 45° . В соответствии с теорией, которую развили Дункан и Левисон [1], в заключительной стадии формирования Солнечной системы, образование Урана и Нептуна происходило по пути аккреции массивных планетазималиев в области между Юпитером и Сатурном. Нынешнее распределение транснептуновых объектов является следствием влияния эллиптиче-

ских планетазималиев Урана и Нептуна на «грязный лед», находящийся за 30 а.е. На данный момент установилось предположение, что объекты транснептуновой области состоят из льда – материи кометных ядер [2]. В своей работе они показали, что после прохождения перигелия объекты классического пояса Койпера выбрасываются на сильно эллиптические, относительно устойчивые орбиты с большей вероятностью, чем переместятся к гигантским планетам в планетную зону. На этих орбитах объекты имеют тенденцию к возвращению обратно к Нептуну на последующих прохождениях перигелия. Для объектов с большим значением перигелийного расстояния требуется значительное время (порядка 5 млрд. лет) по истечении которого под влиянием Нептуна объекты могут перейти на орбиты, пересекающие его орбиту.

До недавнего времени эта теория происхождения транснептуновых объектов принималась как основная. Критика этой теории была проведена в работе Гладмана [3]. Эта теория не объясняет появление объектов семейства Плутона, которые ошибочно были объединены с объектами семейства Нептуна. В свою очередь орбиты объектов семейства Плутона объяснить простым влиянием Нептуна невозможно.

Численное доказательство этого утверждения было осуществлено Емельяненко [4], который проанализировав динамическую эволюцию известных объектов на сильно эллиптических орбитах с перигелием порядка 40 а.е. за время 5 млрд. лет под действием гигантских планет, получил, что эти объекты никогда не находились и вблизи Нептуна, потому как его возмущения слишком малы. Однако, не исключил возможности пока не ясного единого механизма динамической эволюции сильно эллиптических объектов семейства Нептуна и Плутона. Таким образом была опровергнута теория наиболее полно отражавшая причины современного распределения ТНО.

Существует ряд ученых, полагающих [5], что наблюдаемое распределение объектов пояса Койпера получилось вследствие прохождения звезды. Траектория звезды относительно Солнца могла быть как параболическая, так и прямолинейная. При возможном прохождении звезды по параболической орбите с расстоянием наименьшего приближения порядка 200 а.е. и наклоном порядка 10° возникали достаточно сильные возмущения, способные выбросить на эллиптические орбиты объекты классического пояса Койпера и способствовать появлению объектов с элементами орбиты аналогичными *2000CR105*. Но существуют некоторые сомнения относительно соответствия данной гипотезы действительности. Для столь близкого прохождения звезды по параболической орбите Солнце должно быть сформировано в звездном скоплении. Мы не можем ни подтвердить ни опровергнуть это утверждение, но совершенно однозначно установлено, что на данный момент Солнце не находится ни в каком звездном скоплении [3]. В случае одиночного столкновения Солнца со звездой, согласно [6], можно вычислить минимальное расстояние на котором за время жизни Солнечной системы проходила по крайней мере одна звезда. Количество столкновений Солнечной системы со звездой на расстоянии R равно $N = \pi R^2 n_{star} V_{star} t$, где $n_{star} = 0,1 \text{ пк}^{-3}$ – концентрация звезд в межзвездном пространстве, $V_{star} = 20 \text{ км/с}$ – средняя скорость звезд, $t = 4,6 \cdot 10^9$ лет – время жизни Солнечной системы [6]. Если $N = 1$, то это расстояние будет равно

$$R = \sqrt{\frac{1}{\pi} n_{star} V_{star} t} = 1100 \text{ а.е.} \quad (1)$$

Вероятность же прохождения звезды на расстоянии 200 а.е. приблизительно равна 3 %.

Особо в этом ряде предположений и гипотез, объясняющих современное распределение ТНО, стоит версия о существовании одного, а может быть и двух, массивных планетоподобных объектов за орбитой Плутона. Проблемы существования и обнаружения планетоидов в транснептуновом регионе будут рассмотрены ниже. Конец 1980-х и начало 1990-х годов ознаменовались появлением серии работ, объясняющих аномалии в движении Нептуна и Урана возможным существованием десятой планеты [7, 8]. В работе Брунини и Мелиты [9] предпринялась попытка объяснения наблюдаемого распределения ТНО. Отмечая, что на 50 а.е. возмущения от Нептуна незначительны, а также, что эффект динамического трения является достаточным условием сохранения объектов на стабильных орбитах, необходимым условием современного распределения объектов пояса Койпера является наличие какого-либо внешнего возмущения. Заклучая, что проходящая звезда, не зависимо от того, проходила она относительно Солнца по прямолинейной траектории или по параболической орбите, не вызывает возмущения, необходимые для формирования наблюдаемого распределения объектов пояса Койпера, приходят к выводу, что единст-

венным возможным механизмом динамического возмущения является десятая планета, располагающаяся за орбитой Нептуна и Плутона.

