

УДК 523.2

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ МАССИВНОГО ДИСКА ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2021 г. В. В. Емельяненко*

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

**e-mail: vvemel@inasan.ru*

Поступила в редакцию 22.03.2021 г.

После доработки 05.04.2021 г.

Принята к публикации 06.04.2021 г.

Рассмотрены динамические особенности массивного диска далеких транснептуновых объектов в модели образования малых тел в области Хилла гигантского газопылевого сгущения, возникшего вследствие гравитационной неустойчивости и фрагментации протопланетного диска. Изучена динамическая эволюция орбит малых тел под действием гравитационных возмущений от внешних планет и самогравитации диска в течение промежутка времени порядка миллиарда лет. Показано, что вековые эффекты гравитационного влияния массивного диска малых тел приводят к увеличению эксцентриситетов орбит отдельных объектов. Результатом такого динамического поведения является создание потока малых тел, подходящих близко к орбите Нептуна. Изменение числа объектов, сохраняющихся в области наблюдения далеких транснептуновых объектов (область орбит с перигелийными расстояниями $40 < q < 80$ а. е. и большими полуосями $150 < a < 1000$ а. е.), с течением времени зависит от начальной массы диска. Для дисков с массой, превышающей несколько масс Земли, имеется тенденция к уменьшению числа далеких транснептуновых объектов, сохранившихся в области наблюдаемости после эволюции в течение промежутка времени порядка возраста Солнечной системы, с увеличением начальной массы. С другой стороны, для большинства объектов эксцентриситеты орбит уменьшаются под влиянием самогравитации диска. Поэтому основная часть диска сохраняется в области гелиоцентрических расстояний, превышающих 100 а. е.

Ключевые слова: Солнечная система, газопылевые сгущения, транснептуновые объекты, долговременная эволюция, распределение орбит

DOI: 10.31857/S0320930X21040058

ВВЕДЕНИЕ

Открытие транснептуновых объектов (ТНО) оказало огромное влияние на современные воззрения о процессах формирования Солнечной системы. Хотя существование объектов за орбитой Нептуна предсказывалось как в теориях формирования планет (Edgeworth, 1943; Kuiper, 1951), так и в исследованиях происхождения комет (Whipple, 1964; Fernandez, 1980), структура популяции ТНО оказалась значительно сложнее, чем предполагалось ранее. Большой интерес вызвало обнаружение объектов, движущихся по орбитам с большими эксцентриситетами. Недавнее открытие семейства далеких ТНО, движущихся по орбитам с большими полуосями $a > 150$ а. е., дало новую и довольно неожиданную информацию о структуре внешней части Солнечной системы. Необычная группировка угловых элементов орбит этих объектов вблизи определенных значений стала основой для выдвижения гипотезы о существовании далекой планеты, производящей

этот эффект (Trujillo, Sheppard, 2014; Batygin, Brown, 2016).

Хотя динамическая картина выглядит вполне убедительно (Batygin, Morbidelli, 2017), вопрос о действительном существовании девятой планеты Солнечной системы остается открытым. Несмотря на интенсивные поиски, планета до сих пор не обнаружена. В случае существования девятой планеты на орбите, полученной в работах (Batygin, Brown, 2016; Batygin и др., 2019), имеются динамические особенности, которые трудно согласовать с орбитальным распределением как ТНО (Shankman и др., 2017; Kavelaars и др., 2020), так и комет семейства Юпитера (Nesvorný и др., 2017). Представляет огромные трудности и объяснение образования столь массивной и далекой планеты (Batygin и др., 2019).

Однако без дополнительного возмущающего тела в далекой области Солнечной системы трудно объяснить группировку угловых элементов далеких ТНО. Поэтому в работах (Madigan, McCourt, 2016; Sefilian, Touma, 2019; Zderic и др., 2020) было

предложено, что вместо большой планеты существует массивный диск, состоящий из многочисленных объектов значительно меньших размеров. В работе (Emel'yanenko, 2020) показано, что диск далеких малых тел является естественным образованием, если предполагать формирование планетезималей в областях Хилла гигантских сгущений, возникающих в ранней Солнечной системе в результате гравитационной неустойчивости и фрагментации протопланетного диска.

