

УДК 523.2

МИГРАЦИЯ ГИГАНТСКИХ ГАЗОВЫХ СГУЩЕНИЙ И СТРУКТУРА ВНЕШНЕЙ ЧАСТИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

© 2020 г. В. В. Емельяненко*

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 15.07.2019 г.

После доработки 30.07.2019 г.

Принята к публикации 29.08.2019 г.

Новые данные о распределении далеких транснептуновых объектов и о свойствах комет указывают на важность динамических процессов во внешней части протопланетного диска в формировании наблюдаемой структуры Солнечной системы. В данной работе мы рассмотрели возможное влияние гигантских газовых сгущений, образующихся в результате гравитационной неустойчивости и фрагментации околозвездных дисков, на орбитальное распределение популяции малых тел во внешней части Солнечной системы. В основном, изучались те особенности миграции и гравитационного взаимодействия гигантских сгущений, которые были выявлены в работе (Vorobyov, Elbakyan, 2018). Наше моделирование показало, что основные особенности распределения малых тел, возникающие в результате гравитационного влияния гигантских сгущений, согласуются с наблюдаемым распределением орбит далеких транснептуновых объектов. Изученный динамический процесс, связанный с отдельным гигантским сгущением, является очень коротким по времени (не более нескольких десятков тысяч лет). Основным фактором, влияющим на орбитальное распределение малых тел, являются тесные сближения с гигантским сгущением. Значительная часть малых тел (комет) очень быстро переводится на далекие орбиты с большими эксцентриситетами, что позволяет им избежать взаимных соударений.

Ключевые слова: Солнечная система, транснептуновые объекты, кометы, миграция, гигантские сгущения

DOI: 10.31857/S0320930X20010016

ВВЕДЕНИЕ

Недавнее открытие далеких транснептуновых объектов, движущихся по орбитам с большими полуосями $a > 150$ а. е., дало новую и довольно неожиданную информацию о структуре внешней части Солнечной системы. В распределении угловых элементов орбит этих объектов обнаружилась необычная группировка вблизи определенных значений. Сначала в работе (Trujillo, Sheppard, 2014) было предположено, что имеет место концентрация аргументов перигелия ω вблизи значения $\omega = 0^\circ$. Это значение соответствует одному из центров либрационных зон в механизме вековых возмущений Лидова–Козаи, поэтому было сделано предположение о существовании далекой планеты, производящей этот эффект. В дальнейшем в работе (Batygin, Brown, 2016) было высказано утверждение, что скорее имеет место группировка долгот перигелиев π и долгот восходящих узлов Ω , и этот эффект связан с совместным действием орбитальных и вековых резонансов (Batygin, Morbidelli, 2017). В результате подробных небесномеханических исследований было

показано, что наблюдаемые особенности в распределении орбит далеких транснептуновых объектов могли быть произведены планетой с массой ~ 10 масс Земли, движущейся по орбите с большой полуосью $\sim 400\text{--}800$ а. е., эксцентриситетом $\sim 0.2\text{--}0.5$ и наклоном $\sim 15^\circ\text{--}25^\circ$ (Batygin, Brown, 2016; Batygin и др., 2019).

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. Представляет огромные трудности и объяснение образования столь массивной и далекой планеты (Batygin и др., 2019). Поэтому имеет необходимость в рассмотрении и других возможных сценариев формирования наблюдаемой структуры далекой транснептуновой области.

Новые вопросы в теории формирования удаленных областей Солнечной системы поставили и результаты космической миссии Rosetta к комете 67P/Чурюмова–Герасименко. Происхождение комет всегда связывалось с внешней частью Сол-

