

ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ В СФЕРЕ ХИЛЛА ЗВЕЗДЫ ПРОКСИМА ЦЕНТАВРА

© 2023 г. С. И. Ипатов*

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*e-mail: siipatov@hotmail.com

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 23.05.2023 г.

Рассматривалось движение планетезималей, первоначально находившихся в зоне питания планеты Проксима Центавра c , на расстояниях от звезды от 500 а. е. до радиуса сферы Хилла звезды, равного 1200 а. е. В рассмотренной безгазовой модели основной выброс планетезималей из большей части зоны питания почти сформировавшейся планеты c на расстояния от звезды, большие 500 а. е., происходил в течение первых 10 млн лет. Только для планетезималей, первоначально находившихся на краях зоны питания планеты, доля планетезималей, впервые достигших 500 а. е. за время, большее 10 млн лет, была больше половины. Отдельные планетезимали могли достигать внешней части сферы Хилла звезды и через сотни миллионов лет. Около 90% планетезималей, впервые достигших 500 а. е. от звезды Проксима Центавра, впервые достигли 1200 а. е. от звезды менее, чем за 1 млн лет, при современной массе планеты c . При этом не более 2% планетезималей, имевших афелийные расстояния орбит между 500 и 1200 а. е., двигались по таким орбитам в течение более 10 млн лет (но менее нескольких десятков миллионов лет). При массе планеты, равной половине массы планеты c , доля планетезималей, увеличивших максимальные расстояния от звезды с 500 до 1200 а. е. менее, чем за 1 млн лет, была около 70–80%. При современной массе планеты c среди планетезималей, впервые достигших 500 а. е. от звезды, доля планетезималей с эксцентриситетами орбит, большими 1, равнялась 0.05 и 0.1 при начальных эксцентриситетах их орбит $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно. Среди планетезималей, впервые достигших 1200 а. е. от звезды, эта доля была около 0.3 при обоих значениях e_0 . Минимальные значения эксцентриситета орбит планетезималей, достигших 500 и 1200 а. е. от звезды, равнялись 0.992 и 0.995 соответственно. В рассмотренной модели во внешней части сферы Хилла звезды диск планетезималей был довольно плоским. Наклонения i орбит более 80% планетезималей, впервые достигших 500 или 1200 а. е. от звезды, не превышали 10° . При современной массе планеты c в среднем по всем вариантам расчетов доля таких планетезималей с $i > 20^\circ$ не превышала 1%. Полученные результаты могут быть интересны для понимания движения тел в некоторых других экзопланетных системах, особенно в системах с одной доминирующей планетой. Они могут быть использованы для задания исходных данных для моделей эволюции диска тел во внешней части сферы Хилла звезды Проксима Центавра, которые учитывают гравитационные взаимодействия и столкновения тел между собой, а также влияние других звезд. Сильно наклоненные орбиты тел во внешней части сферы Хилла звезды Проксима Центавра могут быть только в основном за счет тел, пришедших в сферу Хилла извне. Радиус сферы Хилла звезды Проксима Центавра на порядок меньше радиуса внешней границы облака Хилла в Солнечной системе и на два порядка меньше радиуса сферы Хилла Солнца. Поэтому трудно ожидать существования у этой звезды столь же массивного аналога облака Оорта, как у Солнца.

Ключевые слова: Проксима Центавра, планетезимали, зона питания планеты, сфера Хилла, облака Хилла и Оорта

DOI: 10.31857/S0320930X2306004X, **EDN:** DDQLXU

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяется изучению экзопланетных систем. Обзоры по этой тематике приведены, в частности, в (Маров, Шевченко, 2020; 2022). Система Проксима Центавра (Proxima Centauri) состоит из звезды с массой, равной 0.122 массы Солнца, и трех планет.

Звезда Проксима Центавра (α Центавра С, Alpha Centauri C) является членом тройной звездной системы, в которую входит также двойная звезда Альфа Центавра АВ Centauri (Alpha AV), состоящая из двух звезд с массами, близкими к массе Солнца. Расстояние между звездами Проксима Центавра и Альфа Центавра АВ составляет около 12950 а. е. Масса наиболее крупной планеты

Проксима Центавра c равна $m_c = 7m_E$ (где m_E – масса Земли). Большая полуось ее орбиты равна $a_c = 1.489$ а. е. Две другие планеты – Проксима Центавра b и d – имеют меньшие массы и большие полуоси орбит: $m_b = 1.17m_E$, $a_b = 0.04875$ а. е., $a_d = 0.02895$ а. е. и $m_d = 0.29m_E$.

Schwarz и др. (2018) изучали движение экзокомет в системе Проксима Центавра при распределении наклонений i начальных орбит экзокомет в виде облака Оорта с $0^\circ \leq i \leq 180^\circ$. Перигелийные расстояния орбит экзокомет были меньше 0.0485 а. е., а начальные эксцентриситеты орбит были в диапазоне от 0.95 до 0.9999 . Начальные значения больших полуосей орбит экзокомет варьировались в разных сериях расчетов от 1 до 1000 а. е. Schwarz и др. (2018) считали большую полуось орбиты планеты Проксима Центавра b равной 0.0485 а. е., а большую полуось орбиты планеты Проксима Центавра c брали в диапазоне от 0.06 до 0.3 а. е. (для тестовых вычислений до 0.7 а. е.). Позднее было обнаружено, что большая полуось планеты c гораздо больше, чем считалось в расчетах в (Schwarz и др., 2018). В этих расчетах вероятности столкновений экзокомет с планетами были примерно одинаковыми для модели, которая рассматривала только гравитационное влияние звезды и планет, и для модели, в которой дополнительно учитывалось гравитационное влияние двойной звездной системы Альфа Центавра АВ. Для последней модели Schwarz и др. (2018) получили, что за 2 млн лет более $3/5$ экзокомет с большими полуосями начальных орбит между 990 и 1000 а. е. достигли 20000 а. е. от звезды Проксима Центавра или столкнулись с ней.

Настоящая работа использует те же самые результаты моделирования эволюции орбит планетезималей, стартовавших из окрестности орбиты планеты Проксима Центавра c , что и (Ипатов, 2023; Ipatov, 2021; 2022; 2023). Она является завершающей работой в этой серии расчетов. В статье (Ипатов, 2023) рассматривались размеры зоны питания этой планеты c (включая изучение устойчивых орбит внутри этой зоны питания), а в статьях (Ipatov, 2021; 2022; 2023) оценивалась доставка планетезималей из этой зоны питания к внутренним планетам. В этих работах основное внимание уделялось движению планетезималей на расстояниях, меньших 2 а. е. от звезды. Ниже мы исследуем движение планетезималей из этой же зоны питания на расстояниях больших 500 а. е. Начальные данные во всех расчетах были одинаковыми, только рассматривалось движение тех же начальных планетезималей на разных расстояниях от звезды. Начальные эксцентриситеты орбит планетезималей равнялись 0.02 или 0.15 . В этих расчетах учитывалось гравитационное влияние звезды и планет c и b . Влияние газа не рассматривалось. Для рассмотренных начальных

данных считалось неважным каким именно образом сформировались достаточно крупные зародыши планет. В ряде работ (например, Lambrechts, Johansen, 2012; 2014; Morbidelli, 2020; Morbidelli и др., 2015; Wahlberg Jansson K., Johansen, 2014) считается, что при наличии газа в диске большую роль играла аккумуляция “гальки” (pebble accretion). В наших расчетах считалось, что орбита планеты c находится за линией льда, а орбита планеты b может находиться в зоне обитаемости. Ipatov (2021; 2022; 2023) исследовал доставку ледяных планетезималей из зоны питания планеты Проксима Центавра c к планетам Проксима Центавра b и d . Вероятность p_b столкновения планетезимали из зоны питания планеты c с планетой b оценивалась $\sim 2 \times 10^{-4}$ и 10^{-3} при начальных эксцентриситетах орбит планетезималей, равных 0.02 и 0.15 соответственно. Примерно такой же была вероятность столкновения планетезимали со звездой, а вероятность столкновения планетезимали с планетой d была, вероятно, меньше p_b не более, чем в два раза. Вероятность столкновения тел, мигрировавших из зон планет-гигантов, с Землей считается меньшей выше приведенных значений и в большинстве вариантов расчетов не превышала 10^{-5} (Ipatov, 2020). Суммарная масса планетезималей, доставленных к планете b из зоны питания планеты c , оценивалась в диапазоне $2 \times 10^{-3}m_E - 1.5 \times 10^{-2}m_E$. При доле воды в планетезималах от 0.05 до 0.5 масса воды, доставленной к планете b , оценивалась порядка $10^{-4}m_E - 10^{-2}m_E$ и, вероятно, превышала массу воды в земных океанах ($2 \times 10^{-4}m_E$). Количество планетезималей, достигших расстояний от звезды, больших 500 а. е., было не меньше числа планетезималей, столкнувшихся с планетами.

Сфера Хилла звезды Проксима Центавра (относительно двойной звезды Альфа Центавра) равна 1200 а. е. (Schwarz и др., 2018). Так как звезда Проксима Центавра является членом тройной звездной системы, то радиус ее сферы Хилла на два порядка меньше, чем у Солнечной системы. Согласно (Чебогарев, 1964), радиус сферы Хилла Солнечной системы равен 230000 а. е. По оценкам Souami и др. (2020), этот радиус равен 0.865 пк, то есть 178419 а. е. В этой работе считалось, что Солнце движется по круговой орбите с большой полуосью равной 25000 световых лет, а масса галактического звездного диска равна 2.32×10^{11} массам Солнца. Эти авторы рассматривали и другие сферы (в том числе сферы Чебогарева и Лапласа). Внутри сферы Хилла находится облако Оорта. Расстояние от Солнца до нижней и верхней границ облака Оорта считается порядка 10^3 и 10^5 а. е. соответственно.

В настоящей работе сначала приводится обзор публикаций по формированию облака Оорта в

Солнечной системе. Далее говорится о результатах расчетов движения планетезималей во внешней части сферы Хилла звезды Проксима Центавра. Рассматривается безгазовая стадия формирования планетной системы. Обсуждаются времена, за которые максимальные расстояния планетезималей от звезды впервые достигали 500 а. е. Приводится распределение планетезималей, впервые достигших 500 и 1200 а. е. от звезды, по эксцентриситетам и наклонениям их орбит. Рассматривается время, за которое максимальные расстояния планетезималей от звезды увеличиваются с 500 до 1200 а. е. Приводятся оценки числа планетезималей, которые могли находиться на расстоянии от звезды от 500 до 1200 а. е. в некоторые моменты времени. Обсуждается возможность формирования аналогов облаков Хиллса и Оорта в системе Проксима Центавра.