Это, однако, не означает, что планета была сформирована путем аккреции именно в этом регионе (за орбитой Плутона). Морбиделли доказал невозможность формирования планеты на расстоянии порядка 50 а.е. от Солнца [10]. Согласно результатам Левисона и Дункана [1], Нептун и Уран, скорее всего, также были сформированы не в области современных орбит, а между Юпитером и Сатурном. Подобные результаты были получены в работе Брунини и Мелиты [9]. Из них следует, что планетазималий десятой планеты был выброшен за орбиту Нептуна в момент перехода последнего на орбиту близкую современной. И эта орбита оказалась устойчивой.

Данная работа посвящена исследованию модели в которой современное распределение транснептуновых объектов является следствием влияния планеты или планетоида, расположенного за орбитой Нептуна.

2. Результаты

2.1. Модель

Исследовалось действие планетоида – планетаподобного тела – с варьируемыми элементами орбиты и массой на орбиты исследуемых объектов, расположенных в различных, удаленных от Нептуна, областях. Масса планетоида ограничилась одной массой Земли. Поскольку все планеты Солнечной системы имеют малый угол наклона орбиты к плоскости эклиптики, то наклон орбиты планетоида ограничен двадцатью градусами. В результате предварительных расчетов было обнаружено, что орбита планетоида с отличным от нуля значением аргумента перигелия сильнее возмущает орбиты исследуемых тел в сравнении со случаем нулевого значения аргумента перигелия. Поэтому во всех моделях планетоида принималось ненулевое значение аргумента перигелия его орбиты.

Орбиты исследуемых объектов располагались вблизи орбиты планетоида. Начальные наклоны и эксцентриситеты равнялись нулю, аргументы перигелия и восходящего узла, средняя аномалия являлись случайными числами, равномерно распределенными в пределах (0–360°). Время интегрирования составило $4,6 \cdot 10^9$ лет, что составляет время жизни Солнечной системы. Элементы орбит исследуемых объектов записывались через 1000 оборотов. Ввиду того, что большинство транснептуновых объектов находятся не на стационарных орбитах, при анализе распределения орбит объектов, полученного влиянием планетоида на исследуемые тела, рассматривали орбиты тел, получаемые в процессе динамической эволюции через каждые 1000 оборотов. Вычисления проводились симплектическим интегратором Емельяненко.

Для оценки соответствия распределения объектов на квазистационарных орбитах для разных моделей планетоида учитывалось несколько критериев, характерных для наблюдаемого распределения ТНО. В частности, как видно из рис. 1, на котором представлена зависимость эксцентриситетов от большой полуоси, нижний предел перигелийных расстояний ограничен 30 а.е., что соответствует положению Нептуна.

Верхний предел перигелийных расстояний в области пояса Койпера ограничен значением в 47 а.е., для объектов на сильно эллиптических орбитах меньше и соответствует примерно 45 а.е. Вполне возможно, что с развитием наблюдательной техники максимальный предел перигелийных расстояний для этих объектов увеличится. Еще одной особенностью распределения транснептуновых объектов является отсутствие тел с малыми эксцентриситетами в области за 50 а.е. По крайней мере, мы это можем утверждать для области до 70 а.е., что примерно соответствует предельному расстоянию на котором возможны наблюдения малых объектов (с диаметром меньше 100 км.) [11]. На рис. 2 представлена зависимость наклона обнаруженных объектов от большой полуоси. Легко заметить, что наклон орбит обнаруженных объектов не зависит от значения большой полуоси и для всех значений большой полуоси максимальный наклон ограничен значением $\sim 40^\circ$. Однако, это ограничение может быть связано не со строением пояса Койпера, а наблюдательной селекцией. Из гистограммы распределения ТНО по наклонам (рис. 3) видно, что наибольшее количество транснептуновых объектов имеют орбиты с малым углом наклона. При этом существует множество тел с наклоном орбиты больше 35° . Важным критерием при оценке пригодности модели планетоида является наличие объектов на сильно эллиптических орбитах с перигелиями в пределах 32–45 а.е. со значениями больших полуосей в пределах 60–250 а.е. (рис. 4).

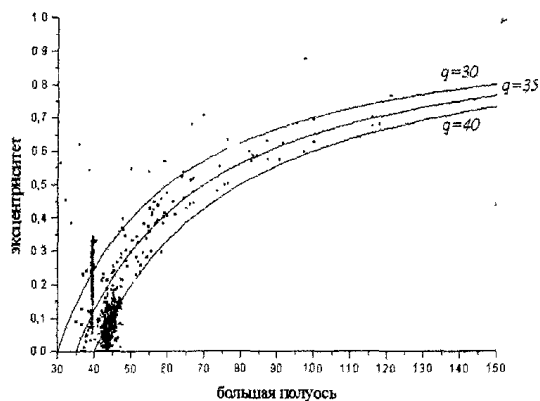


Рис. 1. Зависимость эксцентриситетов орбит от больших полуосей. Наблюдаемое распределение

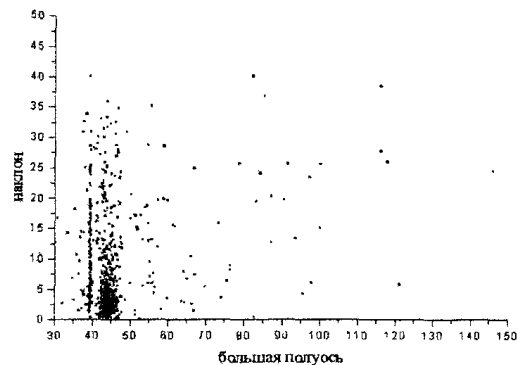


Рис. 2. Зависимость наклонов орбит от больших полуосей. Наблюдаемое распределение

