

УДК 523.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ И ФОРМИРОВАНИЯ ПОПУЛЯЦИИ ДАЛЕКИХ ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ В МОДЕЛИ НИЦЦЫ

© 2024 г. В. В. Емельяненко *

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 10.12.2023 г.

После доработки 17.01.2024 г.

Принята к публикации 01.02.2024 г.

Проведено численное моделирование взаимодействия планет-гигантов и планетезимального диска для модели Ниццы, в которой начальные орбиты планет находятся в резонансных конфигурациях. В дополнение к стандартной модели Ниццы рассматривались планетезимали в планетной области и учитывалась самогравитация планетезимального диска. Динамическая эволюция планетных систем изучалась на промежутках времени порядка времени существования Солнечной системы. Найдены варианты, в которых планетные системы сохраняются в течение миллиардов лет, финальные орбиты планет близки к современным орбитам и существуют далекие транснептуновые объекты.

Ключевые слова: Солнечная система, транснептуновые объекты, долговременная эволюция, миграция планет, планетезимали

DOI: 10.31857/S0320930X24040101, EDN: LTTNLD

ВВЕДЕНИЕ

Открытие многочисленных экзопланетных систем и обнаружение популяции транснептуновых объектов со сложной структурой оказало огромное влияние на современные воззрения о формировании Солнечной системы. Одним из важнейших достижений стало понимание, что планеты-гиганты значительно мигрировали от тех положений, в которых они образовались, в результате взаимодействия с планетезимальным диском, оставшимся после диссипации газа.

В наибольшей степени это выражено в модели Ниццы (Tsiganis и др., 2005; Morbidelli и др., 2007; Batygin, Brown, 2010; Levison и др., 2011; Nesvorný, Morbidelli, 2012). Недавнее открытие семейства далеких транснептуновых объектов (см., например, обзор Gladman, Volk, 2021), движущихся по орбитам с перигелийными расстояниями $q > 40$ а. е. и большими полуосями $a > 150$ а. е., дало новую и довольно

неожиданную информацию о структуре внешней части Солнечной системы, которая стала основой для выдвижения гипотезы о существовании далекой девятой планеты (Trujillo, Shepard, 2014; Batygin, Brown, 2016). Естественно, возникает вопрос, насколько модель Ниццы согласуется с существованием далеких транснептуновых объектов.

В работе (Emel'yanenko, 2022) было показано, что далекие транснептуновые объекты являются естественным результатом долговременной эволюции системы, включающей мигрирующие планеты-гиганты и самогравитирующий планетезимальный диск. В частности, в этой работе удалось объяснить происхождение объектов типа Седны. Полученные результаты относились к модели, в которой рассматривалась динамическая эволюция планет-гигантов и диска планетезималей, расположенных первоначально вне планетной системы. Начальные условия для планет и диска планетезималей были аналогичны тем, что рассматривались в статьях (Kaib,

МЕТОДЫ

Sheppard, 2016; Nesvorný и др., 2016), направленных на объяснение существования орбит с большими перигелийными расстояниями в так называемом “рассеянном диске” транснептуновых объектов. Фактически, эти работы связаны с изучением заключительного этапа в модели Ниццы.

Естественно предполагать, что определенная доля планетезималей сохранилась после образования планет и внутри планетной области. В частности, в статье (Silsbee, Tremaine, 2018) изучалась динамика планетных зародышей, расположенных первоначально между планетами, и было показано, что эти объекты могут переходить на орбиты, расположенные далеко за планетной областью. В этой работе планеты располагались вблизи современных орбит, и их миграция не учитывалась.