ОБЛАКА ХИЛЛСА И ООРТА В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Облако Оорта считается источником многих комет (Емельяненко, 2018; Dones и др., 2004; 2015; Fouchard и др., 2020; Emel'yanenko и др., 2005; 2007; 2013). Согласно (Emel'yanenko и др., 2013), наблюдаемые кометы галлеевского типа, почти половина комет семейства Юпитера и более 90% кентавров (для которых $5 < q < 28$ а. е., $a < 1000$ а. е., q и a — это перигелийное расстояние и большая полуось орбиты, соответственно) пришли из облака Оорта. Внутреннюю (уплощенную) часть облака Оорта (от 1000–5000 до 20000 а. е.) называют облаком Хиллса (Hills, 1981). Некоторые ученые облаком Оорта называют только его внешнюю сферическую часть (от 20000 до 50000–200000 а. е.). Оценки границ облака Оорта могут отличаться в несколько раз в работах разных авторов. Согласно (Fouchard и др., 2020), при $a < 6000$ а. е. облако Оорта довольно плоское, а при $a > 8000$ а. е. — изотропное. В (Morbidelli, 2005) масса облака Оорта оценивается равной $3m_E$. Fernandez и Brunini (2000) полагали, что масса облака Оорта равна нескольким массам Земли и большая часть этой массы находится во внутреннем ядре облака.

Рассматривалось несколько моделей формирования облака Оорта. “Классическая” модель рассматривает выброс тел из зоны планет-гигантов при формировании Солнечной системы (Сафронов, 1969). Duncan и др. (1987) начинали свои расчеты с $a = 2000$ а. е., наклонений i орбит, равных 18° , и перигелийных расстояний от 5 до 35 а. е. В расчетах учитывались возмущения планет, звезд и галактики. Интегрирование проводилось на интервале времени, равном 4.5 млрд лет. Был сделан вывод о том, что внутренняя часть облака Оорта ($a < 20000$ а. е.) содержит примерно в 5 раз больше комет, чем при $a > 20000$ а. е.

В (Dones и др., 2004) большие полуоси орбит начальных тел находились в диапазоне от 4 до 40 а. е., а их эксцентриситеты и наклонения были небольшими. Получено, что после 4 млрд лет примерно 2.5% вещества, выброшенного из Солнечной системы, оставалось в облаке Оорта. Morbidelli (2005), возражая против этой модели, отмечал, что при такой модели масса первоначальных планетезималей в зоне Урана и Нептуна должна быть порядка $100m_E$, а для модели Ниццы (Brasser, Morbidelli, 2013; Clement и др., 2018; 2019; Gomes и др., 2005; Levison и др., 2011; Morbidelli и др., 2005; 2010; Tsiganis и др., 2005) для миграции зародышей Урана и Нептуна на современные орбиты нужна меньшая суммарная масса планетезималей. В модели Ниццы толчком к резким изменениям орбит этих зародышей считается попадание Юпитера и Сатурна в орбитальный резонанс 1 : 2. По-моему, такое возражение Morbidelli (2005) может быть несущественным, так как в расчетах Ипатова (1991; 1993; 2000) получена миграция зародышей Урана и Нептуна от орбиты Сатурна на современные орбиты при суммарной массе планетезималей в зоне планет-гигантов от $135m_E$ до $180 m_E$. В этих расчетах (Ипатов, 1991; 1993; 2000; Ipatov, 1991) попадание Юпитера и Сатурна в резонанс не рассматривалось, а зародыши Урана и Нептуна мигрировали на современные орбиты только вследствие гравитационных взаимодействий с планетезималями. Более 80% планетезималей были выброшены на расстояния от Солнца, большие 500 а. е. В (Ипатов, 2000) был сделан вывод, что для миграции зародышей Урана и Нептуна на современные орбиты достаточно диска планетезималей с массой, равной $100m_E$. Эта масса меньше, если рассматривать большие (чем при расчетах) значения больших полуосей начальных орбит зародышей Урана и Нептуна (в расчетах они равнялись 8 и 10 а. е.). Основные изменения элементов орбит зародышей планет-гигантов в расчетах Ипатова (1993; 2000) происходили за время не более 10 млн лет, однако отдельные тела могли выпадать на эти зародыши через время порядка миллиардов лет. Модели Ниццы и Ипатова обсуждаются также в (Маров, Ипатов, 2023). Большая суммарная масса планетезималей в зоне планет-гигантов рассматривалась и Сафроновым (1969). Сафронов (1969) считал массу протопланетного облака равной 0.05 массы Солнца. При доле пыли в облаке, равной 0.015, такая масса облака соответствует массе твердого вещества, равной $250m_E$. Последняя масса раз в пять может превышать массу твердого вещества в планетах. Такая оценка отношения массы выброшенных планетезималей к массе твердого вещества, вошедшего в планеты, согласуется с результатами расчетов аккумуляции планет (Ипатов, 1993; 2000; Ipatov, 1987). Еще до открытия первых транснептуновых объектов в (Ipatov, 1987), в част-

ности, отмечалось, что часть транснептуновых объектов могла прийти из зоны питания планет-гигантов, а часть объектов могла образоваться за орбитой Нептуна. Ипатов (2000) отмечал, что Юпитер выбрасывал тела на более эксцентричные орбиты, чем Уран и Нептун. Сафронов (1969) полагал, что 5% тел, выброшенных из зон питания планет, остались в облаке Оорта.

Dybczynski и др. (2008) рассматривали эволюцию орбит тел, первоначально находившихся на почти круговых компланарных орбитах на расстоянии от 4 до 50 а. е. от Солнца. В их расчетах только 0.3% частиц остались во внешней части облака Оорта ($c > 45$ а. е. и $a > 25000$ а. е.) через 1 млрд лет. Emel'yanenko и др. (2007; 2013) рассматривали модель аналогичную (Dones и др., 2004), но для ускорения расчетов рассматривались тела, находившиеся первоначально на эксцентричных орбитах. Перигелии q начальных орбит находились в диапазоне от 5 до 36 а. е., причем $50 < a < 300$ а. е. В (Emel'yanenko и др., 2007) через 4.5 млрд лет для 17% тел $a > 10^3$ а. е., а для 9.4% тел $a > 10^4$ а. е.

Считается, что при формировании Солнечной системы в ее окрестности было больше звезд, чем сейчас (Brasser и др., 2006; Fernandez, Brunini, 2000). Fernandez и Brunini (2000) рассматривали формирование облака Оорта в более плотном, чем в настоящее время, окружении звезд. В их расчетах начальные значения больших полуосей орбит тел равнялись 100 или 250 а. е., а перигелии их орбит были в интервале от 4 до 30 а. е. Начальные наклоны орбит равнялись 0.1 или 0.2 рад. Рассматриваемый интервал времени равнялся 100 млн лет. Гравитационные взаимодействия тел с планетами учитывались методом сфер. Получено, что в этом случае число тел во внешних областях облака Оорта гораздо меньше, чем при формировании облака Оорта при современном окружении звезд. Согласно (Brasser и др., 2006), модель формирования облака Оорта в более плотном окружении звезд позволяет объяснить орбиты таких объектов, как (90377) Седна (Sedna). В их расчетах рассматривались начальные орбиты тел с $4 < a < 12$ а. е. и $20 < a < 50$ а. е. Модель включала гравитационные эффекты от Солнца, Юпитера и Сатурна. Рассматриваемый интервал времени равнялся 3 млн лет. При интегрировании уравнений движения тел использовался симплектический интегратор (Levison, Duncan, 1994). В статье (Brasser и др., 2010) проводились расчеты образования облака Оорта при различном удалении Солнечной системы от центра галактики.

Levison и др. (2010) считали, что около 90% тел облака Оорта имеют внесолнечное происхождение. Siraj и Loeb (2021) также полагали, что межзвездные объекты преобладают в облаке Оорта,

причем их доля больше на большем расстоянии от Солнца.

ВАРИАНТЫ РАСЧЕТОВ

В рассмотренных вариантах расчетов исследовалась эволюция орбит планетезималей из зоны питания планеты Проксима Центавра c . При моделировании движения планетезималей учитывалось гравитационное влияние звезды и планет c и b . В ряде вариантов кроме расчетов с современной массой планеты c $m_c = 7m_E$ проводились расчеты, при которых масса планеты, двигавшейся по орбите планеты c , равнялась $k_c = 0.5$ или $k_c = 0.1$ от ее современной массы. Наклонения орбит планет брались равными нулю. Начальные эксцентриситеты орбит планетезималей равнялись $e_0 = 0.02$ или $e_0 = 0.15$. Начальные наклоны орбит планетезималей равнялись $e_0/2$ рад (т.е. равнялись 0.57° или 4.3° при $e_0 = 0.02$ или $e_0 = 0.15$ соответственно). В протопланетном диске начальные эксцентриситеты орбит планетезималей были небольшими. Однако они могли увеличиваться из-за взаимного гравитационного влияния планетезималей. Ипатов (1993; 2000) отмечал, что средний эксцентриситет орбит тел, находившихся в зоне питания планет земной группы, мог возрастать до 0.2 и даже до 0.4 на последних стадиях эволюции дисков планетезималей. В зоне питания планет-гигантов рост эксцентриситетов орбит планетезималей был еще больше, чем в зоне питания планет земной группы. В каждом варианте расчетов (с фиксированными значениями a_{\min} и e_0) в системе Проксима Центавра для $(i + 1)$ -й планетезимали начальное значение a вычислялось по формуле $a_{0(i+1)} = (a_{0i}^2 + [a_{\max}^2 - a_{\min}^2]/N_0)^{1/2}$, где a_{0i} — это значение a_0 для i -й планетезимали, $a_{\max} = a_{\min} + 0.1$ а. е., $N_0 = 250$. Значения a_{\min} варьировались от 0.9 до 2.2 а. е. с шагом в 0.1 а. е. Рассматриваемый интервал времени в расчетах был не меньше 100 млн лет (если эволюция не заканчивалась раньше). В вариантах с a_{\min} от 1.2 до 1.7 а. е. вычисления проводились для эволюции в течение нескольких сотен миллионов лет (до 1 млрд лет).