Распределение орбит малых тел, которое получено в модели (Emel'yanenko, 2020), имеет особенности, присущие распределению наблюдаемых далеких ТНО. В этой модели рассматривается движение планетезималей под гравитационным влиянием двух гигантских сгущений, которые мигрируют в газопылевом диске и испытывают тесное сближение друг с другом на относительно коротком промежутке времени в несколько тысяч лет. Однако, чтобы наблюдаться в современную эпоху, первоначальные особенности орбитального распределения должны сохраниться в течение времени жизни Солнечной системы. Известно, что даже для объектов типа Седны планетные возмущения являются достаточно большими, чтобы разрушить первоначальную концентрацию угловых элементов орбиты вблизи определенных значений (например, Saillenfest и др., 2019). В работе (Sefilian, Touma, 2019) показано, что массивный эксцентрический диск может поддерживать начальное распределение угловых элементов орбит ТНО в течение времени жизни Солнечной системы даже в присутствии внешних планет. Однако результаты этой работы относятся к стационарному диску с заданным вековым возмущающим потенциалом и не учитывают эволюцию орбит объектов, составляющих это образование.

В настоящей работе мы рассматриваем долговременную эволюцию орбит далеких ТНО, образовавшихся в соответствии с предположениями статьи (Emel'yanenko, 2020), под действием как возмущений от внешних планет, так и самогравитации диска объектов. Поскольку мы пытаемся выяснить, какие новые эффекты проявляются в распределении орбит в течение длительного промежутка времени, в этой статье в отличие от (Emel'yanenko, 2020) мы изучаем более простую начальную модель, включающую рассмотрение популяции малых тел, сформировавшихся в области Хилла одиночного гигантского сгущения.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОПУЛЯЦИИ ДАЛЕКИХ МАЛЫХ ТЕЛ

Изучается система тел, состоящая из Солнца, гигантского газопылевого сгущения и набора малых тел (планетезималей), расположенных первоначально в области Хилла этого сгущения. Предполагается, что гигантское сгущение обра-

зовалось во внешней части протопланетного диска и мигрирует внутрь вследствие взаимодействия с этим диском согласно аргументам работ (Mayer и др., 2002; Vorobyov, Basu, 2005; Nayakshin, 2010; Baruteau и др., 2011; Zhu и др., 2012; Stamatellos, 2015; Vorobyov, Elbakyan, 2018). Параметры модели соответствуют в основном работе (Emel'yanenko 2020). Гигантское сгущение с массой, равной 17 массам Юпитера, начинает движение в афелии орбиты с большой полуосью $a = 110$ а. е., перигелийным расстоянием $q = 100$ а. е., наклоном $i = 15^\circ$, долготой перигелия $\pi = 98^\circ$ (элементы орбиты в этой статье являются гелиоцентрическими и относятся к плоскости эклиптике). Предполагается, что планетезимали образовались во внешней части области Хилла и первоначально располагаются в плоскости гелиоцентрического движения сгущения на круговых орбитах с радиусом r относительно его центра. В данной статье мы рассматриваем планетезимали в области $0.5R_H < r < 0.85R_H$, где $R_H = 20$ а. е. — радиус сферы Хилла сгущения в афелии. При дальнейшем движении к перигелию и миграции сгущения планетезимали начинают покидать окрестность сгущения вследствие сокращения области Хилла. При этом их орбиты испытывают большие гравитационные возмущения от гигантского сгущения. Движение сгущения рассматривается до момента достижения им орбиты с $q = 35$ а. е. Согласно работе (Vorobyov, Elbakyan, 2018) на таком расстоянии от Солнца орбита быстро округляется вследствие взаимодействия с протопланетным газовым диском, и сгущение начинает разрушаться вследствие приливных эффектов. В любом случае, в дальнейшем сгущение слабо возмущает орбиты далеких малых тел. Изменение гелиоцентрического расстояния сгущения представлено на рис. 1.

Рис. 2 показывает распределение больших полуосей и перигелийных расстояний на конечный момент времени для орбит малых тел с $q > 30$ а. е., $150 < a < 1000$ а. е., а рис. 3 — распределение долгот перигелиев и перигелийных расстояний на конечный момент времени для тех же объектов.