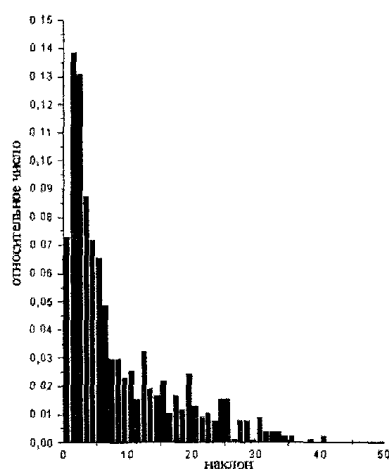


Рис. 3. Распределение орбит ТНО по наклонам

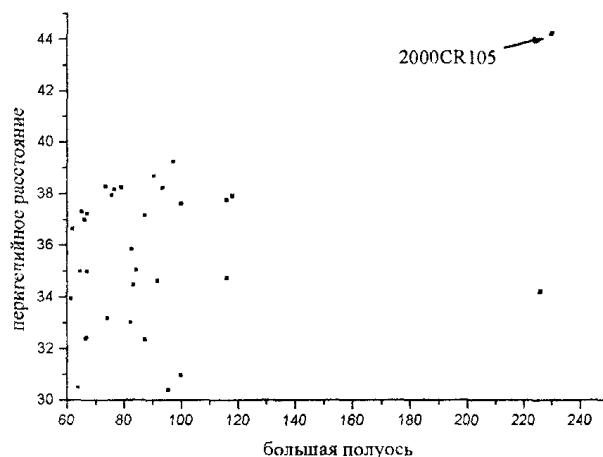


Рис. 4. Зависимость перигелийных расстояний орбит от больших полуосей. Наблюдаемое распределение

2.2. Планетоид на 60 а.е.

Одной из попыток объяснения наблюдаемого распределения ТНО явилась модель планетоида с элементами орбиты, аналогичными используемым в работе Брунини и Мелиты [9]: большая полуось $a = 60$ а.е., перигелийное расстояние $q = 54$ а.е. На рис. 5, рис. 6 и рис. 7 представлены результаты расчетов для планетоида с наклоном орбиты $i = 10^\circ$, аргументом перигелия $\omega = 10^\circ$ и массой $M = M_\oplus$. Возмущаемые тела находились на круговых орбитах с большими полуосями, распределенными равномерно в пределах 40–100 а.е. с нулевыми наклонами.

Из рис. 5 видно, что в распределении имеется избыточная концентрация объектов в области значений перигелийного расстояния, равного 60 а.е., что соответствует большой полуоси возмущающего тела. Также видно, что планетоид способствует появлению объектов на сильно эллиптических орбитах («SDO»). Около 0,6 процентов первоначального состава можно отнести к данной группе тел. При этом, перигелийное расстояние не приблизилось к значениям, характерным для объектов на сильно эллиптических орбитах с перигелийным расстоянием порядка 40 а.е., как у знаменитого *2000CR105* ($q = 43$ а.е.). В то же время в процессе интегрирования всего 19 процентов от первоначального количества объектов попало в планетную область с $q < 30$ а.е. или попали на сильно эллиптическую орбиту с $a > 200$ а.е. Согласно современным исследованиям [9, 12], существующее количество транснептуновых объектов составляет примерно сотую часть от первоначального состава. Это обуславливается тем, что для роста вследствие аккреции пары Плутон-Харон первоначальная масса должна быть на два порядка выше современной.

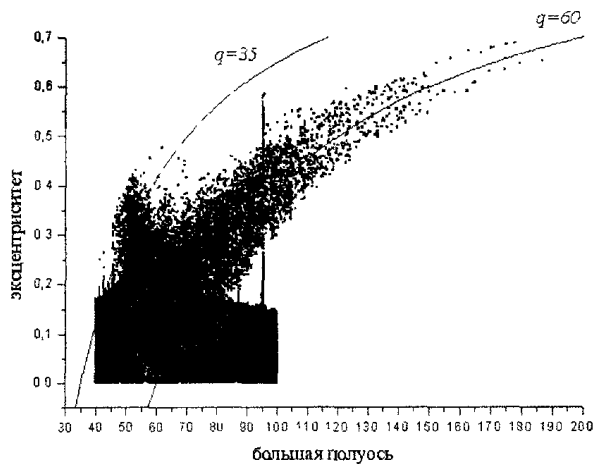


Рис. 5 Зависимость эксцентриситетов орбит от больших полуосей. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 10^{\circ}$, $\omega = 10^{\circ}$, $a = 60$ а.е., $q = 54$ а.е.