Уравнения движения интегрировались с помощью симплектического алгоритма из пакета SWIFT (Levison, Duncan, 1994). В (Frantseva и др., 2022) отмечалось, что в этом алгоритме шаг интегрирования значительно уменьшается при расстояниях, меньших 3.5 радиуса Хилла. Из интегрирования исключались планетезимали, которые столкнулись с планетами или звездой или достигли 1200 а. е. от звезды. Согласно (Schwarz и др., 2018), радиус сферы Хилла звезды Проксима Центавра равен 1200 а. е. В настоящей работе основное внимание уделяется изучению движения планетезималей во внешней части сферы

Хилла звезды Проксима Центавра – на расстояниях от звезды от 500 до 1200 а. е.

Выброс планетезималей из зоны питания планеты c на расстояние R от звезды, большее 500 а. е., в рассмотренных вариантах расчетов кратко обсуждался в (Ipatov, 2022; 2023; Маров, Ипатов, 2023). При расчетах на интервале времени $T \geq 10$ млн лет для современной массы планеты c ($k_c = 1$) отношение $p_{cej} = p_c/p_{ej}$ вероятности p_c столкновения планетезимали с планетой c к вероятности p_{ej} выброса планетезимали на расстояние $R > 500$ а. е. при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ было в интервалах 0.8–1.3 и 0.4–0.6 соответственно. При массе планеты c , меньшей ее современной массы в два раза, ($k_c = 0.5$) и $T \geq 100$ млн лет, это отношение было в интервалах 1.3–1.5 и 0.5–0.6. При малой массе планеты c выброс планетезималей был небольшим. Общая масса планетезималей из зоны питания планеты c , достигших 500 а. е. от звезды, могла быть около $(3.5–7)m_E$, а суммарная масса планетезималей в этой зоне могла быть не меньше $10m_E$ и $15m_E$ при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно. На основании полученных значений p_{ej} из закона сохранения энергии можно оценить, что большая полуось орбиты планеты c в ходе ее аккумуляции могла уменьшиться не менее чем в полтора раза.

ВРЕМЕНА ДО УВЕЛИЧЕНИЯ РАССТОЯНИЙ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ ОТ ЗВЕЗДЫ ДО 500 а. е.

В табл. 1 для современной массы планеты c и ряда значений a_{\min} приведены значения доли p_{ej} планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды за весь рассмотренный интервал времени (среди всех начальных планетезималей), а также отношений $f_{10}, f_{10-50}, f_{50-100}, f_{>100}$ числа планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды соответственно за 10 млн лет, за время между 10 и 50 млн лет, между 50 и 100 млн лет, за время большее 100 млн лет к числу планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды за весь рассмотренный интервал времени. Остальные планетезимали столкнулись с планетами или звездой или остались на эллиптических орбитах с афелийными расстояниями $Q < 500$ а. е. Значения p_{ej} были в среднем около 0.5 при $e_0 = 0.02$ и $1.3 \leq a_{\min} \leq 1.7$ а. е., и около 0.6–0.7 при $e_0 = 0.15$ и $1.2 \leq a_{\min} \leq 1.7$ а. е. Большие значения p_{ej} , равные 0.95 и 0.87 при $e_0 = 0.15$ и a_{\min} , равном 2.0 и 2.1 а. е., обусловлены тем, что в этих вариантах доля планетезималей, столкнувшихся с планетами, была небольшой. При a_{\min} , равном 1.3, 1.6 и 1.7 а. е., и $e_0 = 0.02$ значения f_{10} равнялись 0.96. Значения f_{10} при $1.1 \leq a_{\min} \leq 1.8$ а. е. и $e_0 = 0.15$ были не меньше 0.9. В этих случаях почти все планетезимали достигали 500 а. е. за время не более 10 млн лет. Преимущественный выброс планете-

зимальей после 10 млн лет был только при $2.1 \leq a_{\min} \leq 2.2$ а. е. и $e_0 = 0.15$.

Как отмечалось выше, основной выброс планетезималей из зоны питания планеты c на расстояния от звезды $R > 500$ а. е. был в течение первых 10 млн лет. Приведем результаты расчетов для больших интервалов времени при современной массе планеты c . Значения f_{10-50} и f_{50-100} больше для планетезималей, более удаленных от орбиты планеты c в начальный момент времени. При $e_0 = 0.15$ и $a_{\min} = 1.0$ а. е. или $a_{\min} = 2.2$ а. е., а также при $e_0 = 0.02$ и $a_{\min} = 1.8$ а. е. получено $f_{50-100} > 0.1$. В ряде вариантов расчетов планетезимали достигали 500 а. е. и после 100 млн лет, но значения $f_{>100}$ в табл. 1 малы. Например, доля $f_{100-500}$ планетезималей, достигших 500 а. е. при $100 < t < 500$ млн лет (среди всех выброшенных планетезималей), равнялась $3/160 \approx 0.02$ при $a_{\min} = 1.2$ а. е. и $e_0 = 0.15$. В случае $e_0 = 0.02$ при $a_{\min} = 1.4$ а. е. и $a_{\min} = 1.7$ а. е., $f_{100-500}$ равнялось $7/120 \approx 0.058$ и $2/143 \approx 0.014$ соответственно, и $f_{100-500} > f_{50-100}$. Отдельные планетезимали (например, при $a_{\min} = 1.2$ а. е. и $e_0 = 0.15$) выбрасывались и после 500 млн лет.

При меньшей массе планеты, двигавшейся по орбите планеты c , планетезимали достигали 500 а. е. позже, чем при современной массе планеты c (сравни табл. 1 и 2). Для $a_{\min} = 1.4$ и $a_{\min} = 1.5$ а. е. при отношении k_c массы планеты к современной массе планеты c , равном 0.5, значения f_{10-50} были в несколько раз больше, чем при $k_c = 1$. Однако значения f_{10} в этих вариантах были не малы и составили около 0.6 и 0.5 при $e_0 = 0.15$ и $e_0 = 0.02$ соответственно (см. табл. 2). Поэтому при последнем удвоении массы растущей планеты c более половины выброшенных планетезималей были выброшены в течение не более 10 млн лет. При массе зародыша планеты c , в 10 раз меньшей современной массы планеты c , в вариантах расчетов, представленных в табл. 2, доля p_{ej} планетезималей, достигших расстояния от звезды большего 500 а. е., была меньше 0.2, а f_{10} было близко к нулю, т.е. выброса планетезималей за пределы сферы Хилла в первые 10 млн лет практически не было. Для системы Проксима Центавра за время в несколько миллионов лет масса растущей планеты могла превысить половину современной массы планеты c . Основной выброс планетезималей из этой системы был после того, как планета c достигла примерно половины своей массы. Оценки с небольшими значениями массы планеты могут быть интересны для других возможных экзопланетных систем. Отметим, что для других планетных систем времена достижения планетезималими 500 а. е. от звезды зависят не только от масс звезды и планеты, но и от расстояния от звезды до планеты. Чем дальше от звезды планета, тем больше время между сближениями планетезима-

Таблица 1. Вероятности p_{ej} выброса планетезималей на расстояние от звезды, большее 500 а. е., и доли $f_{10}, f_{10-50}, f_{50-100}, f_{>100}$ планетезималей, выброшенных за ряд интервалов времени при современной массе планеты c ($k_c = 1$), $e_0 = 0.02$ или $e_0 = 0.15$, для нескольких значений a_{\min} от 1.0 до 2.2 а. е., приведенных в первой строчке таблицы

e_0	a_{\min} , а. е.	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
0.02	p_{ej}		0.03	0.34	0.46	0.48	0.48	0.44	0.57	0.12				
0.15	p_{ej}	0.17	0.60	0.63	0.65	0.73	0.71	0.72	0.62	0.50	0.42	0.95	0.87	0.31
0.02	f_{10}		0.71	0.68	0.96	0.77	0.87	0.96	0.96	0.39				
0.02	f_{10-50}		0.19	0.27	0.04	0.14	0.09	0.03	0.03	0.50				
0.02	f_{50-100}		0.1	0.04	0	0.03	0.02	0.01	0	0.11				
0.02	$f_{>100}$		—	0.01	—	0.06	0.02	—	0.01	—				
0.15	f_{10}	0.69	0.90	0.91	0.95	0.95	0.96	0.97	0.93	0.94	0.85	0.82	0.41	0.12
0.15	f_{10-50}	0.19	0.07	0.06	0.05	0.045	0.04	0.03	0.064	0.06	0.14	0.17	0.53	0.57
0.15	f_{50-100}	0.12	0.03	0.01	0	0.005	0	0	0	0	0.01	0.01	0.06	0.31
0.15	$f_{>100}$	—	0	0.02	—	0	0	—	0.006	—	—	0	—	—

Примечания: p_{ej} — это доля планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды за весь рассмотренный интервал времени (среди всех начальных планетезималей). $f_{10}, f_{10-50}, f_{50-100}, f_{>100}$ — это отношения числа планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды соответственно за 10 млн лет, за время между 10 и 50 млн лет, между 50 и 100 млн лет, за время, большее 100 млн лет, к числу планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды за весь рассмотренный интервал времени. В графе $f_{>100}$ приведен прочерк, если в данном варианте расчетов интервал времени равнялся 100 млн лет. В каждом варианте расчетов в начальный момент времени рассматривалось 250 тел с большими полуосями орбит от a_{\min} до $a_{\min} + 0.1$ а. е., эксцентриситетами и наклонениями, равными e_0 и $e_0/2$ рад соответственно.

Таблица 2. Вероятности p_{ej} выброса планетезималей на расстояние от звезды, большее 500 а. е., и доли $f_{10}, f_{10-50}, f_{50-100}$ планетезималей, выброшенных за ряд интервалов времени, при массе планеты, равной $k_c m_c$ (m_c — современная масса планеты c , $k_c = 0.5$ или $k_c = 0.1$), $e_0 = 0.02$ или $e_0 = 0.15$, и $a_{\min} = 1.4$ или $a_{\min} = 1.5$ а. е.

k_c	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
E_0	0.02	0.02	0.15	0.15	0.02	0.02	0.15	0.15
a_{\min} , а. е.	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.5
p_{ej}	0.284	0.344	0.508	0.664	0.036	0.068	0.14	0.188
f_{10}	0.47	0.49	0.63	0.60	0	0	0.03	0
f_{10-50}	0.52	0.45	0.31	0.37	0.44	0.18	0.37	0.47
f_{50-100}	0.01	0.06	0.06	0.03	0.56	0.82	0.60	0.53

Примечания: p_{ej} — это доля планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды за весь рассмотренный интервал времени $T = 100$ млн лет. $f_{10}, f_{10-50}, f_{50-100}$ — это отношения числа планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды соответственно за первые 10 млн лет, за время между 10 и 50 млн лет, между 50 и 100 млн лет, к числу планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды за $T = 100$ млн лет. В каждом варианте расчетов в начальный момент времени рассматривалось 250 тел с большими полуосями орбит от a_{\min} до $a_{\min} + 0.1$ а. е., эксцентриситетами и наклонениями, равными e_0 и $e_0/2$ рад соответственно.