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНОГО ДИСКА ДАЛЕКИХ МАЛЫХ ТЕЛ

Объекты, распределение элементов орбит которых представлено на рис. 2 и 3, стали основой для последующего изучения долговременной эволюции. Из всей совокупности этих объектов была взята случайная выборка, содержащая 340 объектов. В дальнейшем полагалось, что 170 объектов являются массивными и имеют одинаковую массу, и 170 объектов имеют нулевую массу. Рассматривались варианты, в которых суммарная масса массивных объектов M_d имеет различные значения: 2, 6, 10, 14 и 18 M_E , где M_E — масса Земли.

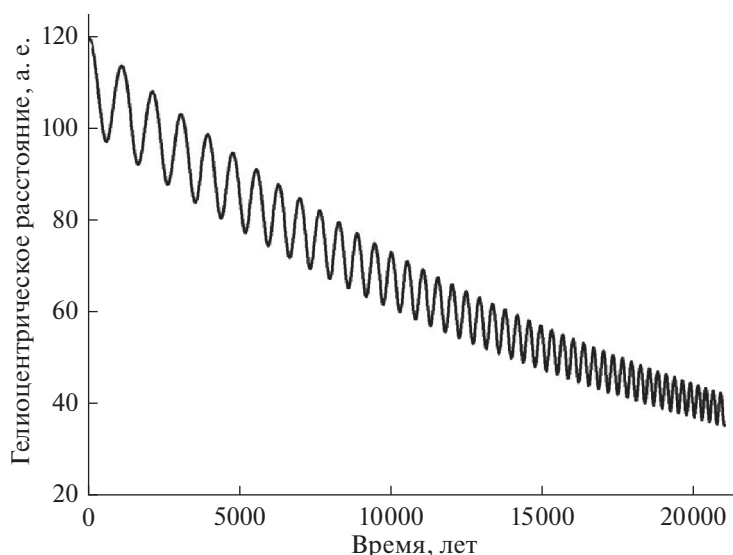


Рис. 1. Изменение гелиоцентрического расстояния гигантского сгущения.

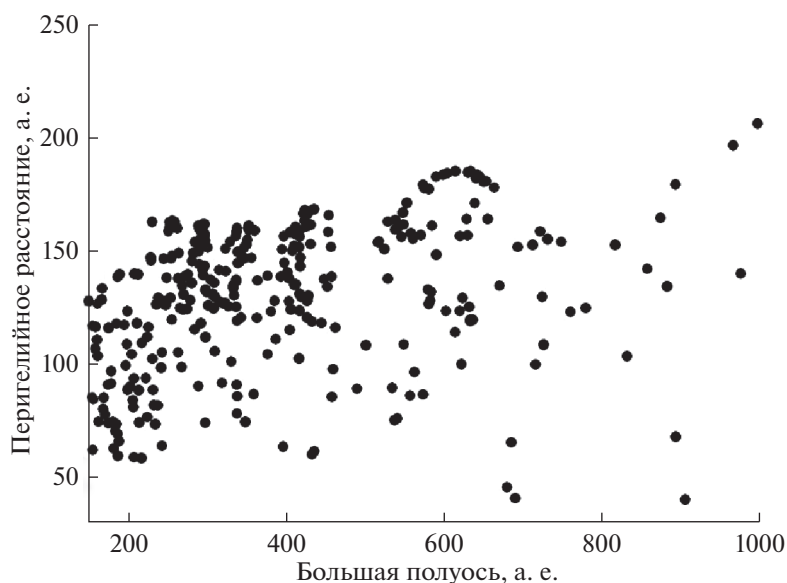


Рис. 2. Распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для далеких малых тел, возникшее под действием гравитационных возмущений от гигантского сгущения.

В дополнение к самогравитации диска далеких объектов учитывались возмущения от четырех внешних планет. Проводилось численное интегрирование уравнений движения на основе использования симплектического интегратора (Emel'yanenko, 2007). При этом возмущающие функции для Юпитера, Сатурна и Урана усреднялись по средним аномалиям планет, и предполагалось, что орбиты этих планет являются круговыми и находятся в плоскости эклиптики. Такая методика используется часто, более подробное описание можно найти, например, в работах

(Burns, 1976; Batygin, Brown, 2016; Zderic, Madigan, 2020). Возмущения от Нептуна учитывались полностью, предполагая современную орбиту этой планеты. Интегрирование для данного малого тела прекращалось, если $a > 1000$ а. е. или $q < 24$ а. е., а также в случае его столкновения с другим объектом.