нечной системы. Поскольку время как физической, так и динамической жизни комет в околоземном пространстве весьма мало по сравнению с возрастом Солнечной системы, то естественно предполагать, что большую часть времени кометы провели в удаленных областях Солнечной системы. В последнее десятилетие наибольшее распространение получила точка зрения, что образование кометных популяций происходило в процессе миграции планет, описываемом моделью “Ниццы” (Levison и др., 2011). В работе (Brasser, Morbidelli, 2013) подчеркнута, что в рамках этой модели находит естественное объяснение общность происхождения транснептуновых объектов и объектов облака Оорта из единой популяции планетезималей, расположенных первоначально за орбитой Нептуна. Однако новые данные о физических свойствах кометы 67P/Чурюмова-Герасименко, полученные в ходе космической миссии Rosetta, плохо согласуются с положением модели “Ниццы” о длительном (~0.5 млрд лет) существовании первоначального диска планетезималей за орбитами планет-гигантов в районе 15–30 а. е. (Davidsson и др., 2016). В работах (Morbidelli, Rickman, 2015; Rickman и др., 2015) было показано, что кометные объекты километровых размеров должны были испытать многочисленные взаимные соударения в течение рассматриваемого промежутка времени. Поэтому в модели “Ниццы” кометные ядра не являются первоначальными планетезималями, а представляют собой ударные фрагменты, возникшие при разрушении тел, имевших вначале значительно большие размеры. Но общий вывод, сделанный в работе (Davidsson и др., 2016) на основе анализа данных для кометы 67P/Чурюмова-Герасименко в сопоставлении с многочисленными наземными наблюдениями и результатами других космических миссий, а также лабораторными экспериментами и численными расчетами, заключается в том, что кометы являются первичными объектами, не испытавшими больших ударных и тепловых изменений с момента формирования. Более того, в работах (Fulle и др., 2016; Mannel и др., 2016; Fulle, Blum, 2017) подчеркнута, что существование в комете 67P/Чурюмова-Герасименко очень рыхлых частиц, называемых также фрактальными, показывает, что такие структуры могли сохраниться только при ударах с относительными скоростями менее 1 м/с. Таким образом, данные космической миссии Rosetta также указывают на необходимость рассмотрения новых моделей, в которых аккреция далеких объектов происходила с чрезвычайно малыми скоростями, а переход на орбиты с большими эксцентриситетами, характерные для объектов транснептунового рассеянного диска (scattered disc) и облака Оорта (предполагаемые источники наблюдаемых комет), происходил значительно быстрее, чем в модели “Ниццы”.

Гравитационная неустойчивость и фрагментация околозвездных дисков уже давно рассматривается как возможный механизм быстрого формирования планет-гигантов (Boss, 1997). В настоящее время существует довольно устоявшаяся точка зрения, что условия фрагментации околозвездного диска выполняются в его внешней части, на расстояниях более 50–100 а. е. от звезды (например, Johnson, Gammie, 2003; Rafikov, 2005). Обнаружение экзопланет на широких орбитах является наблюдательной поддержкой этих теоретических оценок. Минимальная начальная масса самогравитирующих газовых сгущений, возникших при фрагментации диска, составляет $\sim 10m_j$, где m_j – масса Юпитера (например, Stamatellos, Whitworth, 2009), а начальные радиусы таких образований, рассматриваемые при моделировании фрагментации диска, составляют от нескольких астрономических единиц (Boss, 2011; Galvagni, Mayer, 2014) до нескольких десятков астрономических единиц (Vorobyov, 2013). В последнее время было показано, что образующиеся гигантские сгущения участвуют в сложном динамическом процессе взаимодействия с диском, что приводит, в частности, к миграции сгущений (Mayer и др., 2002; Vorobyov, Basu, 2005; Nayakshin, 2010; Baruteau и др., 2011; Zhu и др., 2012; Stamatellos, 2015; Vorobyov, Elbakyan, 2018). Более того, мигрирующие сгущения могут испытывать тесные сближения друг с другом, что зачастую приводит к выбросу объектов на гиперболические орбиты (Terquem, Papaloizou, 2002; Vorobyov, Elbakyan, 2018).

В данной работе проводится анализ гравитационного влияния гигантских сгущений в таком динамическом процессе на распределение орбит малых тел в Солнечной системе, если этот процесс происходил в околосолнечном диске. Особенности миграции и гравитационного взаимодействия гигантских сгущений в околозвездных дисках недавно были изучены подробно в работе (Vorobyov, Elbakyan, 2018). Наше исследование основано на рассмотрении типичных элементов динамического поведения гигантских сгущений, продемонстрированных в (Vorobyov, Elbakyan, 2018). Выявленные динамические особенности затем сравниваются с наблюдаемым распределением далеких транснептуновых объектов.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ ДАЛЕКИХ ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Распределение угловых элементов орбит далеких транснептуновых объектов вызвало большую дискуссию и стало основой для предположения о существовании девятой планеты. Здесь мы рассматриваем распределение угловых элементов для объектов с перигелийными расстояниями $q > > 40$ а. е., в отличие от работ (Trujillo, Sheppard, 2014; Batygin, Brown, 2016), в которых анализиро-