В данной работе мы попытались учесть возможное влияние планетезималей в планетной области на динамический процесс образования далеких транснептуновых объектов. В новых численных экспериментах мы рассмотрели гравитационное взаимодействие планет с планетезималями, расположенными первоначально как вне планетной области, так и между планетами. В таких моделях суммарная масса планетезимального диска может быть больше, чем в работе (Emel'yanenko, 2022), где рассматривались планетезимали, расположенные вне планетной области. Это является важным обстоятельством, поскольку имеется тенденция к возрастанию количества производимых далеких транснептуновых объектов с увеличением начальной массы планетезимального диска. Были рассмотрены начальные планетные конфигурации, изучавшиеся ранее в рамках модели Ниццы (Batygin и др., 2011; Nesvorný, Morbidelli, 2012). Миграция планет является существенным фактором в этих моделях.

В статьях (Batygin и др., 2011; Nesvorný, Morbidelli, 2012) не учитывалось гравитационное взаимодействие планетезималей. Кроме того, в этих статьях рассматривались относительно короткие интервалы времени (500 и 100 млн лет, соответственно). Естественно, что в этих моделированиях не отмечались далекие транснептуновые объекты, которые начинают появляться в самогравитирующем планетезимальном диске через несколько сотен млн лет (Emel'yanenko, 2022). В настоящей работе проведен анализ данных моделей с рассмотрением полной задачи N тел в течение времени существования Солнечной системы.

Мы рассматриваем гравитационное взаимодействие тел в системах, состоящих из четырех планет-гигантов с современными массами и большого числа планетезималей со значительно меньшими массами. В данной работе мы изучили две начальные конфигурации планет из работы (Nesvorný, Morbidelli, 2012): наиболее компактную, в которой Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун находились в резонансах 3:2, 3:2, 4:3, соответственно, и наиболее протяженную, в которой эти планеты находились в соответствующих резонансах 3:2, 2:1, 2:1. Кроме того, была рассмотрена начальная конфигурация планет, находящихся в резонансах 2:1, 4:3, 4:3, при которой наилучшим образом воспроизводится динамическая структура пояса Койпера согласно исследованию (Batygin и др., 2011).

Начальные параметры диска планетезималей (масса, границы) выбирались таким образом, чтобы через 4 млрд лет планеты были расположены на орбитах, близких к современным, основываясь на предыдущем опыте моделирования миграции планет (например, Nesvorný, Morbidelli, 2012; Emel'yanenko, 2022). В частности, в процессе миграции Юпитер и Сатурн должны преодолеть резонанс 2:1 и в конце располагаться вблизи современной соизмеримости средних суточных движений 5:2. Естественно, что в силу стохастичности процесса взаимодействия планет с планетезималями для каждой начальной конфигурации приходилось проводить серию интегрирований со значениями параметров диска из некоторого диапазона. Более подробные характеристики начальных параметров диска представлены ниже для каждого варианта.

На первом этапе, чтобы создать резонансные конфигурации, мы применяли широко распространенную методику (например, Batygin, Brown, 2010; Nesvorný, Morbidelli, 2012; Clement и др., 2021a; 2021b). Первоначально орбиты планет располагались несколько дальше резонансных положений. Затем планеты мигрировали внутрь с помощью введения дополнительных негравитационных сил и захватывались в резонансы (Papaloizou, Larwood, 2000; Емельяненко, 2011). Промежуток времени интегрирования на этом этапе составлял от 180 тыс. лет до 630 тыс. лет для разных вариантов. Во всех вариантах орбиты, полученные в конце этого этапа, имели эксцентриситеты $e < 0.07$ и наклоны $i < 0.15^\circ$.

Планетезимальный диск представлялся 1000 объектами, из которых определенная часть

(от 170 до 500 объектов) имели одинаковую ненулевую массу. Начальные значения эксцентриситетов и наклонов орбит планетезималей были распределены равномерно в интервалах (0, 0.01) и (0°, 0.5°) соответственно. Большие полуоси планетезималей a распределялись по степенному закону a^{-s} , где s принимало значения от 0 до 1.5.