Вычисления показали, что вековые эффекты гравитационного влияния массивного диска малых тел оказывают преобладающее влияние на эволюцию орбиты индивидуального объекта вдали от орбиты от Нептуна. Ряд динамических свойств диска, возникающих вследствие этих эф-

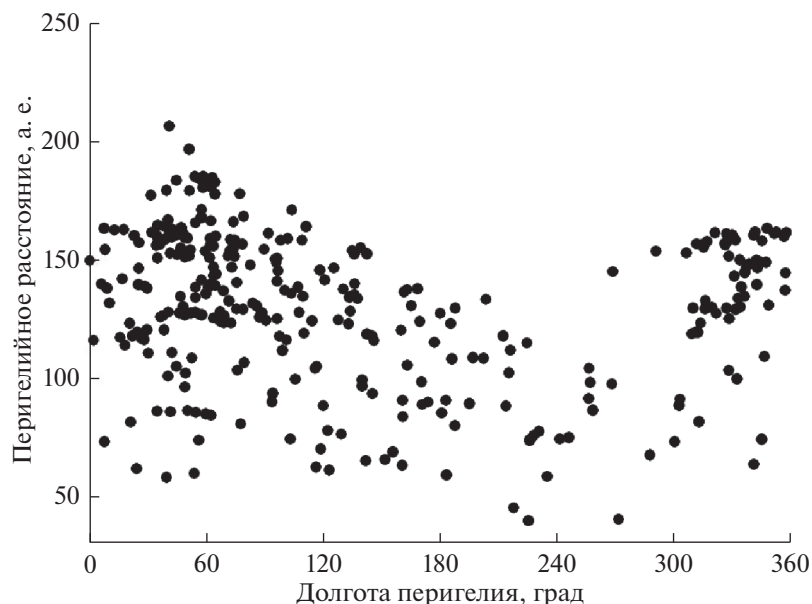


Рис. 3. Распределение долгот перигелиев и перигелийных расстояний для далеких малых тел, возникшее под действием гравитационных возмущений от гигантского сгущения.

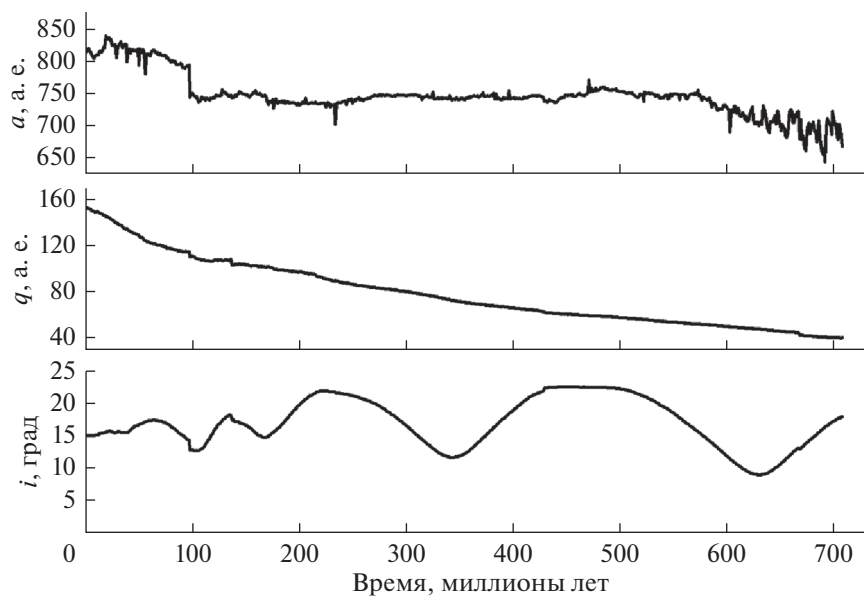


Рис. 4. Изменение большой полуоси, перигелийного расстояния и наклона орбиты для далекого объекта, проникающего к орбите Нептуна (использованы данные с интервалом один млн лет).

фектов, выявлен в работах (Madigan, McCourt, 2016; Madigan и др., 2018). Рис. 4 демонстрирует типичный пример эволюции орбиты далекого объекта к орбите Нептуна. Систематическое уменьшение перигелийного расстояния показывает, что основные изменения орбиты не связаны с тесными сближениями объектов.