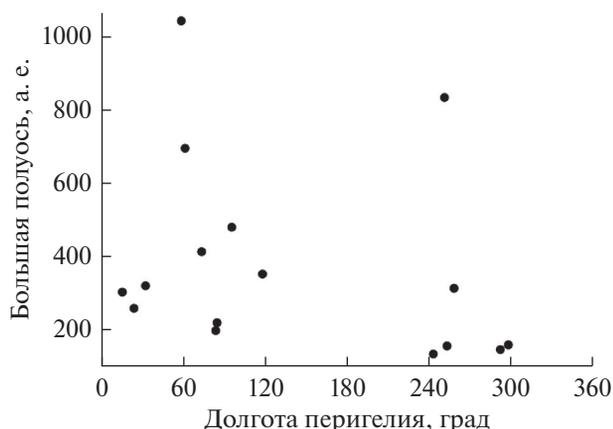


Рис. 1. Распределение долгот перигелиев и больших полуосей для транснептуновых объектов с $q > 40$ а. е., $a > 100$ а. е., наблюдавшихся в нескольких оппозициях.

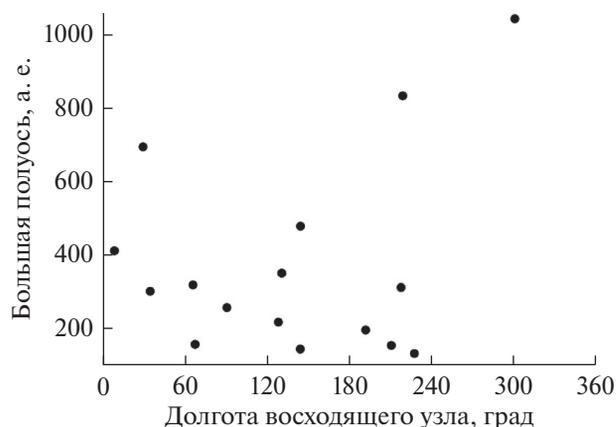


Рис. 2. Распределение долгот восходящих узлов и больших полуосей для транснептуновых объектов с $q > 40$ а. е., $a > 100$ а. е., наблюдавшихся в нескольких оппозициях.

вались орбиты объектов с $q > 30$ а. е. Такой подход представляется более обоснованным в случае изучения динамических механизмов, отличных от гравитационных возмущений известных планет (для орбит с перигелиями вблизи орбиты Нептуна возмущения от этой планеты могут быть существенными). Использовались орбиты, представленные на сайте Центра малых планет (<https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/Centaurs.html>) 28 января 2019 г., для объектов, наблюдавшихся не менее чем в двух оппозициях.

На рис. 1 дано распределение долгот перигелиев и больших полуосей далеких транснептуновых объектов. Как уже было отмечено в работах (Batygin, Brown, 2016; Batygin и др., 2019), имеется две группы объектов. Первая группа сконцентрирована приблизительно вблизи значений 60° – 70° , а значения долгот перигелиев для второй группы отличаются приблизительно на 180° .

Рис. 2 показывает большой разброс долгот восходящих узлов для тех же объектов. Интересной особенностью является отсутствие далеких транснептуновых объектов с $a < 1000$ а. е. в интервале долгот восходящих узлов (240, 360) град., но статистические данные пока недостаточны для уверенного утверждения о надежности этой особенности.

Рис. 3 показывает распределение аргументов перигелия для далеких транснептуновых объектов. На начальном этапе обсуждения возможного существования девятой планеты в работе (Trujillo, Sheppard, 2014) было предположено, что имеет место концентрация аргументов перигелия вблизи значения $\omega = 0^\circ$, однако дальнейшие исследования не подтвердили это предположение. Как видно на рис. 3, отсутствует какая-либо видимая группировка аргументов перигелия далеких транснептуновых объектов.

Таким образом, только для распределения долгот перигелиев явно проявляется в современных наблюдательных данных группировка далеких транснептуновых объектов вблизи определенных значений. Существует две группы объектов, сконцентрированных вблизи значений долгот перигелиев, отличающихся приблизительно на 180° . Согласно статистическому анализу в работе (Brown, Batygin, 2019) наблюдаемые долготы перигелиев не являются выборкой из равномерного распределения при уровне значимости 0.04.