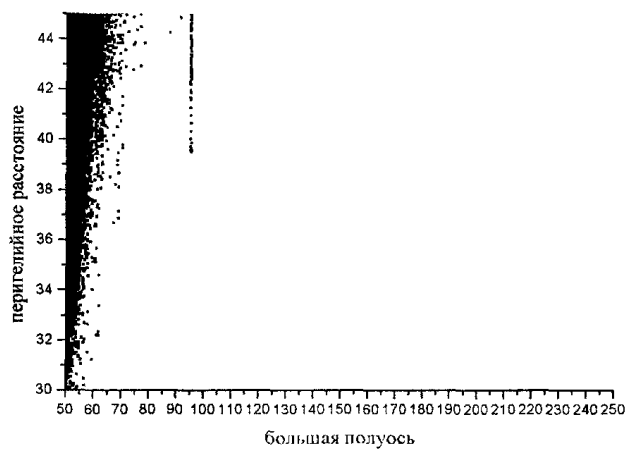


Рис. 6. Зависимость перигелийных расстояний орбит от больших полуосей. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 10^{\circ}$, $\omega = 10^{\circ}$, $a = 60$ а.е., $q = 54$ а.е.

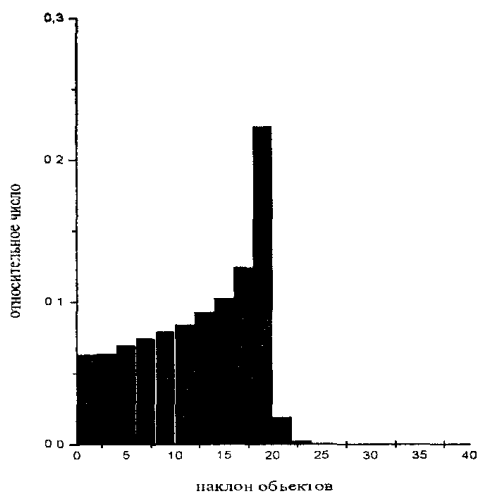


Рис. 7. Распределение наклонов орбит. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 10^{\circ}$, $\omega = 10^{\circ}$

Сейчас полагают [10], что суммарная масса транснептуновых объектов $\sim 0,3M_{\oplus}$. В результате расчетов получено, что наклоны орбит объектов не превышают 30° , хотя на данный момент было обнаружено достаточно много объектов с наклоном больше 35° . Хотелось бы обратить внимание на то, что объекты с первоначальным значением большой полуоси более 75 а.е. практически не испытали возмущений.

При увеличении наклона возмущающего тела до 20° и аргумента перигелия до 20° , картина распределения исследуемых объектов меняется незначительно. Однако наклоны орбит достигают 46° , при этом отсутствуют объекты на сильно эллиптических орбитах, и разрушению подверглось всего 10% первоначального состава объектов.

На рис. 8 и рис. 9 представлены результаты для тех же самых элементов орбиты возмущающего тела, с массой $M = 0,3M_{\oplus}$. В данном случае ввиду малой массы планетоида мы ограничились рассмотрением влияния на классический пояс Койпера (большая полуось в пределах от 40 а.е. до 45 а.е.).

Из распределения объектов видно, что массы Марса недостаточно для формирования наблюдаемого распределения ТНО. Наклоны орбит объектов не превышают 22° (рис. 9). Большинство объектов сгруппировались по перигелиям вблизи 35 а.е. (рис. 8), и появился только один объект с сильно эллиптической орбитой и то с перигелийным расстоянием вблизи орбиты Нептуна ($a = 400$ а.е., $q = 31,5$ а.е., $i = 7,5^{\circ}$), при этом разрушению подверглось всего 25% от первоначального состава количества объектов.

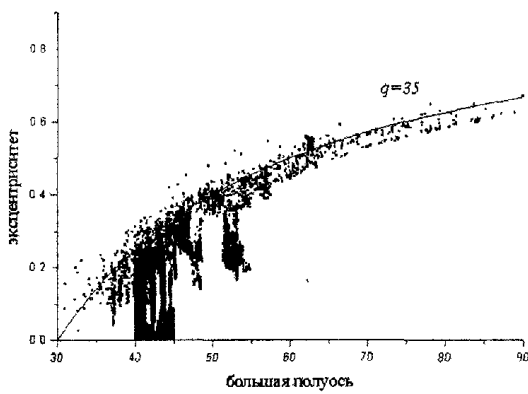


Рис. 8. Зависимость эксцентриситетов орбит от больших полуосей. Планета с $M = 0,3M_{\oplus}$, $i = 10^\circ$, $\omega = 10^\circ$, $a = 60$ а.е., $q = 54$ а.е.

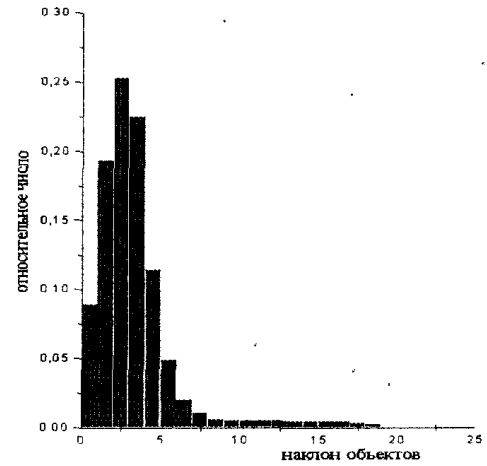


Рис. 9. Распределение наклонов орбит. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 10^\circ$, $\omega = 10^\circ$, $a = 60$ а.е., $q = 54$ а.е.