лей с планетой и тем больше характерное время достижения 500 а. е. от звезды.

ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЫ И НАКЛОНЕНИЯ ОРБИТ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ, ДОСТИГШИХ 500 И 1200 а. е. ОТ ЗВЕЗДЫ

В табл. 3 приведены эксцентриситеты орбит планетезималей в те моменты времени, когда их расстояние от звезды в первый раз достигло 500 а. е. Через $N_{<4}, N_{4-6}, N_{6-8}, N_{8-10}, N_{002}, N_{005}, N_{01}, N_{11}$ и $N_{>11}$ обозначено число тел, эксцентриситеты орбит которых находятся в интервалах (e_n, e_x)

меньших 0.994, от 0.994 до 0.996, от 0.996 до 0.998, от 0.998 до 1.0, от 1.0 до 1.002, от 1.002 до 1.005, от 1.005 до 1.01, от 1.01 до 1.1 и больших 1.1 соответственно. N_s — это общее число планетезималей, впервые достигших 500 а. е. от звезды. e_{\min} и e_{\max} — минимальные и максимальные эксцентриситеты орбит. Σ_n — это сумма чисел планетезималей в столбце для вариантов, приведенных выше. $\Sigma_f = \Sigma_n / N_s$ — доли числа планетезималей с различными эксцентриситетами. Масса m_p планеты, двигавшейся по орбите планеты c , равнялась $7k_c m_E$. В большинстве вариантов расчетов $m_p = 7m_E$. Рассматривались также значения массы этой плане-

ты, равные $3.5m_E$ ($k_c = 0.5$) или $0.7m_E$ ($k_c = 0.1$). В большинстве вариантов расчетов шаг интегрирования t_s равнялся одним земным суткам. Результаты расчетов при t_s , равном 0.2, 0.5 или двум земным суткам, помечены в таблицах *, ** или *** соответственно. Расчеты с различными значениями шага интегрирования t_s дали примерно одинаковые результаты (с учетом того, что при тесных сближениях эволюция орбит является хаотической). В табл. 4 приведены эксцентриситеты орбит планетезималей в те моменты времени, когда их расстояние от звезды в первый раз достигло 1200 а. е. Обозначения такие же, как и в табл. 3. Хотя эксцентриситеты орбит рассмотренных планетезималей, двигавшихся на расстояниях от звезды более 500 а. е., достаточно велики, такие орбиты отличались от орбит экзокомет, рассмотренных в (Schwarz и др., 2018). Перигелии орбит таких планетезималей часто были близки к орбите планеты c , тогда как Schwarz и др. (2018) рассматривали начальные орбиты с перигелийным расстоянием, меньшим 0.0485 а. е.

При современной массе планеты c среди планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды, доля планетезималей с эксцентриситетами орбит, большими 1, равнялась 0.05 и 0.1 при начальных эксцентриситетах их орбит $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно. Среди планетезималей, достигших 1200 а. е. от звезды, эта доля была около 0.3 при обоих значениях e_0 . Минимальные значения эксцентриситета орбит планетезималей, достигших 500 и 1200 а. е. от звезды, равнялись 0.992 и 0.995 соответственно.

При рассмотрении современной массы планеты c ($k_c = 1$) эксцентриситеты e_{500} орбит планетезималей, достигших $a_{\text{lim}} = 500$ а. е. от звезды, в 87 и 82% случаев находились в интервале от 0.992 до 0.998 при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно (табл. 3). Во всех рассмотренных вариантах они превышали 0.992 и были меньше 1.4. Доля планетезималей с $e_{500} > 1$ равнялась 0.05 и 0.1 при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно (табл. 3). Существенной зависимости от a_{min} распределения планетезималей по эксцентриситетам e_{500} не наблюдалось. Однако небольшая зависимость может быть. Например, для $e_0 = 0.15$ и $k_c = 1$ доля орбит с эксцентриситетами $e < 0.994$ при $a_{\text{lim}} = 500$ а. е. и с $0.996 < e < 0.998$ при $a_{\text{lim}} = 1200$ а. е. в случае $a_{\text{min}} > 1.8$ а. е. была немного больше значений осредненных по всем значениям a_{min} .

Ближкие (к случаю $k_c = 1$) значения e_{500} были получены для зародыша планеты c с массой, равной $3.5m_E$ ($k_c = 0.5$): $0.992 \leq e_{500} \leq 0.998$ в 91 и 87% случаев при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно, а доля планетезималей с $e_{500} > 1$ равнялась 6 и 10% при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно (табл. 3). При $k_c = 0.1$ было немного больше планетезима-

лей с $e_{500} > 1$: 12.5 и 14.4% при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно (табл. 3). Эти оценки свидетельствуют о том, что распределение планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды, по эксцентриситетам их орбит не сильно отличалось в различные моменты аккумуляции планеты c (при разных рассмотренных значениях массы планеты, двигавшейся по орбите планеты c).

Эксцентриситеты e_{1200} орбит планетезималей, достигших $a_{\text{lim}} = 1200$ а. е. от звезды, были в среднем немного больше, чем e_{500} . Во всех вариантах, представленных в табл. 4, $e_{1200} \geq 0.995$, а доля планетезималей с $e_{1200} < 0.996$ не превышала 0.01. При всех значениях k_c и e_0 в табл. 4 доля Σ_f числа тел с эксцентриситетами $0.996 \leq e_{1200} \leq 1$ была не меньше 0.6. Среди всех планетезималей, достигших 1200 а. е., при $k_c = 1$ доля орбит с эксцентриситетами, большими 1, была около 0.306 и 0.315 при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно. При $k_c = 1$ доля планетезималей с $e_{1200} > 1.1$ не превышала 0.01. При расчетах с $k_c = 0.1$ такая доля равнялась 0 при $a_{\text{lim}} = 500$ а. е. и была близка к 0.1 при $a_{\text{lim}} = 1200$ а. е.

Для сравнения, при эволюции диска тел с суммарной массой, равной $200m_E$, соответствующего зоне питания Урана и Нептуна, в статье (Ипатов, 1989б) было получено, что у 13% орбит выброшенных тел $e > 1.1$. Ипатов (1989а, 1989б) рассматривал миграцию тел из зон питания Урана и Нептуна. Гравитационное влияние почти сформировавшихся планет Солнечной системы и тел диска учитывалось методом сфер действия. В (Ипатов, 1989а) суммарная масса тел диска равнялась $10m_E$, и массы тел были на порядок меньше, чем в (Ипатов, 1989б). Рассматривалось распределение тел, выброшенных на гиперболические орбиты, по эксцентриситетам их орбит и параметру Тиссерана. Получено, что у 30% выброшенных тел $e > 1.1$. Хотя начальные тела находились в зоне питания Урана и Нептуна, значения параметра Тиссерана указывают на то, что Юпитер выбросил больше тел, чем Уран или Нептун. При этом Юпитер выбрасывал тела на более эксцентричные орбиты.

В табл. 5 и 6 приведены наклонения орбит планетезималей, достигших первый раз расстояния от звезды, равного 500 а. е. и 1200 а. е. соответственно. $N_2, N_4, N_6, N_8, N_{10}, N_{15}, N_{20}, N_{>20}$ — число планетезималей, наклонения орбит которых находятся в интервалах (i_n, i_x) от 0° до 2° , от 2° до 4° , от 4° до 6° , от 6° до 8° , от 8° до 10° , от 10° до 15° , от 15° до 20° и больше 20° соответственно.

Наклонения i_{500} и i_{1200} орбит более 80% планетезималей, достигших соответственно 500 или 1200 а. е. от звезды, не превышали 10° (табл. 5–7), причем значения i_{500} и i_{1200} были в основном близки между собой, и существенные отличия между i_{500} и i_{1200} были только при $k_c = 0.1$ и $e_0 = 0.02$ (табл. 7).

Таблица 3. Распределение планетезималей, впервые достигших 500 а. е. от звезды, по интервалам эксцентриситетов (e_n, e_x) их орбит при e_0 , равном 0.02 или 0.15, и нескольких значениях a_{\min} от 1.1 до 2.2 а. е., приведенных в первом столбце таблицы