Еще одна особенность распределения далеких транснептуновых объектов отражена на рис. 4. Видно отсутствие далеких транснептуновых объектов с $a < 1000$ а. е. в интервале перигелийных расстояний (50, 75) а. е., хотя статистические данные пока недостаточны для уверенного утверждения о надежности этой особенности.

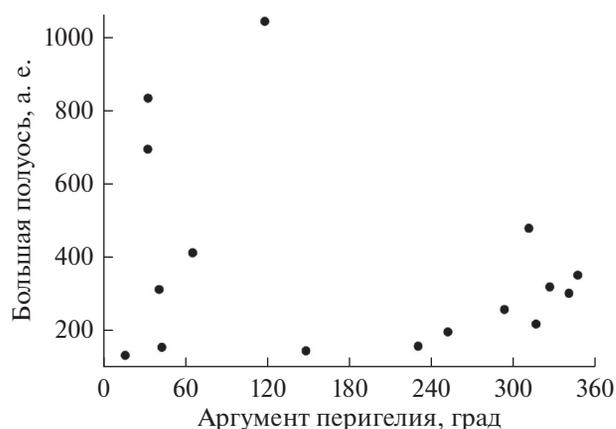


Рис. 3. Распределение аргументов перигелия и больших полуосей для транснептуновых объектов с $q > 40$ а. е., $a > 100$ а. е., наблюдавшихся в нескольких оппозициях.

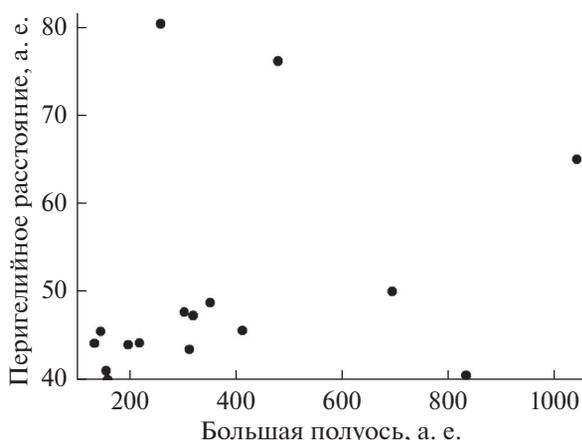


Рис. 4. Распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для транснептуновых объектов с $q > 40$ а. е., $a > 100$ а. е., наблюдавшихся в нескольких оппозициях.

МОДЕЛЬ

Мы рассматриваем типичный пример динамической эволюции двух взаимодействующих гигантских сгущений во внешней части протопланетного диска, представленный на рис. 17 работы (Vorobyov, Elbakyan, 2018). Внешний объект с меньшей массой движется по орбите с эксцентриситетом ~ 0.5 . Внутренний объект движется по почти круговой орбите с $a \sim 100$ а. е. Через некоторый промежуток времени происходит тесное сближение этих объектов. В результате взаимных возмущений объекты переходят на орбиты с большими эксцентриситетами. Внешний объект начинает двигаться по гиперболе и выбрасывается из системы рассматриваемой звезды. Внутренний объект переходит на орбиту с $q \sim 30$ а. е., и его орбита быстро округляется на таком расстоянии вследствие взаимодействия с протопланетным газовым диском.

Мы пытаемся выяснить, как рассматриваемая модель гигантских газовых сгущений согласуется с наблюдаемым распределением далеких транснептуновых объектов, и, таким образом, есть ли основания для ее рассмотрения по отношению к Солнечной системе. Мы предполагаем, что популяция малых тел существовала на этапе миграции газовых сгущений. В нашей модели малые тела первоначально совершали движение по почти круговым орбитам с малыми наклонами к эклиптике. В расчетах (Vorobyov, Elbakyan, 2018) время жизни гигантских сгущений в протопланетном диске не превышает 0.5 млн лет. Хотя вопрос об образовании малых тел за такой небольшой промежуток времени является открытым, существует много работ, в которых рассматривается очень быстрое образование малых тел во внешней части Солнечной системы. Например, авторы работы

(Wahlberg и др., 2014) утверждают, что в их численных экспериментах при потоковой неустойчивости на 40 а. е. могут формироваться планетезимали различных размеров: более ~ 100 км за ~ 25 лет, 10 км за несколько сотен лет, 1 км за несколько тысяч лет.