Хотелось бы обратить внимание на то, что во всех трех описанных моделях варьировались элементы орбиты и масса десятой планеты, распределения исследуемых объектов в области наблюдаемых тел на сильно эллиптических орбитах (перигелийное расстояние в пределах 32–45 а.е., большая полуось 60–250 а.е.) аналогичны и не соответствуют наблюдаемому. Эксцентриситеты исследуемых тел не превышают 0,5 (рис. 7). Например, обнаружены объекты с перигелийным расстоянием порядка 35 а.е. и большой полуосью порядка 100 а.е. (рис. 4), однако, они отсутствуют во всех трех моделях.

Во всех моделях планеты с большой полуосью порядка 60 а.е. эксцентриситеты объектов не превышают 0,5. При этом объекты из резонансной зоны 2:5 с Нептуном не сохранились. Распределение орбит объектов по наклонам также далеко от наблюдаемого. Даже если учесть, что основные наблюдения ведутся вблизи плоскости эклиптики, маловероятно, что реальное распределение объектов по наклонам соответствует полученному (рис. 6).

Таким образом, ни одна модель планеты на 60 а.е. не способна объяснить наблюдаемое распределение ТНО. Планета с большой массой вызывает настолько сильные возмущения, что из области классического пояса Койпера выбрасывает практически все объекты, но при этом не появляются тела на сильно эллиптических орбитах с перигелийным расстоянием порядка 34 а.е. и эксцентриситетом больше 0,5 (рис. 7).

Как уже отмечалось, аналогичная модель исследовалась Брунини и Мелитой [9], однако их результаты оказались несколько другими. В своей статье они показали, что новая планета с массой Марса, большой полуосью 60 а.е., перигелийным расстоянием 54 а.е. и наклоном 10 градусов достаточно хорошо объясняет современное распределение транснептуновых объектов. В данной работе было показано, что массы Марса недостаточно для формирования объектов на сильно эллиптических орбитах. Дело в том, что они использовали другой способ интегрирования: вычисляли возмущения от планеты только в случае попадания объекта в его сферу действия. Конечно, данный метод способствует уменьшению времени интегрирования, однако приводит к неточным результатам.

2.3. Планетоид на 200 а.е.

Возможность существования планетоида за 100 а.е. может объясняться наличием обрыва в значениях больших полуосей в распределении ТНО за 120 а.е. и их появление в области около 200 а.е. Данное предположение было рассмотрено путем введения планетоида с большой полуосью орбиты 200 а.е., перигелийным расстоянием 180 а.е., наклоном и аргументом перигелия по 10 градусов и массой равной одной массе Земли. Большие полуоси для исследуемых тел располагались в пределах 180–200 а.е. Традиционно считается, что пояс Койпера ограничен по значениям большой полуоси примерно 50 а.е. [11] и на расстоянии 200 а.е. от Солнца отсутствуют тела на круговых орбитах.

Предположение о том, что пояс Койпера простирается дальше и имеются объекты на круговых орбитах с большой полуосью, превышающей 70 а.е., выдвинул Гладман [3], расширив пояс Койпера на большее расстояние от Солнца. Отсутствие обнаруженных объектов с круговой орбитой на расстоянии порядка 70 а.е. он объяснил сложностью наблюдения.

В результате расчетов получилось, что под действием планеты появилась избыточная концентрация объектов вблизи ее орбиты: с перигелийным расстоянием 200 а.е. а так же с афелийным расстоянием ~ 250 а.е. (рис. 10).

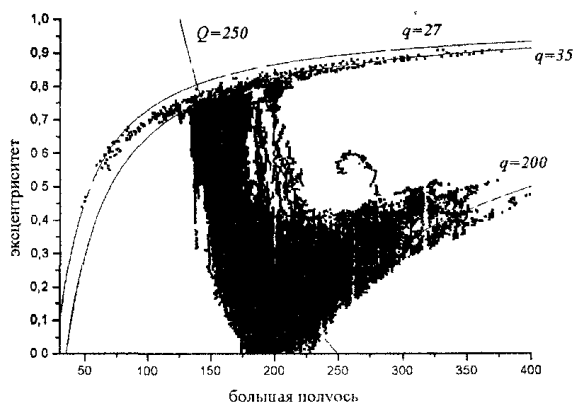


Рис. 10. Зависимость эксцентриситетов орбит от больших полуосей. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 10^{\circ}$, $\omega = 10^{\circ}$, $a = 200$ а.е., $q = 180$ а.е.

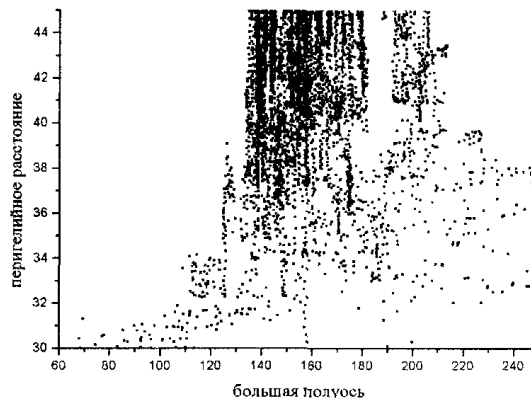


Рис. 11. Зависимость перигелийных расстояний орбит от больших полуосей. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 10^{\circ}$, $\omega = 10^{\circ}$, $a = 200$ а.е., $q = 180$ а.е.