a_{\min} , а. е.	e_0	k_c	$N_{<4}$	N_{4-6}	N_{6-8}	N_{8-10}	N_{002}	N_{005}	N_{01}	N_{11}	$N_{>11}$	N_s	e_{\min}	e_{\max}
$e_n =$			—	0.994	0.996	0.998	1.0	1.002	1.005	1.01	1.1			
$e_x =$			0.994	0.996	0.998	1.0	1.002	1.005	1.01	1.1	—			
1.1	0.02	1	2	3	2	0	1	0	0	0	0	8	0.993	1.000
1.2	0.02	1	29	25	17	9	1	2	0	2	0	85	0.992	1.021
1.3	0.02	1	29	48	26	8	2	1	0	0	0	114	0.993	1.002
1.4	0.02	1	29	45	25	8	3	5	2	2	1	120	0.992	1.173
1.4	0.02	1*	23	40	15	9	2	1	1	1	0	92	0.992	1.020
1.4	0.02	1**	26	36	17	6	3	2	0	4	0	94	0.993	1.073
1.4	0.02	1***	18	35	22	5	7	1	0	1	0	89	0.993	1.031
1.5	0.02	1	31	56	21	11	0	0	0	0	0	119	0.992	1.000
1.6	0.02	1	40	37	19	10	2	1	0	0	0	109	0.992	1.003
1.7	0.02	1	42	62	27	10	2	0	0	0	0	143	0.992	1.001
1.8	0.02	1	11	13	6	1	0	0	0	0	0	31	0.993	0.999
Σ_n	0.02	1	280	400	197	77	23	13	3	10	1	1004		
Σ_f	0.02	1	0.279	0.399	0.196	0.077	0.023	0.013	0.003	0.010	0.001	1.00	0.992	1.173
1.0	0.15	1	11	18	7	3	1	1	1	0	0	42	0.993	1.007
1.1	0.15	1	26	37	14	8	6	4	1	1	1	98	0.992	1.176
1.2	0.15	1	32	66	29	10	8	4	5	5	1	160	0.993	1.167
1.3	0.15	1	29	56	34	26	7	1	1	3	1	158	0.992	1.135
1.3	0.15	1**	28	65	28	21	10	4	3	2	1	162	0.993	1.125
1.4	0.15	1	37	68	34	19	8	5	3	8	1	183	0.992	1.132
1.4	0.15	1*	38	67	37	19	6	4	1	2	2	176	0.992	1.356
1.4	0.15	1**	29	69	41	14	14	8	1	5	1	182	0.993	1.164
1.4	0.15	1***	33	67	31	20	8	4	2	9	0	174	0.993	1.064
1.5	0.15	1	32	68	38	14	12	4	2	6	2	178	0.993	1.235
1.5	0.15	1**	33	73	28	20	7	4	0	11	1	177	0.993	1.129
1.5	0.15	1***	27	67	29	20	11	7	2	5	4	172	0.993	1.294
1.6	0.15	1	34	66	34	17	11	7	6	3	2	180	0.993	1.180
1.7	0.15	1	37	59	27	12	6	4	3	7	1	156	0.992	1.191
1.8	0.15	1	31	58	29	4	0	0	1	1	1	125	0.992	1.189
1.9	0.15	1	28	51	17	7	0	1	1	0	0	105	0.992	1.005
2.0	0.15	1	79	99	46	12	2	0	0	0	0	238	0.992	1.001
2.1	0.15	1	74	96	35	9	1	0	1	0	1	217	0.992	1.169
2.2	0.15	1	25	38	9	6	0	0	0	0	0	78	0.992	0.999
Σ_n	0.15	1	652	1200	540	257	117	57	33	68	20	2919		
Σ_f	0.15	1	0.224	0.411	0.185	0.088	0.040	0.020	0.011	0.023	0.007	1.0	0.992	1.356
1.4	0.02	0.5	23	33	7	2	2	0	1	3	0	71	0.993	1.066
1.5	0.02	0.5	30	38	12	2	0	0	1	2	1	86	0.993	1.264
Σ_n	0.02	0.5	53	71	19	4	2	0	2	5	1	157		
Σ_f	0.02	0.5	0.338	0.452	0.121	0.025	0.013	0	0.013	0.032	0.006	0.000	0.993	1.264
1.4	0.15	0.5	30	55	22	6	5	1	1	6	1	127	0.993	1.108

Таблица 3. Окончание

a_{\min} , а. е.	e_0	k_c	$N_{<4}$	N_{4-6}	N_{6-8}	N_{8-10}	N_{002}	N_{005}	N_{01}	N_{11}	$N_{>11}$	N_s	e_{\min}	e_{\max}
1.5	0.15	0.5	40	83	24	4	6	3	1	4	1	166	0.993	1.105
Σ_n	0.15	0.5	70	138	46	10	11	4	2	10	2	293		
Σ_f	0.15	0.5	0.239	0.471	0.157	0.034	0.038	0.014	0.007	0.034	0.007	1.0	0.993	1.108
1.4	0.02	0.1	2	3	2	1	1	0	0	0	0	9	0.994	1.002
1.5	0.02	0.1	1	8	3	2	1	0	0	2	0	17	0.994	1.056
Σ_n	0.02	0.1	3	11	5	3	2	0	0	2	0	26		
Σ_f	0.02	0.1	0.115	0.423	0.192	0.115	0.077	0	0	0.077	0	1.0	0.994	1.056
1.4	0.15	0.1	9	16	2	1	2	2	1	2	0	35	0.993	1.018
1.5	0.15	0.1	19	24	4	2	3	1	1	1	0	55	0.993	1.055
Σ_n	0.15	0.1	28	40	6	3	5	3	2	3	0	90		
Σ_f	0.15	0.1	0.311	0.444	0.067	0.033	0.056	0.033	0.022	0.033	0	1.0	0.993	1.055

Примечания: $N_{<4}$, N_{4-6} , N_{8-10} , N_{002} , N_{005} , N_{01} , N_{11} , $N_{>11}$ – это число планетезималей, эксцентриситеты орбит которых находятся в интервалах (e_n, e_x) до 0.994, от 0.994 до 0.996, от 0.996 до 0.998, от 0.998 до 1.0, от 1.0 до 1.002, от 1.002 до 1.005, от 1.005 до 1.01, от 1.01 до 1.1 и больше 1.1, соответственно. N_s – это общее число планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды. e_{\min} и e_{\max} – минимальные и максимальные эксцентриситеты орбит. В каждом варианте расчетов в начальный момент времени рассматривалось 250 планетезималей с большими полуосями орбит от a_{\min} до $a_{\min} + 0.1$ а. е., эксцентриситетами и наклонениями, равными e_0 и $e_0/2$ рад соответственно. Масса планеты c равнялась $7 k_c m_E$. Σ_n – это сумма чисел планетезималей в столбце для вариантов, приведенных выше. $\Sigma_f = \Sigma_n / N_s$.

Доля планетезималей с $i > 20^\circ$ в большинстве серий расчетов не превышала 0.02 и в среднем по всем вариантам с $k_c = 1$ не превышала 0.01. Только при $k_c = 0.1$ и $e_0 = 0.15$ эта доля составила 0.07 и 0.11 при $a_{\text{lim}} = 500$ и $a_{\text{lim}} = 1200$ а. е. соответственно. Распределение орбит планетезималей по i может зависеть от a_{\min} . Например, в случае $e_0 = 0.02$ и $k_c = 1$ (как для $a_{\text{lim}} = 500$ а. е., так и для $a_{\text{lim}} = 1200$ а. е.) доля планетезималей с $i < 2^\circ$ при $a_{\min} \leq 1.6$ а. е. меньше, а при $a_{\min} \geq 1.7$ а. е. больше среднего значения по всем значениям a_{\min} . В случае $e_0 = 0.15$ и $k_c = 1$ (как для $a_{\text{lim}} = 500$ а. е., так и для $a_{\text{lim}} = 1200$ а. е.) доля планетезималей с $2^\circ < i < 4^\circ$ при $a_{\min} \geq 2$ а. е. больше чем в 1.5 раза, превышает среднее значение по всем значениям a_{\min} . Для двух рассмотренных планетезималей при $a_{\text{lim}} = 1200$ а. е. значения наклонов орбит равнялись 179° и 175° . Однако и в этих случаях орбиты лежали почти в той же плоскости, что и при $i = 0$. Для всех остальных планетезималей $i < 49^\circ$. При $k_c = 1$, $a_{\min} = 1.8$ а. е. и $e_0 = 0.15$ следующее, меньшее чем 179° , значение наклона i_{1200} равнялось 17.7° .

Результаты расчетов, представленные в табл. 3–6, показывают сравнительно небольшие отличия распределений планетезималей, достигших 500 и 1200 а. е., по эксцентриситетам и наклонениям их орбит при различных рассмотренных значениях k_c (массы планеты на орбите планеты c) и начальных эксцентриситетов e_0 . Поэтому можно ожидать, что и для более сложных моделей эволюции дисков планетезималей в ходе аккумуля-

ции планеты c такие распределения планетезималей будут не сильно отличаться от распределений, приведенных в табл. 3–6. Полученные распределения планетезималей по эксцентриситетам и наклонениям орбит могут быть использованы в качестве начальных данных при построении моделей, которые будут учитывать гравитационные взаимодействия и столкновения планетезималей и влияние звезд и моделировать формирование аналогов облаков Хиллса и Оорта.

ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АНАЛОГОВ ОБЛАКОВ ХИЛЛСА И ООРТА ОКОЛО ЗВЕЗДЫ ПРОКСИМА ЦЕНТАВРА

В табл. 1 планетезимали считались выброшенными, когда они достигли 500 а. е. от звезды. После завершения таких расчетов, когда на эллиптических орбитах ($c < 500$ а. е.) не осталось ни одной планетезимали или когда рассматриваемый интервал времени достиг нескольких сотен миллионов лет (минимум 100 млн лет), было рассчитано время dt , за которое планетезимали, увеличивали свои максимальные расстояния от звезды с 500 до 1200 а. е. Значения доли планетезималей, соответствующих некоторым интервалам dt , для дисков с разными значениями a_{\min} и e_0 представлены в табл. 8–10. Большинство планетезималей (>84% при $e_0 = 0.02$ и >89% при $e_0 = 0.15$) увеличивали максимальные расстояния от звезды с 500 до 1200 а. е. за время dt менее 1 млн лет. В табл. 8–9

Таблица 4. Распределение планетезималей, впервые достигших 1200 а. е. от звезды, по интервалам эксцентриситетов (e_n, e_x) их орбит при e_0 , равном 0.02 или 0.15, и нескольких значениях a_{\min} от 1.1 до 2.2 а. е., приведенных в первом столбце таблицы