Динамические процессы эволюции гигантских сгущений являются очень сложными, при этом и массы сгущений являются переменными, и их орбиты испытывают возмущения. Сейчас невозможно установить все детали динамики гигантских сгущений. Поэтому в этой работе мы изучаем последовательно различные простейшие элементы этого процесса, рассматривая объекты с постоянными массами, движущиеся по кеплеровым орбитам. Рассматриваются три различных динамических эпизода: 1) движение внешнего объекта по орбите с эксцентриситетом $e_c \sim 0.5$; 2) движение внутреннего объекта по почти круговой орбите; 3) движение внутреннего объекта из афелия в перигелий с $q_c \sim 30$ а. е. Изучается распределение орбит малых тел, возникающее при каждом динамическом эпизоде в условиях гравитационного воздействия гигантских сгущений на промежутках времени, не превышающих согласно (Vorobyov, Elbakyan, 2018) нескольких десятков тысяч лет.

В каждом случае рассматривалось движение большого числа частиц, испытывающих гравитационное воздействие от гигантских сгущений. Интегрирование уравнений движения выполнялось с помощью симплектического интегратора (Emel'yanenko, 2007). Интегрирование для данной частицы прекращалось, если $a > 1000$ а. е. или $q < 0.2$ а. е., а также в случае столкновения частицы с гигантским сгущением. В начальный момент времени большие полуоси частиц распределялись случайно по закону $a^{-0.5}$ в некотором интервале (для почти круговых орбит это приблизительно соответствует закону $r^{-1.5}$, часто используемому для описания распределения поверхностной плотности вещества в протопланетном диске), а эксцентриситеты e и наклоны орбит i планет являлись равномерно распределенными случайными величинами с $e < 0.001$ и $i < 0.5^\circ$.

ДВИЖЕНИЕ ВНЕШНЕГО ОБЪЕКТА ПО ОРБИТЕ С БОЛЬШИМ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ

Рассмотрим модель, в которой объект с массой $m_c = 10m_j$, радиусом $R_c = 4$ а. е. движется по орбите с большой полуосью $a_c = 600$ а. е., эксцентриситетом $e_c = 0.5$, наклоном $i_c = 20^\circ$, долготой перигелия $\pi_c = 61^\circ$, долготой восходящего узла $\Omega_c = 91^\circ$. Выбор угловых элементов орбиты основан на тех же соображениях, что рассматривались в работах (Batygin, Brown, 2016; Batygin, Morbidelli, 2017) для поиска гипотетической девятой планеты. На-

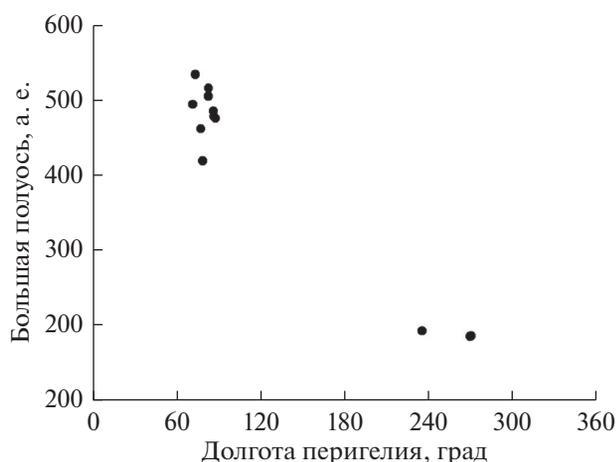


Рис. 5. Распределение долгот перигелиев и больших полуосей для далеких частиц после 40000 лет эволюции под действием гравитационных возмущений от гигантского сгущения с $a_c = 600$ а. е.

чальные значения больших полуосей 5000 частиц распределены в интервале (50, 1000) а. е.

На рис. 5 показано распределение долгот перигелиев и больших полуосей частиц с $40 < q < 80$ а. е. и $a > 100$ а. е. через 40000 лет. Видно, что в распределении моделируемых частиц имеются концентрации долгот перигелиев вблизи значений π_c и $\pi_c + 180^\circ$, подобно распределению наблюдаемых далеких транснептуновых объектов.