Из анализ распределения орбит объектов можно сделать вывод о том, что данной планетой возможно объяснить существование транснептуновых объектов на сильно эллиптических орбитах с перигелийными расстояниями в пределах 32–44 а.е. (рис. 4). Например, появились объекты, аналогичные *2000CR105*, или *2001FP185*. Однако в результате расчетов вообще отсутствуют объекты со значениями большой полуоси порядка 60 а.е. и перигелийным расстоянием в пределах 30–45 а.е. (рис. 11).

2.4. Планетоид из внутреннего облака Оорта

Предположение о существовании массивного тела — планетоида — из внутреннего облака Оорта, имеющего сильно эксцентрическую орбиту и значительную массу, явилось бы хорошей, все объясняющей и не нарушающей никакие современные космогонические представления, теорией. Имея большую полуось в области облака Оорта, данное тело имело бы значительный период обращения вокруг Солнца, и вопрос обнаружения данного тела можно было бы не рассматривать. Важным моментом является возможность любых наклонов планеты, поскольку она являлась бы телом из внутреннего облака Оорта, имеющего изотропное распределение [6]. Однако, данная модель не объясняет причины современного распределения объектов пояса Койпера. Была проведена серия расчетов для численного исследования данной модели. При расчетах масса планетоида варьировалась до массы Нептуна, а наклон варьировался до 90° , поскольку облако Оорта является сферическим. Ввиду того, что проходящие звезды могут выбросить планетоид на гиперболическую орбиту, время интегрирования было ограничено 500 миллионами лет, что примерно соответствует времени между тесными сближениями Солнца с проходящими звездами [6]. По истечении 500 миллионов лет планетоид не внес существенных изменений в динамическую эволюцию транснептуновых объектов. Конечное распределение объектов практически совпало с распределением, получающимся в результате действия одного Нептуна. Наклоны объектов не превысили 20 градусов, совершенно отсутствуют объекты на сильноэллиптических орбитах. По всей вероятности это объясняется тем, что кратковременные возмущения на внешнюю часть Солнечной системы, даже под действием тела с массой в несколько земных масс, не способны значительно возмутить круговые орбиты малых тел на расстоянии в пределах 40–50 а.е. от Солнца и способствовать формированию современного пояса Койпера.

2.5. Планетоид на 100 а.е.

Если посмотреть на распределение объектов, получаемое действием планетоида, имеющего большую полуось 200 а.е., то можно предположить, что если его поместить несколько ближе, то распределение объектов должно сместиться в сторону меньших значений большой полуоси. Было рассмотрено влияние планетоида со значением большой полуоси 100 а.е., перигелийным расстоянием 85 а.е. и наклоном 20° на объекты, расположенные на круговых орбитах и значениями больших полуосей в пределах 40–100 а.е. Как видно из рис. 12, данная модель достаточно хорошо объясняет существование объектов на сильноэллиптических орбитах со значениями большой полуоси порядка 200 а.е. С другой стороны, объекты из резонансной области 2:5 с Нептуном со значением большой полуоси орбиты порядка 54 а.е. и малыми значениями перигелийного расстояния не сохранились (рис. 13).

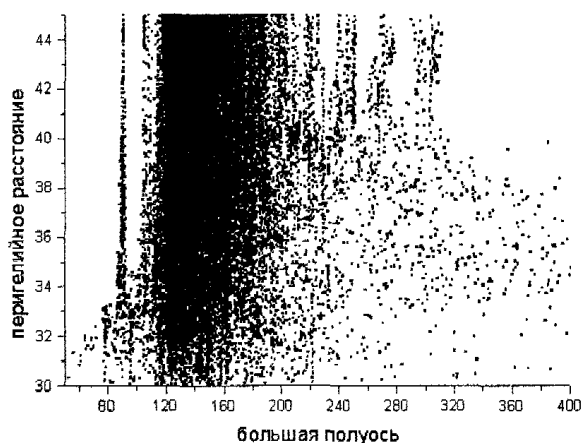


Рис. 12 Зависимость перигелийных расстояний орбит от больших полуосей. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 20^\circ$, $\omega = 10^\circ$, $a = 100$ а.е. $q = 85$ а.е.

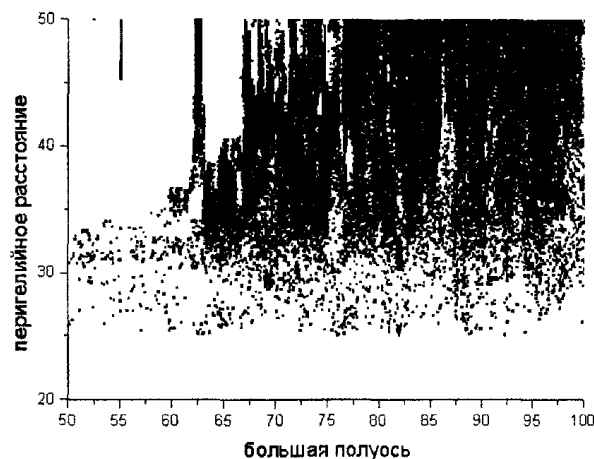


Рис. 13 Зависимость перигелийных расстояний орбит от больших полуосей. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 20^\circ$, $\omega = 10^\circ$, $a = 100$ а.е. $q = 85$ а.е.