Проводилось численное решение уравнений движения в задаче N тел на промежутке времени 4 млрд лет. Для этого использовался симплектический интегратор (Emel'yanenko, 2007). Объекты удалялись из интегрирования, если $a > 2500$ а. е. или $e > 1$ вдали от возмущающих тел. Мы также удаляли объекты, проходящие на расстоянии менее 0.1 а. е. от Солнца. Мы останавливали интегрирование, если планетная система становилась неустойчивой. В этом случае запускалось новое интегрирование с теми же параметрами системы, но новым случайным распределением начальных орбит планетезималей. Как правило, максимальное число запусков интегрирования для системы с данными параметрами равнялось десяти. В наиболее интересных случаях мы проводили интегрирование для большего числа вариантов.

ВАРИАНТ 3:2, 3:2, 4:3

В этом варианте в начальный момент все планетезимали располагались за орбитой Нептуна, поскольку трудно предполагать, что объекты могли сохраниться на устойчивых орбитах между планетами-гигантами в такой компактной системе. Число массивных планетезималей равнялось 170, как и в работе (Emel'yanenko, 2022). Характеристики рассматриваемых систем приведены в табл. 1 (a_N – начальное значение большой полуоси орбиты Нептуна, большие полуоси планетезималей в начальном диске с массой M_d были распределены между a_{in} и a_{out}).

Таблица 1. Характеристики исследованных систем с начальными планетами-гигантами, находящимися в резонансах 3:2, 3:2, 4:3

M_d , массы Земли	a_N , а. е.	s	a_{in} , а. е.	a_{out} , а. е.
20	11.43	0.5, 1.0, 1.5	11.93	37.0
40	12.08	0.5, 1.0, 1.5	12.58	32.0
50	12.41	0.5, 1.0, 1.5	12.91	30.0
60	12.54	0.5, 1.0, 1.5	13.04	29.0
70	12.69	0.5, 1.0, 1.5	13.19	28.0

Вычисления показали, что масса диска $M_d = 20 M_E$, где M_E – масса Земли, во всех рассмотренных случаях явно недостаточна для перевода планет из первоначальной резонансной конфигурации на современные орбиты.

Для более массивных дисков с $M_d \geq 40 M_E$ степень миграции достаточна для перевода планет к современным орбитам. Однако в большинстве рассмотренных случаев планетные системы оказались неустойчивыми, планеты сохранялись на почти круговых орбитах не более 360 млн лет. Были зафиксированы только два случая, в которых планетная система сохранилась в течение 4 млрд лет. Первый случай – при $M_d = 40 M_E$, $s = 0.5$, но здесь финальное отношение периодов Сатурна и Юпитера составило лишь 1.84. Во втором случае – при $M_d = 60 M_E$, $s = 1.0$, указанное отношение вполне приемлемо (2.48), но финальное значение эксцентриситета Юпитера составило лишь 0.001, что находится в явном противоречии с современным значением. В этом варианте сохранился лишь один далекий транснептуновый объект с перигелийным расстоянием $q = 63$ а. е. и $a = 162$ а. е.

В целом, можно сказать, что начальная резонансная конфигурация планет 3:2, 3:2, 4:3 не благоприятствует созданию планетной системы с далекими транснептуновыми планетами. Нельзя, конечно, категорично утверждать, что для параметров диска, приведших к неустойчивости в наших вычислениях, не могут реализовываться искомые системы через 4 млрд лет. Но вероятность такого события для данной начальной конфигурации в каждом случае мала.