Указанное динамическое поведение отдельных объектов приводит к тому, что создается по-

ток малых тел, подходящих близко к орбите Нептуна. Рис. 5 показывает количество малых тел в области $40 < q < 80$ а. е., $150 < a < 1000$ а. е. (область наблюдения далеких ТНО) для различных начальных масс диска. Вначале число объектов возрастает, а затем поток тел, приходящих в эту область, становится меньше потока тел, покидающих ее.

Основной механизм, приводящий к уменьшению числа малых тел в зоне наблюдения далеких

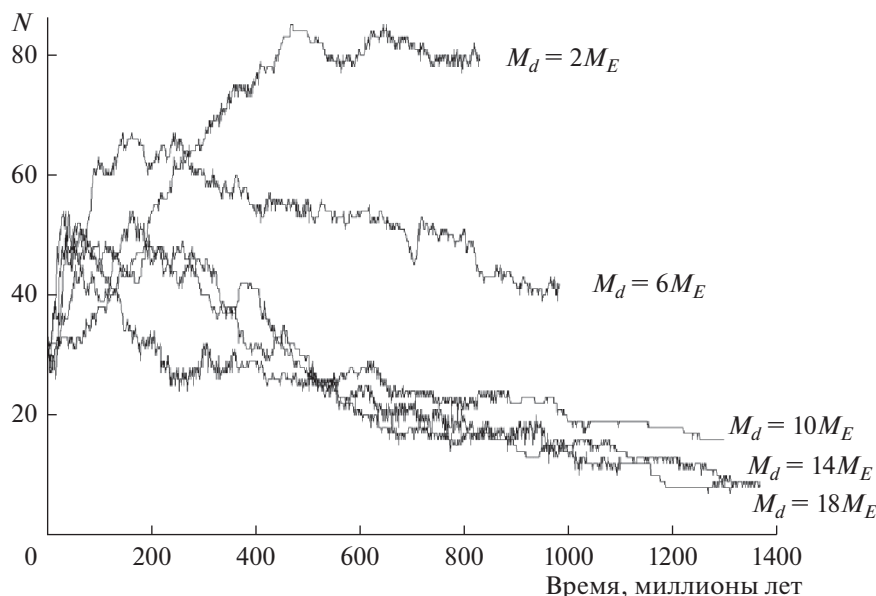


Рис. 5. Изменение числа малых тел N в области $40 < q < 80$ а. е., $150 < a < 1000$ а. е. для различных начальных масс диска (приведены данные с интервалом один млн лет). Во всех вариантах начальное число $N = 30$.

ТНО, связан с большими возмущениями от Нептуна при подходе объектов к орбите этой планеты. В этом случае возможен как захват объектов внутрь Солнечной системы ($q < 24$ а. е.), так и переход на орбиты с $a > 1000$ а. е. Как видно на рис. 5, число объектов, сохраняющихся в зоне наблюдения далеких ТНО, сильно зависит от массы диска. При $M_d < 10M_E$ темп подхода тел к орбите Нептуна очень низок, поэтому их большая часть сохраняется во внешней части области $40 < q < 80$ а. е. При $M_d > 10M_E$ темп подхода малых тел к орбите Нептуна достаточен для удаления существенной доли объектов из этой области, поэтому число малых тел в зоне наблюдаемости далеких ТНО в этом случае уменьшается со временем значительно быстрее.

Проведение вычислений эволюции объектов в течение времени существования Солнечной системы является чрезвычайно затратным. Поэтому мы аппроксимировали кривые на рис. 5 в областях убывания экспоненциальными функциями и оценили число малых тел через 4.5 млрд лет эволюции для каждого варианта начальной массы диска. При таком подходе масса объектов в области $40 < q < 80$ а. е., $150 < a < 1000$ а. е. через 4.5 млрд лет составляет менее $0.01M_E$ для $M_d = 18M_E$, $0.04M_E$ для $M_d = 14M_E$ и $0.11M_E$ для $M_d = 10M_E$ (для меньших значений M_d оценки являются очень неопределенными).