Если наклон планетоида положить равным 160° (обратное движение планеты), это приводит к тому, что результаты существенно меняются (рис. 14 и рис. 15). Было рассмотрено влияние планетоида со значением большой полуоси 80 а.е. и перигелийным расстоянием 60 а.е. на то же первоначальное распределение объектов. Большие полуоси и перигелийные расстояния исследуемых тел в области до 60 а.е. не испытали существенного влияния от планеты.

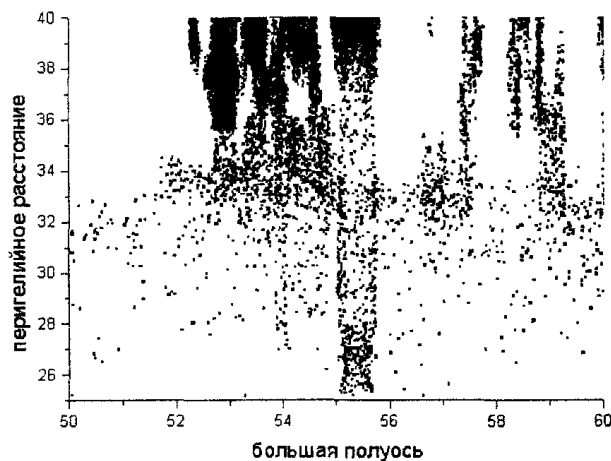


Рис. 14. Зависимость перигелийных расстояний орбит от больших полуосей. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 160^\circ$, $\omega = 10^\circ$, $a = 80$ а.е. $q = 60$ а.е.

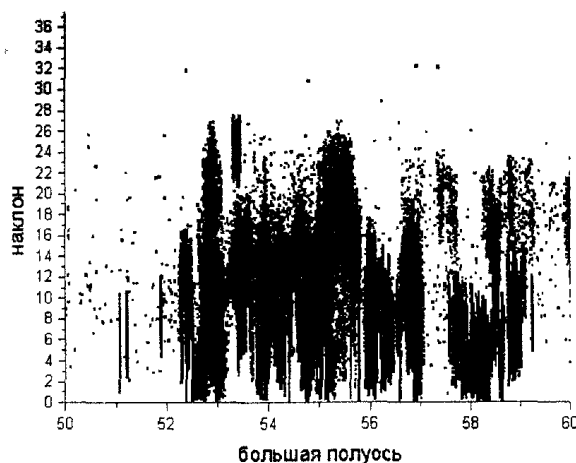


Рис. 15. Зависимость наклонов орбит от больших полуосей. Планета с $M=M_{\oplus}$, $i = 160^\circ$, $\omega = 10^\circ$, $a = 80$ а.е. $q = 60$ а.е.

То есть все обнаруженные резонансные объекты в области до 60 а.е. сохранились. При этом, наклоны тел достигли 36° . Это явилось следствием того, что в случае обратного движения планетоида, исследуемые тела испытывают достаточно кратковременное воздействие со стороны планеты и элементы их орбит не претерпевают существенного изменения. Но этого воздействия достаточно для изменения наклонов орбит этих тел. Действием одного только Нептуна столь высокие наклоны тел объяснить невозможно. При численном моделировании, как уже говорилось выше, Нептун способен вызвать наклоны объектов не выше 15° в то время как обнаружены объекты в резонансе с Нептуном 2:5 и наклонами до 30° . У обнаруженных объектов в резонансной области со значением большой полуоси в пределах 55–56 а.е. наклоны тел с перигелийным расстоянием до 35 а.е. действительно невелики и не превышают 10° , что объясняется тем, что эти объекты появились вследствие влияния Нептуна. Но наклоны объектов с большим перигелийным расстоянием достигают 30° , что может объясняться только внешним влиянием.

Заключение

Таким образом было показано, что ни одна модель новой планеты не в состоянии в полной мере объяснить распределение обнаруженных транснептуновых объектов. Таким образом, наиболее предпочтительным выводом будет предположение о том, что у транснептуновых объектов различная динамическая эволюция. Планета, расположенная на расстоянии порядка 60 а.е. не способна сформировать наблюдаемое распределение орбит тел. Как было продемонстрировано, планета на таком расстоянии или выбрасывает тела на сильноэллиптические орбиты со значением большой полуоси порядка 1000 а.е. или способствует захвату этих объектов Нептуном. При этом объекты со значением эксцентриситета больше 0,5 и перигелийным расстоянием в пределах 30–60 а.е. не появились в результате расчетов. На существование планеты на расстоянии порядка 60 а.е. настаивали Брунини и Мелита, но они в своей работе использовали упрощенные методы вычисления: вычисляли возмущения от планеты только в случае попадания объекта в поле действия планеты. Однако, в связи с тем что во внешней части Солнечной системы влияние Солнца и больших планет незначительно, то необходимо учитывать все возмущения, сколь малыми они бы не были.

Модель планеты, приходящей из облака Оорта также не дала осязаемого результата. Видимо времени, проводимого планетой вблизи планетной области недостаточно для формирования распределения, эквивалентного наблюдаемому.