a_{\min} , а. е.	e_0	k_c	N_{4-6}	N_{6-8}	N_{8-10}	N_{002}	N_{005}	N_{01}	N_{11}	$N_{>11}$	N_s	e_{\min}	e_{\max}
$e_n =$ $e_x =$			0.994 0.996	0.996 0.998	0.998 1.0	1.0 1.002	1.002 1.005	1.005 1.01	1.01 1.1	1.1 —			
1.2	0.02	1	0	27	29	11	13	2	3	0	85	0.996	1.083
1.3	0.02	1	0	27	55	14	9	7	2	0	114	0.996	1.024
1.4	0.02	1	0	32	34	21	15	8	6	1	117	0.997	1.136
1.5	0.02	1	1	40	46	14	10	4	4	0	119	0.996	1.023
1.6	0.02	1	1	40	37	15	11	3	1	1	109	0.996	1.242
1.7	0.02	1	5	59	45	14	9	4	7	0	143	0.995	1.017
Σ_n	0.02	1	7	225	246	89	67	28	23	2	687		
Σ_f	0.02	1	0.010	0.328	0.358	0.130	0.098	0.041	0.033	0.003	1.0	0.995	1.242
1.1	0.15	1	1	28	36	12	11	1	6	1	96	0.996	1.242
1.2	0.15	1	0	49	50	29	15	8	8	1	160	0.996	1.151
1.3	0.15	1	0	45	63	18	17	9	5	1	158	0.996	1.105
1.4	0.15	1	0	51	68	29	15	10	10	0	183	0.996	1.096
1.5	0.15	1	1	63	56	25	15	7	9	2	178	0.996	1.240
1.5	0.15	1**	0	43	77	19	15	12	10	1	177	0.996	1.127
1.5	0.15	1***	1	44	59	31	20	5	8	4	172	0.996	1.309
1.6	0.15	1	0	51	58	30	28	5	6	2	180	0.996	1.173
1.7	0.15	1	1	49	51	22	16	5	11	1	156	0.995	1.199
1.8	0.15	1	1	54	38	11	9	7	3	1	124	0.996	1.249
1.9	0.15	1	0	38	39	14	12	2	0	0	105	0.996	1.007
2.0	0.15	1	1	89	87	24	21	15	0	0	237	0.996	1.010
2.1	0.15	1	1	87	85	24	14	6	1	1	219	0.996	1.157
2.2	0.15	1	1	32	31	10	4	5	1	0	84	0.996	1.018
Σ_n	0.15	1	8	723	798	298	212	97	78	15	2229		
Σ_f	0.15	1	0.003	0.326	0.357	0.134	0.094	0.045	0.034	0.007	1.0	0.995	1.309
1.4	0.02	0.5	0	34	25	4	2	1	5	0	71	0.997	1.063
1.5	0.02	0.5	0	36	35	4	5	1	4	1	86	0.996	1.173
Σ_n	0.02	0.5	0	70	60	8	7	2	9	1	157		
Σ_f	0.02	0.5	0	0.446	0.382	0.051	0.045	0.013	0.057	0.006	1.0	0.996	1.173
1.4	0.15	0.5	0	52	46	12	2	4	11	1	128	0.997	1.102
1.5	0.15	0.5	0	51	64	22	18	3	6	1	165	0.996	1.245
Σ_n	0.15	0.5	0	103	110	34	20	7	17	2	293		
Σ_f	0.15	0.5	0	0.352	0.375	0.116	0.068	0.024	0.058	0.007	1.0	0.996	1.245
1.4	0.02	0.1	0	3	4	1	0	0	0	1	9	0.997	2.154
Σ_f	0.02	0.1	0	0.33	0.44	0.11	0	0	0	0.11	1.0	0.997	2.154
1.4	0.15	0.1	0	11	10	4	4	2	1	3	35	0.997	1.581
Σ_f	0.15	0.1	0	0.314	0.286	0.114	0.114	0.057	0.029	0.086	1.0	0.997	1.581

Примечания: $N_{4-6}, N_{8-10}, N_{002}, N_{005}, N_{01}, N_{11}, N_{>11}$ — это число планетезималей, эксцентриситеты орбит которых находятся в интервалах (e_n, e_x) от 0.994 до 0.996, от 0.996 до 0.998, от 0.998 до 1.0, от 1.0 до 1.002, от 1.002 до 1.005, от 1.005 до 1.01, от 1.01 до 1.1 и больше 1.1 соответственно. N_s — это общее число планетезималей, достигших 1200 а. е. от звезды. e_{\min} и e_{\max} — минимальные и максимальные эксцентриситеты орбит. В каждом варианте расчетов в начальный момент времени рассматривалось 250 планетезималей с большими полуосями орбит от a_{\min} до $a_{\min} + 0.1$ а. е., эксцентриситетами и наклонениями, равными e_0 и $e_0/2$ рад соответственно. Масса планеты на орбите планеты s равнялась $7k_s m_E$. Σ_n — это сумма чисел планетезималей в столбце для вариантов, приведенных выше. $\Sigma_f = \Sigma_n / N_s$. Число $N_{<4}$ планетезималей с эксцентриситетами орбит, меньшими 0.994, равно нулю во всех рассмотренных вариантах табл. 4.

Таблица 5. Распределение планетезималей, впервые достигших 500 а. е. от звезды, по интервалам наклонов (i_n, i_x) их орбит при e_0 , равном 0.02 или 0.15, и нескольких значениях a_{\min} от 1.1 до 2.2 а. е., приведенных в первом столбце таблицы

a_{\min} , а. е.	e_0	k_c	N_2	N_4	N_6	N_8	N_{10}	N_{15}	N_{20}	$N_{>20}$	N_s	i_{\min}	i_{\max}
$i_n =$			0	2°	4°	6°	8°	10°	15°	20°			
$i_x =$			2°	4°	6°	8°	10°	15°	20°	—			
1.1	0.02	1	2	2	2	2	0	0	0	0	8	1.86	7.76
1.2	0.02	1	14	20	24	13	6	6	2	0	85	0.22	19.6
1.3	0.02	1	19	24	24	24	12	11	0	0	114	0.34	14.1
1.4	0.02	1	16	33	26	28	6	9	1	1	120	0.51	22.1
1.4	0.02	1*	16	20	29	12	7	8	0	0	92	0.50	14.3
1.4	0.02	1**	10	31	18	17	6	10	1	1	94	0.05	21.8
1.4	0.02	1***	8	27	21	17	5	10	1	0	89	1.03	17.4
1.5	0.02	1	16	23	40	19	9	8	3	1	119	0.31	31.2
1.6	0.02	1	20	37	22	15	7	5	2	1	109	0.40	27.5
1.7	0.02	1	88	29	6	13	4	3	0	0	143	0.16	14.2
1.8	0.02	1	26	3	2	0	0	0	0	0	31	1.08	5.91
Σ_{ni}	0.02	1	235	249	214	160	62	70	10	4	1004		
Σ_{fi}	0.02	1	0.234	0.248	0.213	0.159	0.062	0.07	0.010	0.004	1.0	0.05	31.2
1.0	0.15	1	4	14	11	5	6	1	1	0	42	1.17	18.3
1.1	0.15	1	10	15	22	25	9	11	4	2	98	0.78	22.2
1.2	0.15	1	21	36	38	29	19	14	3	0	160	0.23	17.2
1.3	0.15	1	12	40	37	27	19	15	8	0	158	0.99	19.6
1.3	0.15	1**	25	34	33	27	16	21	5	1	162	0.29	23.6
1.4	0.15	1	19	33	35	30	27	34	4	1	183	0.22	20.4
1.4	0.15	1*	18	38	35	34	21	27	1	2	176	0.06	21.3
1.4	0.15	1**	20	41	34	28	27	24	8	0	182	0.34	18.6
1.4	0.15	1***	14	28	43	32	24	27	5	1	174	0.58	30.0
1.5	0.15	1	18	35	32	34	27	28	3	1	178	0.29	24.7
1.5	0.15	1**	17	32	43	28	25	22	8	2	177	0.46	29.5
1.5	0.15	1***	16	43	33	32	17	22	6	3	172	0.51	26.1
1.6	0.15	1	20	39	43	37	14	21	6	0	180	0.69	19.6
1.7	0.15	1	17	30	37	36	13	18	4	1	156	0.20	23.5
1.8	0.15	1	11	31	27	25	17	11	2	1	125	0.68	20.8
1.9	0.15	1	12	29	27	23	7	6	0	1	105	0.35	21.8
2.0	0.15	1	8	109	87	22	9	3	0	0	238	1.03	11.4
2.1	0.15	1	23	95	55	22	11	8	2	1	217	0.61	21.9
2.2	0.15	1	10	31	25	9	2	0	1	0	78	0.22	19.9
Σ_{ni}	0.15	1	291	739	686	499	304	315	70	17	2919		
Σ_{fi}	0.15	1	0.100	0.253	0.235	0.171	0.104	0.108	0.024	0.006	1.0	0.05	31.2
1.4	0.02	0.5	6	14	20	7	12	9	2	1	71	0.90	21.4
1.5	0.02	0.5	3	19	25	14	10	13	1	1	86	1.35	21.7

Таблица 5. Окончание

a_{\min} , а. е.	e_0	k_c	N_2	N_4	N_6	N_8	N_{10}	N_{15}	N_{20}	$N_{>20}$	N_s	i_{\min}	i_{\max}
Σ_{ni}	0.02	0.5	9	33	45	21	22	22	3	2	157		
Σ_{fi}	0.02	0.5	0.057	0.210	0.287	0.134	0.140	0.140	0.019	0.013	1.0	0.90	21.7
1.4	0.15	0.5	15	28	27	24	13	12	3	5	127	0.14	30.5
1.5	0.15	0.5	13	30	48	28	23	20	3	1	166	0.42	20.7
Σ_{ni}	0.15	0.5	26	58	75	52	36	32	6	6	293		
Σ_{fi}	0.15	0.5	0.089	0.198	0.226	0.177	0.123	0.109	0.020	0.020	1.0	0.14	30.5
1.4	0.02	0.1	1	4	2	1	0	1	0	0	9	0.69	10.3
1.5	0.02	0.1	1	8	3	2	1	0	0	2	17	1.38	11.7
Σ_{ni}	0.02	0.1	2	12	5	3	1	1	0	2	26		
Σ_{fi}	0.02	0.1	0.077	0.462	0.192	0.115	0.038	0.038	0	0.077	1.0	0.69	11.7
1.4	0.15	0.1	10	8	2	3	5	3	0	4	35	0.06	25.3
1.5	0.15	0.1	7	21	8	7	4	5	1	2	55	0.05	39.5
Σ_{ni}	0.15	0.1	17	29	10	10	9	8	1	6	90		
Σ_{fi}	0.15	0.1	0.189	0.322	0.111	0.111	0.1	0.089	0.011	0.067	1.0	0.05	39.5

Примечания: $N_2, N_4, N_6, N_8, N_{10}, N_{15}, N_{20}, N_{>20}$ — это число планетезималей, наклонения орбит которых находятся в интервалах (i_n, i_x) от 0° до 2° , от 2° до 4° , от 4° до 6° , от 6° до 8° , от 8° до 10° , от 10° до 15° , от 15° до 20° , и больше 20° соответственно. N_s — это общее число планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды. i_{\min} и i_{\max} — минимальные и максимальные наклонения орбит в градусах. В каждом варианте расчетов в начальный момент времени рассматривалось 250 планетезималей с большими полюсами орбит от a_{\min} до $a_{\min} + 0.1$ а. е., эксцентриситетами и наклонениями, равными e_0 и $e_0/2$ рад соответственно. Масса планеты на орбите планеты c равнялась $7k_c m_E$. Σ_{ni} — это сумма чисел планетезималей в столбце в приведенных выше вариантах. $\Sigma_{fi} = \Sigma_{ni}/N_s$.