Отметим, что механизм образования этих концентраций в исследуемом случае отличается от механизма орбитальных и вековых резонансов, рассматриваемого в работах (Batygin, Brown, 2016; Batygin, Morbidelli, 2017). В данном случае основным фактором являются тесные сближения частиц с гигантскими сгущениями. Известно (Carrisi, Valsecchi, 1980; Емельяненко, 1997), что наиболее эффективное преобразование орбит имеет место при касательных сближениях, происходящих вблизи перигелиев и афелиев орбит гигантских сгущений, что и проявляется в создании двух максимумов в распределении частиц.

ДВИЖЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ОБЪЕКТА ПО КРУГОВОЙ ОРБИТЕ

Рассмотрим модель, в которой объект с массой $m_c = 25m_j$, радиусом $R_c = 12$ а. е. движется по орбите с большой полуосью $a_c = 90$ а. е., эксцентриситетом $e_c = 0$, наклоном $i_c = 0^\circ$. Начальные значения больших полуосей 1000 частиц распределены в интервале (5, 500) а. е.

На рис. 6 показано распределение больших полуосей и перигелийных расстояний частиц через 40000 лет. Видно отсутствие далеких частиц в интервале перигелийных расстояний (50, 80) а. е.,

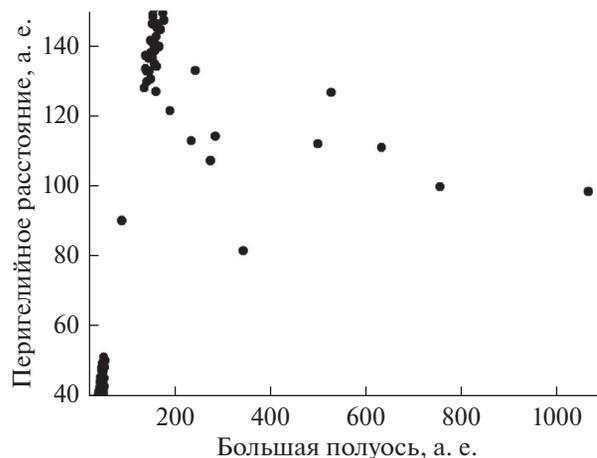


Рис. 6. Распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для частиц после 40000 лет эволюции под действием гравитационных возмущений от гигантского сгущения с $a_c = 90$ а. е.

что согласуется с наблюдательными данными для далеких транснептуновых объектов на рис. 4.

МИГРАЦИЯ ВНУТРЕННЕГО ОБЪЕКТА

Рассмотрим теперь влияние гигантского сгущения на распределение орбит малых тел при переходе во внутреннюю область. Для этого изучалась модель, в которой объект с массой $m_c = 10m_j$, радиусом $R_c = 5$ а. е. совершает движение в плоскости эклиптики от афелия до перигелия по орбите с $a_c = 50$ а. е., $e_c = 0.5$. Начальные значения больших полуосей 1000 частиц распределены в интервале (5, 50) а. е. На рис. 7 показано распре-

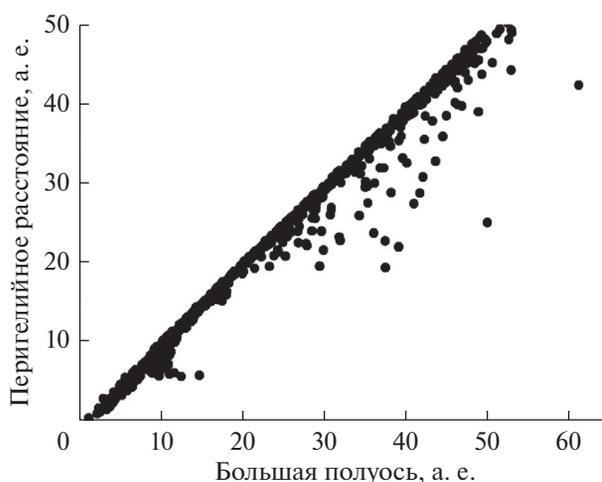


Рис. 7. Распределение больших полуосей и перигелийных расстояний для частиц после 180 лет эволюции под действием гравитационных возмущений от гигантского сгущения, движущегося от афелия к перигелию по орбите с $a_c = 50$ а. е., $e_c = 0.5$.