Поведение распределения долгот перигелиев, которое является наиболее дискуссионным для наблюдаемых далеких ТНО, является сложным. На рис. 6 показано распределение долгот перигелиев и наклонов в области наблюдения далеких

ТНО через 700 млн лет эволюции для вариантов с различными значениями M_d . Хотя для $M_d = 10M_E$ заметны две группировки по долготам перигелия, согласно статистическому критерию Колмогорова–Смирнова вероятность того, что данное распределение не является однородным, равна 0.5. Отметим, что для начального распределения долгот перигелиев, представленного на рис. 3, эта вероятность превышает 0.9999.

Рассмотренный динамический процесс приводит также к появлению объектов в области $30 < q < 40$ а. е., $60 < a < 1000$ а. е. (основная часть так называемого “рассеянного” диска). Во всех вариантах нашей модели масса объектов в этой области не превышает $0.05M_E$ (более точные оценки невозможны вследствие недостаточного числа объектов в проведенном моделировании), что согласуется с оценками, полученными из наблюдений (Gomes и др., 2008).

Основная часть диска сохраняется в области $q > 100$ а. е., как видно на рис. 7, где представлен пример распределения больших полуосей и перигелийных расстояний для объектов с $q > 30$ а. е., $150 < a < 1000$ а. е. через 1.2 млрд лет эволюции для $M_d = 10M_E$. Это распределение значительно отличается от начального распределения, показанного на рис. 2. Орбиты большинства тел после длительной эволюции в массивном диске становятся близкими к круговым. Такое уменьшение эксцентриситетов орбит было ранее обнаружено в работе (Madigan, McCourt, 2016) для эксцентрического кольцеобразного диска. Наше исследование показало, что этот эффект имеет место и для массивных дисков с более сложной структурой.

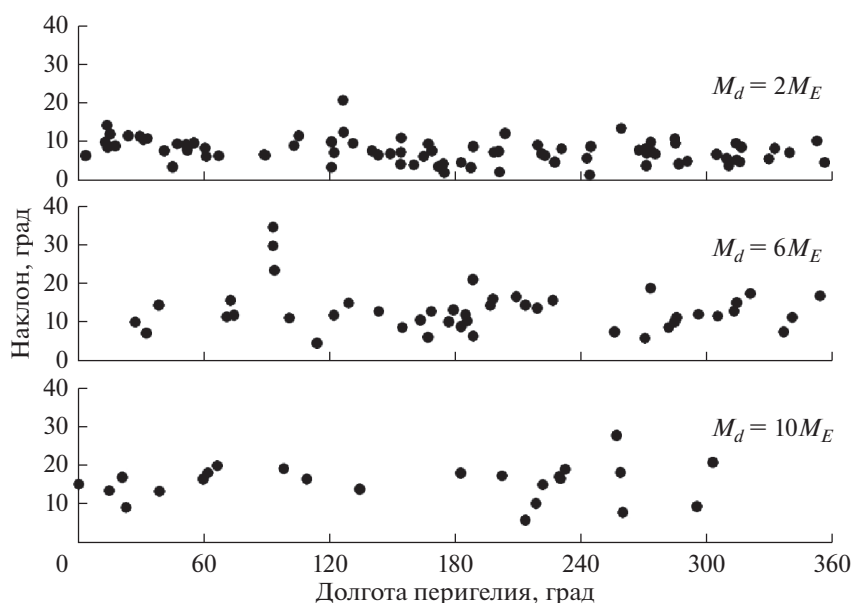


Рис. 6. Распределение долгот перигелиев и наклонов для объектов с $40 < q < 80$ а. е., $150 < a < 1000$ а. е. через 700 млн лет эволюции при различных значениях M_d .