доля планетезималей с $dt < 0.1$ млн лет находилась в интервалах 0.32–0.53 при $e_0 = 0.02$ и 0.43–0.58 при $e_0 = 0.15$, т.е. в среднем эта доля была больше для больших e_0 . Доля планетезималей, увеличивших максимальные расстояния от звезды с 500 до 1200 а. е. за время $dt < 0.01$ млн лет, составила около 0.05–0.2 и 0.2–0.3 при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно. Для $dt > 2$ млн лет эта доля находилась в интервалах 0.05–0.08 и 0.01–0.06 при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно. Максимальное значение dt , обозначенное как dt_{\max} , в рассмотренных вариантах расчетов с 250 планетезималами находилось в интервале от 3 до 60 млн лет. Большинство расчетов, представленных в табл. 8–10, были выполнены с шагом интегрирования по времени $t_s = 1$ сут. При $a_{\min} = 1.5$ а. е. и $e_0 = 0.15$ в табл. 9 приведены также результаты расчетов с t_s , равными 0.5 и 2 сут. Разница в результатах, представленных в табл. 9 и полученных при разных значениях t_s , примерно такая же, как разница между результатами, полученными для разных значений a_{\min} при одном и том же t_s . Поэтому расчеты с $t_s = 1$ сут. можно использовать для изучения времени, в течение которого максимальные расстояния планетезималей от звезды увеличивались с 500 до 1200 а. е.

В табл. 10 приведены доли планетезималей, увеличивших максимальные расстояния от звезды с 500 до 1200 а. е., для современной массы планеты c ($k_c = 1$), а также для случая, когда отношение k_c массы меньшей планеты к массе планеты c равно 0.5 (орбиты обеих планет были одинаковыми). При $k_c = 0.5$ характерное время dt , за которое максимальное расстояние планетезимали от звезды увеличивалось с 500 до 1200 а. е., было больше, чем при $k_c = 1$. В частности, при a_{\min} , равном 1.4 и 1.5 а. е., доля планетезималей с $dt < 0.1$ млн лет составляла 0.23–0.28 при $k_c = 0.5$ и 0.46–0.52 при $k_c = 1$.

Большая часть (часто до 90%) планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды, при $k_c = 1$ достигла этого расстояния за время, меньшее 10 млн лет. Большая часть выброса планетезималей после 10 млн лет была только в вариантах расчетов с $a_{\min} = 1.8$ а. е. и $e_0 = 0.02$, а также при $e_0 = 0.15$ и $a_{\min} = 2.1$ а. е. или $a_{\min} = 2.2$ а. е., т.е. для планетезималей из внешней части зоны питания планеты. Для современной массы планеты Проксима Центавра с около 90% планетезималей, увеличивших максимальные расстояния от звезды с 500 до 1200 а. е., увеличили это расстояние менее чем за 1 млн лет. При суммарной массе выброшенного

Таблица 6. Распределение планетезималей, впервые достигших 1200 а. е. от звезды, по интервалам наклонений (i_n, i_x) их орбит при e_0 , равном 0.02 или 0.15, и нескольких значениях a_{\min} от 1.1 до 2.2 а. е., приведенных в первом столбце таблицы

a_{\min} , а. е.	e_0	k_c	N_2	N_4	N_6	N_8	N_{10}	N_{15}	N_{20}	$N_{>20}$	N_s	i_{\min}	i_{\max}
$i_n =$			0	2°	4°	6°	8°	10°	15°	20°			
$i_x =$			2°	4°	6°	8°	10°	15°	20°	—			
1.2	0.02	1	14	19	23	16	4	5	3	1	85	0.19	21.2
1.3	0.02	1	21	25	25	17	15	10	1	0	114	0.30	16.5
1.4	0.02	1	16	32	26	22	7	12	0	2	117	0.47	24.9
1.5	0.02	1	17	23	37	22	11	4	4	1	119	0.31	30.6
1.6	0.02	1	20	36	21	13	8	7	1	3	109	0.45	27.1
1.7	0.02	1	85	30	7	14	4	2	1	0	143	0.16	17.1
Σ_{ni}	0.02	1	173	165	139	104	49	40	10	7	687		
Σ_{fi}	0.02	1	0.252	0.240	0.202	0.151	0.071	0.058	0.015	0.010	1.0	0.16	30.6
1.1	0.15	1	8	18	22	19	11	12	4	2	96	0.85	21.0
1.2	0.15	1	20	36	39	30	17	15	3	0	160	0.24	17.5
1.3	0.15	1	14	34	38	32	16	17	6	1	158	0.98	20.8
1.4	0.15	1	19	31	32	30	37	25	9	0	183	0.22	18.8
1.5	0.15	1	19	32	35	37	22	26	4	3	178	0.26	27.6
1.5	0.15	1**	15	37	36	31	29	19	9	1	177	0.46	34.4
1.5	0.15	1***	16	42	35	29	22	20	5	3	172	0.56	28.5
1.6	0.15	1	18	38	52	27	21	17	5	2	180	0.66	22.4
1.7	0.15	1	18	32	37	31	15	19	3	1	156	0.21	21.0
1.8	0.15	1	11	30	20	28	15	15	2	3	124	0.66	179
1.9	0.15	1	12	27	29	21	10	5	0	1	105	0.337	22.0
2.0	0.15	1	7	109	84	24	10	3	0	0	237	1.101	11.4
2.1	0.15	1	22	86	64	24	12	7	3	1	219	0.535	48.8
2.2	0.15	1	13	33	22	11	3	1	1	0	84	0.23	17.4
Σ_{ni}	0.15	1	212	615	545	374	240	201	54	18	2229		
Σ_{fi}	0.15	1	0.095	0.276	0.245	0.168	0.108	0.090	0.024	0.008	1.0	0.21	179
1.4	0.02	0.5	7	11	19	10	9	11	3	1	71	0.87	23.2
1.5	0.02	0.5	4	19	25	14	8	13	2	1	86	1.28	24.1
Σ_{ni}	0.02	0.5	11	30	44	24	17	24	5	2	157		
Σ_{fi}	0.02	0.5	0.070	0.191	0.280	0.153	0.108	0.153	0.032	0.013	1.0	0.87	24.1
1.4	0.15	0.5	15	26	27	28	9	15	4	4	128	0.13	26.5
1.5	0.15	0.5	12	32	47	27	23	17	5	2	165	0.41	20.9
Σ_{ni}	0.15	0.5	27	58	74	55	32	32	9	6	293	0.13	26.5
Σ_{fi}	0.15	0.5	0.092	0.198	0.253	0.188	0.109	0.109	0.031	0.020	1.0	0.13	26.5
1.4	0.02	0.1	3	2	2	1	1	0	0	0	9	0.29	9.51
Σ_{fi}	0.02	0.1	0.33	0.22	0.22	0.11	0.11	0	0	0	1.0		
1.4	0.15	0.1	9	7	3	5	6	1	0	4	35	0.07	175
Σ_{fi}	0.15	0.1	0.26	0.2	0.086	0.143	0.171	0.029	0	0.114	1.0	0.07	175

Примечания: $N_2, N_4, N_6, N_8, N_{10}, N_{15}, N_{20}, N_{>20}$ — это число планетезималей, наклонения орбит которых находятся в интервалах (i_n, i_x) от 0° до 2°, от 2° до 4°, от 4° до 6°, от 6° до 8°, от 8° до 10°, от 10° до 15°, от 15° до 20°, и больше 20° соответственно. N_s — это общее число планетезималей, достигших 1200 а. е. от звезды. i_{\min} и i_{\max} — минимальные и максимальные наклонения орбит в градусах. В каждом варианте расчетов в начальный момент времени рассматривалось 250 планетезималей с большими полуосями орбит от a_{\min} до $a_{\min} + 0.1$ а. е., эксцентриситетами и наклонениями, равными e_0 и $e_0/2$ рад соответственно. Масса планеты на орбите планеты c равнялась $7k_c m_E$. Σ_{ni} — это сумма чисел планетезималей в столбце в приведенных выше вариантах. $\Sigma_{fi} = \Sigma_{ni}/N_s$.

Таблица 7. Доля планетезималей с наклонениями орбит, большими 10° , среди всех планетезималей, впервые достигших расстояния от звезды, равного a_{lim}

a_{lim} , а. е.	500	500	500	1200	1200	1200
k_c	1	0.5	0.1	1	0.5	0.1
$E_0 = 0.02$	0.08	0.17	0.11	0.08	0.20	0
$e_0 = 0.15$	0.14	0.15	0.17	0.12	0.16	0.14

Таблица 8. Доля планетезималей, увеличивших максимальные расстояния от звезды с 500 до 1200 а. е. за интервал времени dt , для вариантов расчетов с разными значениями a_{min} при $e_0 = 0.02$ и $t_s = 1$ сут

a_{min} , а. е.	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
$dt < 0.01$ млн лет	0.188	0.096	0.143	0.109	0.046	0.098
$dt < 0.1$ млн лет	0.529	0.333	0.487	0.487	0.321	0.371
$0.1 \leq dt < 1$ млн лет	0.307	0.492	0.429	0.353	0.578	0.503
$1 \leq dt < 2$ млн лет	0.082	0.114	0.0	0.084	0.046	0.077
$dt > 2$ млн лет	0.082	0.061	0.084	0.076	0.055	0.049
$dt > 5$ млн лет	0.035	0.026	0.017	0.034	0.018	0.028
$dt > 10$ млн лет	0.012	0.017	0	0.025	0.018	0.007
dt_{max} , млн лет	59.76	23.48	5.12	18.80	24.56	11.52

Примечание: dt_{max} — это максимальное значение dt .

за 10 млн лет вещества, равного $5m_E$, и характерном времени увеличения максимального расстояния планетезимали от звезды с 500 до 1200 а. е., равном 1 млн лет, примерная суммарная масса планетезималей на расстоянии от 500 до 1200 а. е. равна $0.5m_E$. Время движения таких планетезималей на расстоянии от звезды, меньшем 500 а. е., в среднем меньше времени их движения на расстоянии от 500 до 1200 а. е. Учет этого движения немного уменьшает оценку массы вещества в зоне от 500 до 1200 а. е. После основной очистки зоны питания планеты c от планетезималей, число планетезималей на расстоянии 500–1200 а. е. было гораздо меньше, чем при аккумуляции планеты c .

Какое-то время выброс планетезималей мог происходить из внешней части зоны питания планеты c . Отдельные планетезимали могли выбрасываться из этой части зоны и через сотни миллионов лет. В рамках рассмотренной модели (рассматривавшей только миграцию планетезималей из зоны питания планеты c) через десятки миллионов лет зона от 500 до 1200 а. е. от звезды становилась практически пустой.