ВАРИАНТ 3:2, 2:1, 2:1

В этом варианте в начальный момент планетезимали располагались между орбитой Юпитера и a_{out} (табл. 2), но в пределах двух радиусов Хилла относительно больших полуосей планет планетезимали отсутствовали (см. Silsbee, Tremaine, 2018). Число массивных планетезималей равнялось 500. Характеристики рассматриваемых систем приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики исследованных систем с начальными планетами-гигантами, находящимися в резонансах 3:2, 2:1, 2:1

M_d , массы Земли	a_N , а. е.	s	a_{out} , а. е.
40	18.91	0, 0.5, 1.0	29.9
60	19.48	0, 0.5, 1.0	28.6
80	19.89	0, 0.5, 1.0	27.4

В случае начальной массы диска $M_d = 40 M_E$ в численных экспериментах не было найдено удовлетворительных вариантов. Планетные системы становились или неустойчивыми за время менее 150 млн лет, или отношение периодов Сатурна и Юпитера было значительно меньше современного значения.

Более удовлетворительные результаты были получены при $M_d = 60 M_E$. Во многих вариантах получаются орбиты планет, близкие к современным орбитам планет-гигантов, но за относительно короткий промежуток времени (менее 200 млн лет). В ходе дальнейшей миграции планет такие системы становятся неустойчивыми. Но для $s = 1.0$ были найдены варианты, в которых планетная система сохраняется вблизи современных орбит более двух миллиардов лет, и при этом образуются далекие транснептуновые объекты. Ввиду важности этого варианта для решения вопроса об эволюции Солнечной системы он обсуждается более подробно ниже в отдельном разделе.

Для более массивного диска с $M_d = 80 M_E$ получается много вариантов с устойчивыми планетными системами и далекими транснептуновыми объектами. Но в этих вариантах имеется существенная трудность, связанная с взаимным расположением орбит Юпитера и Сатурна. Миграция этих планет является слишком быстрой, так что во всех изученных вариантах отношение средних суточных движений Юпитера и Сатурна начинает превышать 2.5 за время менее 200 млн лет. В дальнейшем это отношение продолжает возрастать, и во всех системах, сохраняющихся в течение нескольких миллиардов лет, большая полуось орбиты Сатурна превышает 10 а. е.

ВАРИАНТ 2:1, 4:3, 4:3

Как и в предыдущем случае, в этом варианте в начальный момент планетезимали располагались между орбитой Юпитера и a_{out} (табл. 3), но в пределах двух радиусов Хилла относительно больших полуосей планет планетезимали отсутствовали. Число массивных планетезималей равнялось 500. Характеристики рассматриваемых систем приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики исследованных систем с начальными планетами-гигантами, находящимися в резонансах 2:1, 4:3, 4:3

M_d , массы Земли	a_N , а. е.	s	a_{out} , а. е.
40	13.29	0, 0.5, 1.0	29.9
60	13.63	0, 0.5, 1.0	28.6
80	13.89	0.5	27.4

Для начального значения $M_d = 40 M_E$ в численных экспериментах были найдены варианты, в которых планетная система сохраняется в течение более 2 млрд лет и существуют далекие транснептуновые объекты. В одном варианте (при $s = 0.5$) в течение 4 млрд лет сохраняется планетная система и три транснептуновых объекта, один из которых является далеким. Но при этом отношение периодов Сатурна и Юпитера превышает 2.5. В случае $s = 0$ найден вариант, в котором система сохраняется более 2 млрд лет с отношением периодов Сатурна и Юпитера, близким к современному значению 2.49.

В случае более массивных дисков с $M_d = 60 M_E$ и $80 M_E$ отношение периодов Сатурна и Юпитера очень быстро (во всех вариантах менее 50 млн лет) начинает превышать современное значение. В дальнейшем или планетная система разрушается, или значительно отличается от современной системы планет-гигантов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Естественно, что в условиях долговременного стохастического движения планет и массивных планетезималей очень трудно подобрать начальные параметры, при которых к определенному моменту времени будет реализовываться система, в которой орбиты планет будут близки к современным орбитам. К тому же и интервал времени, в течение которого происходила миграция планет, является неопределенным. В представленном исследовании проводились численные эксперименты на интервале 4 млрд лет. Но даже в модели Ниццы эта величина является плохо определенной. В ранней версии этой модели предполагалось, что планетная неустойчивость начинала развиваться через несколько сотен миллионов лет нахождения в резонансной конфигурации, увязывая момент неустойчивости с периодом поздней тяжелой бомбардировки Луны (Morbidelli и др., 2007; Levison и др., 2011). В настоящее время предпочтение отдается моделям, в которых неустойчивость системы внешних планет началась не позднее нескольких десятков миллионов после исчезновения газа в протопланетном диске (см., например, Nesvorný, 2018).