деление частиц приблизительно через 180 лет, что соответствует промежутку времени перехода гигантского сгущения от афелия до перигелия.

Видно, что у части объектов в области пояса Койпера эксцентриситеты орбит значительно возрастают. Хотя современные теории связывают происхождение таких орбит с миграцией планет в планетезимальных дисках на поздних этапах формирования Солнечной системы (см., например, обзор (Morbidelli, Nesvorný, 2019)), данные вычисления показывают, что гигантские сгущения, мигрирующие из внешней части Солнечной системы, могли играть существенную роль в возрастании эксцентриситетов как объектов пояса Койпера, так и более внутренних планетезималей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые данные о распределении далеких транснептуновых объектов и о свойствах комет поставили и новые вопросы о динамических процессах во внешней части протопланетного диска на ранних этапах формирования Солнечной системы. В данной работе мы рассмотрели возможное влияние гигантских газовых сгущений, образующихся в результате гравитационной неустойчивости и фрагментации околозвездных дисков, на орбитальное распределение популяции малых тел во внешней части Солнечной системы. В основном, изучались те особенности миграции и гравитационного взаимодействия гигантских сгущений, которые были выявлены в работе (Vorobyov, Elbakyan, 2018).

Наше моделирование показало, что основные особенности распределения малых тел, возникающие в результате гравитационного влияния гигантских сгущений с массой порядка $10 m_j$ и более, согласуются с наблюдаемым распределением орбит далеких транснептуновых объектов. Необходимо отметить, что изученный динамический процесс, связанный с отдельным гигантским сгущением, является очень коротким по времени (не более нескольких десятков тысяч лет). Основным фактором, влияющим на орбитальное распределение малых тел, являются тесные сближения с гигантским сгущением. Значительная часть малых тел (комет) очень быстро переводится на далекие орбиты с большими эксцентриситетами, что позволяет им избежать взаимных соударений.

Вопрос о возможной дальнейшей эволюции гигантских сгущений является открытым. Согласно работе (Vorobyov, Elbakyan, 2018) гигантские газовые сгущения существуют в протопланетном диске не более чем 0.5 млн лет, или разрушаясь во внутренней части диска, или выпадая на звезду, или выбрасываясь на гиперболические орбиты в результате взаимных возмущений. Но существуют и весьма оригинальные точки зре-

ния, что эти сгущения могут стать зародышами планет, даже земного типа (Nayakshin, 2017).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-12-01441). Вычисления проведены с использованием суперкомпьютера МВС-100К Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

Автор благодарен И.И. Шевченко за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Емельяненко Н.Ю. Короткопериодические кометы с высоким значением постоянной Тиссерана. I. Орбитальная эволюция // *Астрон. вестн.* 1997. Т. 31. С. 257–267. (Emel'yanenko N. Yu. Short-period comets with high values of the Tisserand constant: I. Orbital evolution // *Sol. Syst. Res.* 1997. V. 31. P. 229–238.)
- 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 // *Phys. Reports.* 2019, in press.
- Boss A.P. Evolution of the solar nebula. IV. Giant gaseous protoplanet formation // *Astrophys. J.* 1998. V. 503. P. 923–937.
- Boss A.P. Formation of giant planets by disk instability on wide orbits around protostars with varied masses // *Astrophys. J.* 2011. V. 731. Article id. 74. 13 p.
- Brasser R., Morbidelli A. Oort cloud and scattered disc formation during a late dynamical instability in the Solar System // *Icarus.* 2013. V. 225. P. 40–49.
- Brown M.E., Batygin K. Orbital clustering in the distant Solar system // *Astron. J.* 2019. V. 157. Article id. 62. 5 p.
- Carusi A., Valsecchi G.B. Planetary close encounters: importance of nearly tangent orbits // *Moon and Planets.* 1980. V. 22. P. 113–124.
- Davidsson B.J.R., Sierks H., Güttler C., Marzari F., Pajola M., Rickman H., A'Hearn M.F., Auger A.-T., El-Maarry M.R., Fornasier S., Gutiérrez P. J., Keller H.U., Massironi M., Snodgrass C., Vincent J.-B., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., Koschny D., Barucci M.A., Bertaux J.-L., Bertini I., Cremonese G., Da Deppo V., Debei S., De Cecco M., Feller C., Fulle M., Groussin O., Hviid S.F., Höfner S., Ip W.-H., Jorda L., Knollenberg J., Kovacs G., Kramm J.-R., Kürt E., Küppers M., La Forgia F., Lara L.M., Lazzarin M., Lopez Moreno J.J., Moissl-Fraund R., Mottola S., Naletto G., Oklay N., Thomas N., Tubiana C. The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 592. Article id. A63. 30 p.
- 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.