Помещение планеты на 200 а.е. ($a = 200$ а.е., $q = 180$ а.е.) приводит к тому, что исследуемые объекты либо переходят на орбиты малым значением перигелийного расстояния (порядка 30 а.е.), либо с большим (порядка значения большой полуоси планеты). На расстоянии порядка 200 а.е. возмущения от Нептуна отсутствуют и поэтому в данной области объекты испытывают возмущения только от планеты. Под действием этих возмущений формируются объекты, орбиты которых напоминают орбиты *2000CR105* или Седны. (рис. 11). С другой стороны, под действием возмущений планеты на 200 а.е. невозможно получить так называемые *SDO*. Вполне возможно, что имеется много больше объектов с элементами орбиты аналогичными *2000CR105*, и можно с достаточной долей уверенности сказать, что у объектов на сильноэллиптических орбитах с большим значением большой полуоси динамическая эволюция отличается от эволюции так называемых *SDO*. Скорее всего, *2000CR105* и Седна получились вследствие действия массивного тела, находящимся на расстоянии порядка 200 а.е.

Наиболее предпочтительной является модель планеты, расположенной на расстоянии порядка 100 а.е. Если поместить планету несколько ближе ($a = 100$ а.е., $q = 85$ а.е.), то это приводит к тому, что планета выбрасывает тела из области резонанса 2:5. Однако, если наклон планеты положить равным 160° , в результате формируется распределение орбит объектов, практически эквивалентное наблюдаемому для тел на сильно эллиптических орбитах и для резонансов. Например, самый значительный резонанс с Нептуном 2:5. У объектов, движущихся в этом резонансе наклоны достаточно велики, однако, как уже упоминалось, Нептун не способен сформировать объекты со значением угла наклона орбиты больше 15° . Однако, в данной модели объекты, аналогичные *2000 CR105* или Седна не получились.

Таким образом, хотелось бы сделать несколько выводов. Скорее всего, в Солнечной системе имеется достаточно массивное тело, чтобы назвать его планетой. Похоже, что планета должна

совершать обратное движение, хотя это странно, поскольку у орбит всех планет Солнечной системы наклоны невелики. Вполне возможно, что большая полуось этой планеты порядка 100 а.е., а перигелийное расстояние порядка 85 а.е. Вполне возможно, что эта планета сейчас находится в афелии и обнаружить ее не представляется возможным. Довольно большим допущением будет являться предположение о существовании второй неизвестной планеты на расстоянии порядка 200 а.е. Как было продемонстрировано, ни одна модель планеты не в состоянии объяснить видимое распределение ТНО. Две планеты, одна из которых располагается на расстоянии порядка 90 а.е. и имеет обратное движение, а вторая располагается на расстоянии порядка 200 а.е. достаточно хорошо объясняют видимое распределение ТНО. Данный вывод вполне согласуется с предположением Радзиевского о существовании в Солнечной системе планеты с обратным движением и возможным существовании еще одной планеты на более удаленном от Солнца расстоянии [13]. В любом случае планету следует искать в той области, где будет наблюдаться избыточная концентрация перигелиев орбит обнаруженных ТНО.

Данная работа была поддержана грантами ИНТАС (00-240), РФФИ-Урал (04-02-96042) и Правительством Челябинской области.

Литература

1. Thomes E.W., Duncan M.J., Levison, H.F. The Formation of Uranus and Neptune among Jupiter and Saturn // *Astron. J.* – 2002. – V.123. – P. 2862–2883.
2. Weissman P.R. The Kuiper belt // *Astr. And Astrophysics.* – 1994. V.215. P. 1–23.
3. Gladman B, Kavelaars J.~J., Morbidelli A., Holman M.~J., Loredо T. The structure of the kuiper belt: size sistriburion and radial extent // *Astron. J.* – 2001. – V.122. – P. 1051–1066.
4. Emel'yanenko V.V. Asher D. Bailey M.E. A new class of trans-Neptunian objects in high-eccentricity orbits// *Monthly Notices Royal Astronomical Society* – 2003. – V.338. – P.443–451.
5. Kobayashi, Hiroshi, Ida, Shigeru The Effects of a Stellar Encounter on a Planetesimal Disk // *Icarus.* – 2001. – V.153. – P.416–429.
6. Марочник Л.С. Свидание с кометой. – М.: Наука, 1985. – 82с.
7. Garryngton R.S. The location of planet X // *Astron.J.* – 1988. – V.96. – P. 1476–1478.
8. Brunini A. A theoretical dynamical limit of planet X's based on its perturbations on Urans and Neptune // *Astron.Astrophys.* – 1992. – V.265. – P. 324–327.
9. Brunini A., Melita M.D. The existence of a planet beyond 50 AU and the orbital distribution of the CEKBO // *Icarus,* 2002. – V.160. – P. 32 – 43.
10. Morbidelli A., Jacob C. Planetary embryos never formed in the Kuiper belt // *Icarus.* – 2001. – V.152. – P.241–248.
11. Melita M.D., Brunini M. The edge of the Edgeworth-Kuiper belt // *Astron. J.* – 2002. – V.125. P. 1389–1397.
12. Воронцов-Вельяминов Б.А. Очерки о вселенной. – М.: Наука, 1980. – 175 с.
13. Радзиевский В.В. О существовании трансплутотновых массивных тел с обратным движением // *Анализ движения тел Солнечной системы и их наблюдение, ЛатГУ.* – 1986. – С. 126–141.

Поступила в редакцию 10 сентября 2004 г.