Поэтому в табл. 4 мы собрали информацию о тех вариантах, в которых отношение периодов Сатурна и Юпитера достигло современного значения 2.49 в какой-либо момент времени, превышающий 2 млрд лет. Эти системы являются наиболее предпочтительными для оценки возможной эволюции орбит планет, поскольку

расположение планет, близкое к современному, возникает в них в результате очень длительного гравитационного взаимодействия планет и планетезимального диска. В этой таблице M_{od} — суммарная масса планетезималей, расположенных первоначально за орбитой Нептуна, t_f — эпоха, на которую отношение периодов Сатурна и Юпитера достигло 2.49, $M_{d,f}$ — масса планетезимального диска в момент времени t_f .

Таблица 4. Характеристики систем, в которых планеты переходят на орбиты, близкие к современным, за время, превышающее 2 млрд лет

Резонанс	M_d , массы Земли	M_{od} , массы Земли	s	t_f , млрд лет	$M_{d,f}$, массы Земли
3:2, 2:1, 2:1	60	18	1.0	2.45	0.72
2:1, 4:3, 4:3	40	33	0	2.10	0.48

Рис. 1 показывает изменение больших полуосей орбит планет в варианте 2:1, 4:3, 4:3, а на рис. 2 представлено распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для планетезималей, сохранившихся в момент времени t_f . Большие полуоси орбит Нептуна и Урана неидеально соответствуют современным значениям, но это вызвано лишь несколько неточным выбором внешней границы первоначального планетезимального диска. Как видно, в этом варианте существуют далекие транснептуновые объекты.

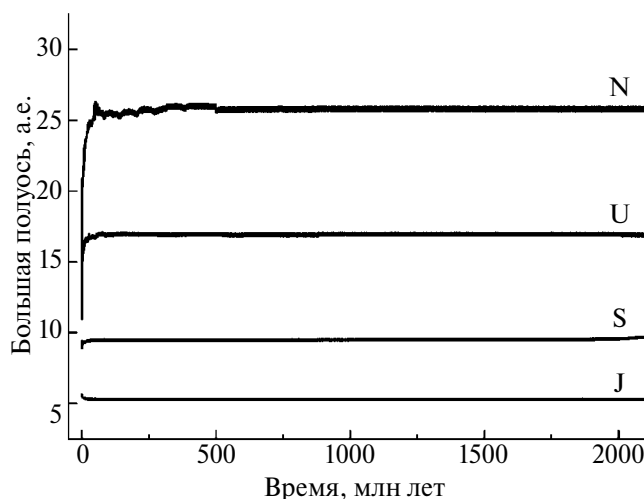


Рис. 1. Изменение больших полуосей орбит планет, стартовавших в резонансе 2:1, 4:3, 4:3 (J — Юпитер, S — Сатурн, U — Уран, N — Нептун).