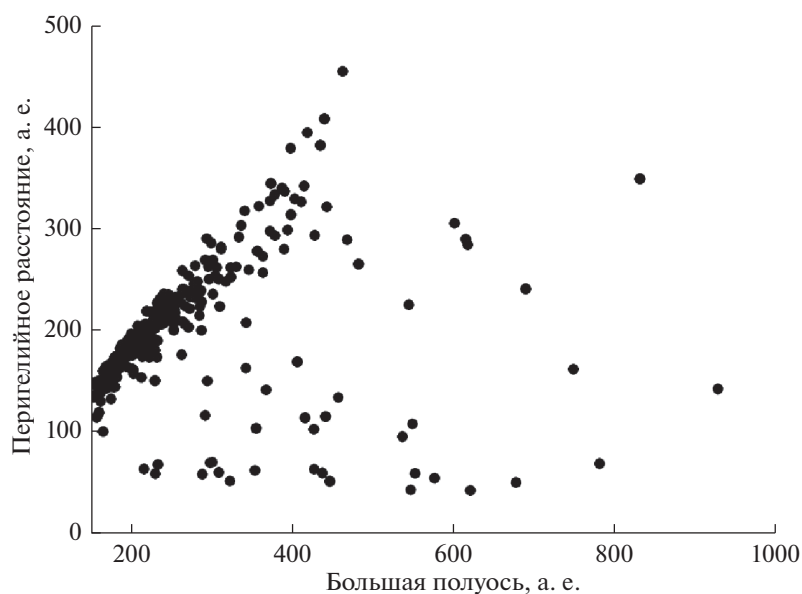


Рис. 7. Распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для объектов с $q > 30$ а. е., $150 < a < 1000$ а. е. через 1.2 млрд лет эволюции при $M_d = 10M_E$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружение далеких ТНО поставило новые вопросы о динамических процессах, не только имевших место в ранней Солнечной системе, но и происходящих сейчас во внешней части Солнечной системы. Современные данные пока недостаточны для надежного заключения о структуре и массе популяции объектов, расположенных далеко за орбитой Нептуна. Поэтому в настоящее время имеются различные воззрения на происхождение далеких ТНО, включая гипотезу о существовании девятой планеты. В статье (Emel'ya-

nenko, 2020) рассмотрено предположение о происхождении планетезималей в областях Хилла мигрирующих гигантских газопылевых сгущений, возникающих вследствие гравитационной неустойчивости и фрагментации протопланетного диска, и показано, что возникающая популяция малых тел имеет распределение орбит, похожее на наблюдаемое распределение орбит наблюдаемых далеких ТНО.

В настоящей работе исследовано, какие новые особенности возникают в распределении орбит далеких ТНО, образовавшихся в соответствии с предположениями статьи (Emel'yanenko, 2020), в

течение промежутка времени порядка миллиарда лет под действием гравитационных возмущений от четырех внешних планет и самогравитации диска малых тел. С этой целью рассмотрена модель, в которой малые тела берут начало в области Хилла гигантского сгущения, и начальное распределение их орбит создается под действием возмущений от этого сгущения при его миграции.

Показано, что вековые эффекты гравитационного влияния массивного диска малых тел приводят к увеличению эксцентриситетов орбит отдельных объектов. Такое динамическое поведение приводит к созданию потока малых тел, подходящих близко к орбите Нептуна. Изменение числа объектов, сохраняющихся в области наблюдения далеких ТНО ($40 < q < 80$ а. е., $150 < a < 1000$ а. е.), с течением времени зависит от начальной массы диска. Полученные оценки для дисков с массой, превышающей несколько масс Земли, указывают, что число далеких ТНО, сохранившихся в области наблюдения после эволюции в течение промежутка времени порядка возраста Солнечной системы, убывает с увеличением начальной массы. С другой стороны, для большинства объектов эксцентриситеты орбит уменьшаются под влиянием самогравитации диска. Поэтому основная часть диска сохраняется в области $q > 100$ а. е.

Автор благодарен рецензентам за полезные замечания.