- Fulle M., Altobelli N., Buratti B., Choukroun M., Fulchignoni M., Grün E., Taylor M.G.G.T., Weissman P.* Unexpected and significant findings in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: An interdisciplinary view // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. P. S2–S8.
- Fulle M., Blum J.* Fractal dust constrains the collisional history of comets // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. V. 469. P. S39–S44.
- Galvagni M., Mayer L.* Early evolution of clumps formed via gravitational instability in protoplanetary discs: precursors of Hot Jupiters? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2014. V. 437. P. 2909–2921.
- Johnson B.M., Gammie C.F.* Nonlinear outcome of gravitational instability in disks with realistic cooling // *Astrophys. J.* 2003. V. 597. P. 131–141.
- 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. 11p.
- Mannel T., Bentley M.S., Schmied R., Jeszenszky H., Levasseur-Regourd A.C., Romstedt J., Torkar K.* Fractal cometary dust - a window into the early Solar system // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. P. S304–S311.
- Mayer L., Quinn T., Wadsley J., Stadel J.* Formation of giant planets by fragmentation of protoplanetary disks // *Science.* 2002. V. 298. P. 1756–1759.
- Morbidelli A., Rickman H.* Comets as collisional fragments of a primordial planetesimal disk // *Astron. and Astrophys.* 2015. V. 583 Article id. A43. 9 p.
- Morbidelli A., Nesvorný D.* Kuiper belt: Formation and evolution // *The Transneptunian Solar System* / Eds. Privalnik D., Barucci M.A., Young L. 2019, in press.
- Nayakshin S.* Formation of planets by tidal downsizing of giant planet embryos // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2010. V. 408. P. L36–L40.
- Nayakshin S.* Dawes review 7: The tidal downsizing hypothesis of planet formation // *Publ. Astron. Soc. Australia.* 2017. V. 34. E002. 46 p.
- Rafikov R.R.* Can giant planets form by direct gravitational instability? // *Astrophys. J.* 2005. V. 621. P. L69–L72.
- Rickman H., Marchi S., A'Hearn M.F., Barbieri C., El-Maarry M.R., Güttler C., Ip, W.-H., Keller H.U., Lamy P., Marzari F., Massironi M., Naletto G., Pajola M., Sierks H., Koschny D., Rodrigo R., Barucci M.A., Bertaux J.-L., Bertini I., Cremonese G., Da Deppo V., Debei S., De Cecco M., Fornasier S., Fulle M., Groussin O., Gutiérrez P.J., Hviid S.F., Jorda L., Knollenberg J., Kramm J.-R., Kührt E., Küppers M., Lara L.M., Lazzarin M., Lopez Moreno J.J., Michalik H., Sabau L., Thomas N., Vincent J.-B., Wenzel K.-P.* Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Constraints on its origin from OSIRIS observations // *Astron. and Astrophys.* 2015. V. 583. Article id. A44. 8 p.
- Stamatellos D., Whitworth A.P.* The properties of brown dwarfs and low-mass hydrogen-burning stars formed by disc fragmentation // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2009. V. 392. P. 413–427.
- Stamatellos D.* The migration of gas giant planets in gravitationally unstable disks // *Astrophys. J. Lett.* 2015. V. 810. Article id. L11. 5 p.
- Terquem C., Papaloizou J.C.B.* Dynamical relaxation and the orbits of low-mass extrasolar planets // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2002. V. 332. P. L39–L43.
- 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.* Formation of giant planets and brown dwarfs on wide orbits // *Astron. and Astrophys.* 2013. V. 552. Article id. A129. 15 p.
- 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.
- Wahlberg Jansson K., Johansen A.* Formation of pebble-pile planetesimals // *Astron. and Astrophys.* 2014. V. 570. Article id. A47. 10 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.