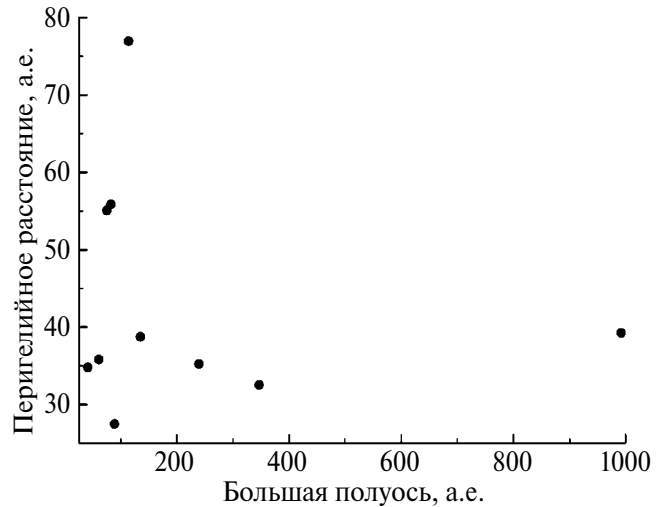


Рис. 2. Большие полуоси и перигелийные расстояния планетезималей, сохранившихся в финальный момент времени t_f в варианте 2:1, 4:3, 4:3.

Рис. 3 показывает изменение больших полуосей орбит планет в варианте 3:2, 2:1, 2:1, а на рис. 4 представлено распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для планетезималей, сохранившихся на эпоху t_f . Видно, что в этом варианте орбиты планет более соответствуют конфигурации современной планетной системы, чем в предыдущем случае. В варианте 3:2, 2:1, 2:1 также имеются далекие транснептуновые объекты в момент времени t_f .

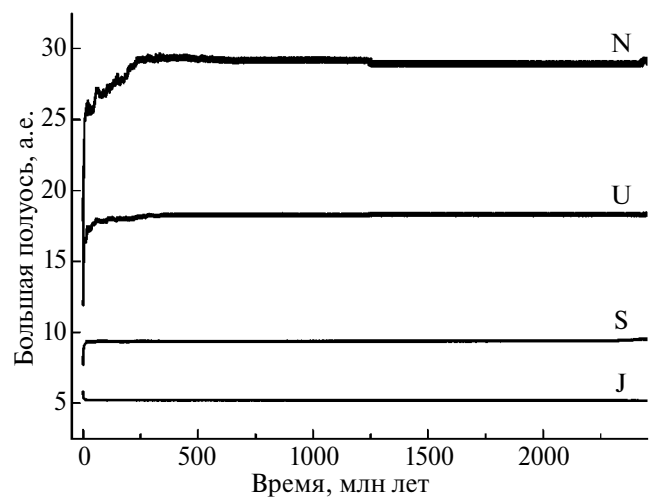


Рис. 3. Изменение больших полуосей орбит планет, стартовавших в резонансе 3:2, 2:1, 2:1 (J — Юпитер, S — Сатурн, U — Уран, N — Нептун).

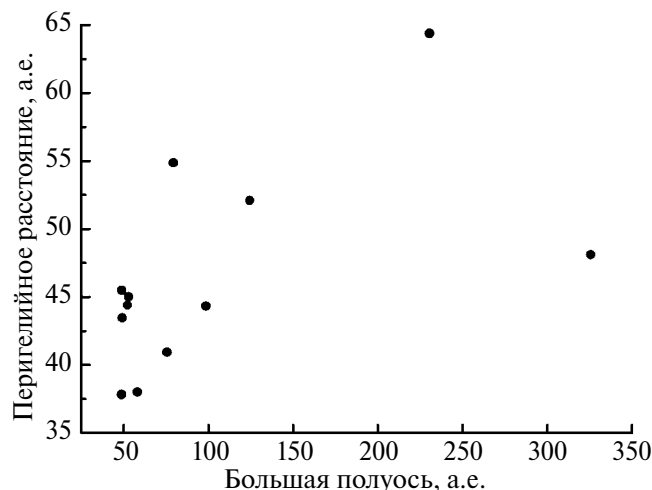


Рис. 4. Большие полуоси и перигелийные расстояния планетезималей, сохранившихся в финальный момент времени t_f в варианте 3:2, 2:1, 2:1.