Автор признателен правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку работы по моделированию и проведению численных экспериментов по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039). Вычисления проведены с использованием суперкомпьютера МВС-100К Межведомственного Суперкомпьютерного Центра РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baruteau C., Meru F., Paardekooper S.-J.* Rapid inward migration of planets formed by gravitational instability // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2011. V. 416. P. 1971–1982.
- Batygin K., Brown M.E.* Evidence for a distant giant planet in the Solar system // *Astron. J.* 2016. V. 151. Article id. 22. 12 p.
- Batygin K., Morbidelli A.* Dynamical Evolution Induced by Planet Nine // *Astron. J.* 2017. V. 154. Article id. 229. 21 p.
- Batygin K., Adams F.C., Brown M.E., Becker J.C.* The planet nine hypothesis // *Physics Reports.* 2019. V. 805. P. 1–53.
- Burns J.A.* Elementary derivation of the perturbation equations of celestial mechanics // *American J. Physics.* 1976. V. 44. P. 944–949.
- Edgeworth K.E.* The evolution of our planetary system // *J. British Astron. Association.* 1943. V. 53. P. 181–188.
- Emel'yanenko V.V.* A method of symplectic integrations with adaptive time-steps for individual Hamiltonians in the planetary N-body problem // *Celest. Mech. and Dynam. Astron.* 2007. V. 98. P. 191–202.
- Emel'yanenko V.V.* Orbital features of distant trans-Neptunian objects induced by giant gaseous clumps // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 642. Article id. L20. 6 p.
- Fernandez J.A.* On the existence of a comet belt beyond Neptune // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1980. V. 192. P. 481–491.
- Gomes R.S., Fernández J.A., Gallardo T., Brunini A.* The scattered disk: Origins, dynamics, and end states // *The Solar System Beyond Neptune / Eds Barucci M.A., Boehnhardt H., Cruikshank D.P., Morbidelli A.* Tucson: Univ. Arizona Press, 2008. P. 259–273.
- Kavelaars J.J., Lawler S.M., Bannister M.T., Shankman C.* Perspectives on the distribution of orbits of distant Trans-Neptunian objects // *The Transneptunian Solar System / Eds Prialnik D., Barucci M.A., Young L.* Elsevier, 2020. P. 61–77.
- Kuiper G.P.* On the origin of the Solar system // *Astrophysics: A Topical Symposium / Ed. Hynek J.A.* N.-Y.: McGraw-Hill, 1951. P. 357–424.
- Madigan A.-M., McCourt M.* A new inclination instability reshapes Keplerian discs into cones: Application to the outer Solar system // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 457. P. L89–L93.
- Madigan A.-M., Zderic A., McCourt M., Fleisig J.* On the dynamics of the inclination instability // *Astron. J.* 2018. V. 156. Article id. 141. 7 p.
- Mayer L., Quinn T., Wadsley J., Stadel J.* Formation of giant planets by fragmentation of protoplanetary disks // *Science.* 2002. V. 298. P. 1756–1759.
- Nayakshin S.* Formation of planets by tidal downsizing of giant planet embryos // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2010. V. 408. P. L36–L40.
- Nesvorný D., Vokrouhlický D., Dones L., Levison H.F., Kaib N., Morbidelli A.* Origin and evolution of short-period comets // *Astrophys. J.* 2017. V. 845. Article id. 27. 25 p.
- Saillenfest M., Fouchard M., Ito T., Higuchi A.* Chaos in the inert Oort cloud // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 629. Article id. A95. 20 p.
- Sefilian A.A., Touma J.R.* Shepherding in a self-gravitating disk of trans-Neptunian objects // *Astron. J.* 2019. V. 157. Article id. 59. 16 p.
- Shankman C., Kavelaars J.J., Lawler S.M., Gladman B.J., Bannister M.T.* Consequences of a distant massive planet on the large semimajor axis trans-Neptunian objects // *Astron. J.* 2017. V. 153. Article id. 63. 9 p.
- Stamatellos D.* The migration of gas giant planets in gravitationally unstable disks // *Astrophys. J. Letters.* 2015. V. 810. Article id. L11. 5 p.
- Trujillo C.A., Sheppard S.S.* A Sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units // *Nature.* 2014. V. 507. P. 471–474.
- Vorobyov E.I., Basu S.* The origin of episodic accretion bursts in the early stages of star formation // *Astrophys. J.* 2005. V. 633. P. L137–L140.
- Vorobyov E.I., Elbakyan V.G.* Gravitational fragmentation and formation of giant protoplanets on orbits of tens of au // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 618. Article id. A7. 15 p.
- Whipple F.L.* Evidence for a comet belt beyond Neptune // *Proc. National Acad. Sci. United States of America.* 1964. V. 51. P. 711–718.
- Zderic A., Collier A., Tiongo M., Madigan A.-M.* Apsidal clustering following the inclination instability // *Astrophys. J. Letters.* 2020. V. 895. Article id. L27. 5 p.
- Zderic A., Madigan A.-M.* Giant-planet influence on the collective gravity of a primordial scattered disk // *Astron. J.* 2020. V. 160. Article id. 50. 13 p.
- Zhu Z., Hartmann L., Nelson R.P., Gammie C.F.* Challenges in forming planets by gravitational instability: Disk irradiation and clump migration, accretion, and tidal destruction // *Astrophys. J.* 2012. V. 746. Article id. 110. 26 p.