Рис. 5 иллюстрирует, как объекты переходят на далекие орбиты. Здесь приведен пример изменения перигелийного расстояния, большой полуоси и долготы перигелия π для массивного объекта, достигшего орбиты с $q = 48$ а. е., $a = 326$ а. е. в момент времени t_f (линии 1). В течение большей части эволюции объект движется по орбите с перигелийным расстоянием около 40 а. е. Но на промежутке времени от 2.0 до 2.2

млрд лет скорость изменения долготы перигелия этого объекта становится близкой к скорости изменения перигелия для другого массивного объекта (изменения элементов орбиты для второго объекта показаны на рис. 5 линиями с номером 2). В этой ситуации перигелийные расстояния объектов значительно изменяются. Перигелийное расстояние первого объекта увеличивается, а перигелий орбиты второго объекта заходит в планетную область. В дальнейшем второй объект выбрасывается в область $a > 2500$ а. е. вследствие возмущений от планет-гигантов, а первый объект остается в далекой транснептуновой области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование взаимодействия планет-гигантов и планетезимального диска для модели Ниццы, в которой начальные орбиты планет находятся в резонансных конфигурациях. В дополнение к стандартной модели Ниццы рассматривались планетезимали в планетной области и учитывалась самогравитация планетезимального диска. Динамическая эволюция планетных систем изучалась на промежутках времени порядка времени существования Солнечной системы.

В большинстве вариантов численного моделирования в рамках модели Ниццы или

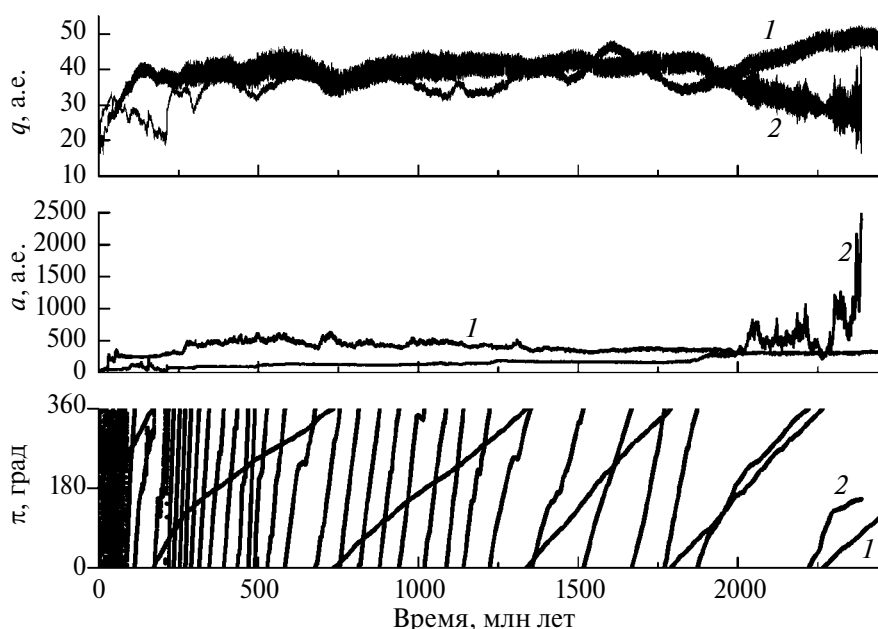


Рис. 5. Изменение перигелийного расстояния q , большой полуоси a и долготы перигелия π для двух массивных планетезималей, попадающих в вековой резонанс.

планетные системы разрушаются, или планеты переходят на орбиты, значительно отличающиеся от современных орбит. Но, если система сохранялась в течение миллиардов лет, то, как правило, в ней имелись далекие транснептуновые объекты. Найдены варианты с $M_d = 60 M_E$ для резонанса 3:2, 2:1, 2:1 и $M_d = 40 M_E$ для резонанса 2:1, 4:3, 4:3, в которых планетные системы сохраняются в течение миллиардов лет, финальные орбиты планет близки к современным орбитам и существуют далекие транснептуновые объекты.

Вычисления проведены с использованием суперкомпьютера MVS-10P Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН. Автор благодарен рецензенту за полезные замечания.

Работа выполнена в рамках госзадания Института астрономии РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельяненко В.В. Исследование динамических процессов на поздних этапах формирования планетных систем в газопылевых дисках // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. С. 412–419. (*Emel'yanenko V.V. A study on dynamic processes at late stages in the formation of planetary systems in gas and dust disks // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. P. 402–409.*)
2. Batygin K., Brown M.E. Early dynamical evolution of the Solar system. Pinning down the initial conditions of the Nice model // *Astrophys. J.* 2010. V. 716. P. 1323–1331.
3. Batygin K., Brown M.E., Fraser W.C. Retention of a primordial cold classical Kuiper belt in an instability driven model of Solar system formation // *Astrophys. J.* 2011. V. 738. id. 13 (8 p.).
4. Batygin K., Brown M.E. Evidence for a distant giant planet in the Solar system // *Astron. J.* 2016. V. 151. id. 22 (12 p.).
5. Clement M.S., Raymond S.N., Kaib N.A., Deienno R., Chambers J.E., Izidoro A. Born eccentric: Constraints on Jupiter and Saturn's pre-instability orbits // *Icarus*. 2021a. V. 355. id. 114122.
6. Clement M.S., Deienno R., Kaib N.A., Izidoro A., Raymond S.N., Chambers J.E. Born extra-eccentric: A broad spectrum of primordial configurations of the gas giants that match their present-day orbits // *Icarus*. 2021b. V. 367. id. 114556.
7. *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 Dyn. Astron.* 2007. V. 98. P. 191–202.
8. *Emel'yanenko V.V. Orbital features of distant trans-Neptunian objects induced by giant gaseous clumps // Astron. and Astrophys.* 2022. V. 662. id. L4 (7 p.).
9. Gladman B., Volk K. Transneptunian space // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 2021. V. 59. P. 203–246.
10. Kaib N.A., Sheppard S.S. Tracking Neptune's migration history through high-perihelion resonant trans-Neptunian objects // *Astron. J.* 2016. V. 152. id. 133 (15 p.).
11. Levison H.F., Morbidelli A., Tsiganis K., Nesvorný D., Gomes R. Late orbital instabilities in the outer planets induced by interaction with a self-gravitating planetesimal disk // *Astron. J.* 2011. V. 142. id. 152 (11 p.).
12. Morbidelli A., Tsiganis K., Crida A., Levison H.F., Gomes R. Dynamics of the giant planets of the Solar system in the gaseous protoplanetary disk and their relationship to the current orbital architecture // *Astron. J.* 2007. V. 134. P. 1790–1798.
13. Nesvorný D., Morbidelli A. Statistical study of the early Solar system instability with four, five, and six giant planets // *Astron. J.* 2012. V. 144. id. 117 (20 p.).
14. Nesvorný D., Vokrouhlický D., Roig F. The orbital distribution of trans-Neptunian objects beyond 50 AU // *Astrophys. J. Lett.* 2016. V. 827. id. L35 (5 p.).
15. Nesvorný D. Dynamical evolution of the early Solar system // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 2018. V. 56. P. 137–174.
16. Papaloizou J.C.B., Larwood J.D. On the orbital evolution and growth of protoplanets embedded in a gaseous disc // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2000. V. 315. P. 823–833.
17. Silsbee K., Tremaine S. Producing distant planets by mutual scattering of planetary embryos // *Astron. J.* 2018. V. 155. id. 75 (11 p.).
18. Trujillo C.A., Sheppard S.S. A Sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units // *Nature*. 2014. V. 507. P. 471–474.
19. Tsiganis K., Gomes R., Morbidelli A., Levison H.F. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System // *Nature*. 2005. V. 435. P. 459–461.