Из-за взаимных гравитационных взаимодействий и столкновений какая-то часть планетезималей могла увеличить перигелийные расстояния своих орбит и в дальнейшем почти не менять свои орбиты из-за взаимодействий с планетой c . Эти

Таблица 9. Доля планетезималей, увеличивших максимальные расстояния от звезды с 500 до 1200 а. е. за интервал времени dt , для дисков с разными значениями a_{min} и t_s при $e_0 = 0.15$

a_{min} , а. е.	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7
t_s , сут	1	1	1	0.5	1	2	1	1
$dt < 0.01$ млн лет	0.181	0.234	0.213	0.237	0.219	0.273	0.233	0.212
$dt < 0.1$ млн лет	0.456	0.538	0.519	0.458	0.545	0.430	0.578	0.436
$0.1 \leq dt < 1$ млн лет	0.45	0.392	0.443	0.497	0.343	0.518	0.394	0.481
$1 \leq dt < 2$ млн лет	0.063	0.051	0.027	0.028	0.056	0.017	0.011	0.045
$dt > 2$ млн лет	0.031	0.019	0.011	0.011	0.056	0.035	0.017	0.038
$dt > 5$ млн лет	0.006	0.006	0	0	0.0225	0.017	0.006	0.013
$dt > 10$ млн лет	0	0	0	0	0.0112	0.0116	0.006	0.006
dt_{max} , млн лет	5.66	6.71	3.639	3.15	29.36	11.47	10.78	17.5

Примечание: dt_{max} — это максимальное значение dt .

Таблица 10. Доля планетезималей, увеличивших максимальные расстояния от звезды с 500 до 1200 а. е. за интервал времени dt , для дисков с разными значениями a_{\min} , e_0 и отношения k_c массы планеты к современной массе планеты c

a_{\min} , а. е.	1.2–1.7	1.2–1.7	1.2–1.7	1.4	1.5	1.4	1.5
e_0	0.02	0.15	0.15	0.02	0.02	0.15	0.15
k_c	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
t_s , сут	1	1	0.5–2	1	1	1	1
$dt < 0.01$ млн лет	0.113	0.215	0.225	0.114	0.072	0.134	0.108
$dt < 0.1$ млн лет	0.421	0.520	0.501	0.229	0.229	0.276	0.265
$0.1 \leq dt < 1$ млн лет	0.444	0.417	0.440	0.514	0.494	0.519	0.476
$1 \leq dt < 2$ млн лет	0.067	0.042	0.037	0.086	0.120	0.079	0.132
$dt > 2$ млн лет	0.068	0.029	0.027	0.171	0.157	0.126	0.127
$dt > 5$ млн лет	0.026	0.009	0.009	0.057	0.060	0.063	0.054
$dt > 10$ млн лет	0.013	0.004	0.004	0.014	0.012	0.024	0.024
dt_{\max} , млн лет	59.76	29.36	29.36	21.54	31.41	18.36	51.20

Примечание: dt_{\max} – это максимальное значение dt . Для столбцов 1.2–1.7 значения долей представляют собой средние значения при a_{\min} от 1.2 до 1.7 а. е.

планетезимали могли образовать маломассивный аналог облака Хиллса. Не исключено, что за орбитой планеты c на стадии образования планет было много планетезималей, образовавшихся из части газопылевого диска. Взаимодействия планетезималей из зоны питания планеты c , двигавшихся по сильно эксцентричным орбитам, с планетезималами, образовавшимися за пределами зоны питания планеты c , могли увеличивать приток тел в аналог облака Хиллса.

В настоящее время область между 500 и 1200 а. е., вероятно, может быть почти пустой, если учитывать ее пополнение только за счет планетезималей из зоны питания планеты c . Планетезимали, выброшенные из зоны питания планеты c , имели сравнительно небольшие наклоны орбит. Даже сталкиваясь и гравитационно взаимодействуя друг с другом, они не могли значительно увеличить среднее наклонение своих орбит. Большие наклоны орбит тел могут быть в основном у тел, пришедших извне в сферу Хилла звезды Проксима Центавра. Радиус сферы Хилла звезды Проксима Центавра на порядок меньше радиуса внешней границы облака Хиллса в Солнечной системе и на два порядка меньше радиуса сферы Хилла Солнца. Поэтому трудно ожидать существования у этой звезды столь же массивного аналога облака Оорта, как у Солнца. В статьях (Levison и др., 2010; Siraj, Loeb, 2021) считается, что в Солнечной системе большинство тел в облаке Оорта имеют внесолнечное происхождение. Нам кажется маловероятным захват тел, пришедших из окрестностей других звезд, звездой Проксима Центавра с ее относительно небольшой сферой Хилла.

Результаты проведенных расчетов (в частности, распределение орбит планетезималей во внешней части сферы Хилла по их наклонениям и эксцентриситетам) могут использоваться в качестве начальных данных для моделей, учитывающих гравитационные взаимодействия и столкновения планетезималей, приводящие к формированию аналога облака Хиллса для звезды Проксима Центавра. Эти результаты могут быть использованы также в качестве начальных данных в моделях, учитывающих гравитационное влияние соседней пары звезд, для оценок этого влияния на эволюцию орбит планетезималей во внешней части сферы Хилла и возможности возвращения отдельных выброшенных планетезималей обратно в сферу Хилла, но уже с более наклоненными орбитами вокруг звезды Проксима Центавра.

Аналогов астероидного и транснептунового поясов у звезды Проксима Центавра может быть больше, чем у Солнечной системы. Меньшее отношение массы планеты c к массе звезды, чем у Юпитера, большее отношение больших полуосей орбит планет c и b , чем у Юпитера и Марса, и только одна крупная планета в системе Проксима Центавра могут быть причинами таких различий в поясах.

ВЫВОДЫ

Рассматривалось движение планетезималей, первоначально находившихся в зоне питания планеты Проксима Центавра c , на расстояниях от звезды от 500 до 1200 а. е. Последнее расстояние соответствует радиусу сферы Хилла звезды. При интегрировании уравнений движения планетези-

малей учитывалось гравитационное влияние звезды и планет b и c и столкновения планетезималей с планетами и звездой. Большинство планетезималей из большей части зоны питания почти сформировавшейся планеты c впервые достигли 500 а. е. от звезды в течение первых 10 млн лет. Только для планетезималей, первоначально находившихся на краях зоны питания планеты, доля планетезималей, впервые достигших 500 а. е. за время, большее 10 млн лет, была больше половины. Отдельные планетезимали могли впервые достигать внешней части сферы Хилла звезды и через сотни миллионов лет.

Около 90% планетезималей, впервые достигших 500 а. е. от звезды Проксима Центавра, впервые достигли 1200 а. е. от звезды менее, чем за 1 млн лет, при современной массе планеты c . При этом не более 2% планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды, имели афелийные расстояния орбит между 500 и 1200 а. е. в течение более 10 млн лет (но менее нескольких десятков миллионов лет). При массе планеты, равной половине массы планеты c , доля планетезималей, увеличивших свое максимальное удаление от звезды с 500 до 1200 а. е. менее, чем за 1 млн лет, была около 70–80%.

При современной массе планеты c среди планетезималей, впервые достигших 500 а. е. от звезды, доля планетезималей с эксцентриситетами орбит, большими 1, равнялась 0.05 и 0.1 при начальных эксцентриситетах их орбит $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ соответственно. Среди планетезималей, впервые достигших 1200 а. е. от звезды, эта доля была около 0.3 при обоих значениях e_0 . Минимальные значения эксцентриситета орбит планетезималей, достигших 500 и 1200 а. е., равнялись 0.992 и 0.995 соответственно. Распределение планетезималей, достигших 500 а. е. от звезды, по эксцентриситетам их орбит не сильно отличалось в различные моменты аккумуляции планеты c (при различных значениях массы растущей планеты).

В рассмотренной модели во внешней части сферы Хилла диск планетезималей был довольно плоским. Наклонения i орбит более 80% планетезималей, впервые достигших 500 или 1200 а. е. от звезды, не превышали 10° . Доля таких планетезималей с $i > 20^\circ$ в большинстве серий расчетов не превышала 2%. При современной массе планеты c в среднем по всем вариантам расчетов эта доля не превышала 1%.

Движение планетезималей рассматривалось внутри (преимущественно в глубине) сферы Хилла звезды Проксима Центавра, а выброшенные планетезимали имели очень мало шансов вернуться в сферу Хилла звезды. Поэтому, вероятно, учет гравитационного влияния звездной двойной системы (Альфа Центавра АВ) не изменит выводов, сделанных в данной работе. Сильно наклоненные орбиты тел во внешней части сферы Хилла звезды

Проксима Центавра могут иметь место только в основном за счет тел, пришедших в сферу Хилла извне.

Полученные результаты могут быть интересны для понимания движения тел в некоторых других экзопланетных системах, особенно в системах с одной доминирующей планетой. Они могут быть использованы для задания исходных данных для моделей эволюции диска тела во внешней части сферы Хилла звезды Проксима Центавра, которые учитывают гравитационные взаимодействия и столкновения тел между собой, а также влияние других звезд.

Радиус сферы Хилла звезды Проксима Центавра на порядок меньше радиуса внешней границы облака Хилса в Солнечной системе и на два порядка меньше радиуса сферы Хилла Солнца. Поэтому трудно ожидать существования у этой звезды столь же массивного аналога облака Оорта, как у Солнца.

Автор выражает глубокую признательность рецензенту за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Работа была выполнена в рамках госзадания ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Емельяненко В.В.* Новые проблемы динамики и происхождения комет после космической миссии “Rosetta” // *Астрон. вестн.* 2018. Т. 52. С. 391–401. (*Emel'yanenko V.V.* Dynamics and origin of comets: new problems appeared after the Rosetta space mission // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. P. 382–391.) <https://doi.org/10.1134/S0038094618050039>.
- Ипатов С.И.* Миграция планетезималей на последних стадиях аккумуляции планет-гигантов // *Астрон. вестн.* 1989а. Т. 23. № 1. С. 27–38. (*Ipatov S.I.* Planetary migration during the last stages of accumulation of the giant planets // *Sol. Syst. Res.* 1989а. V. 23. № 1. P. 16–23.).
- Ипатов С.И.* Эволюция эксцентриситетов орбит планетезималей при формировании планет-гигантов // *Астрон. вестн.* 1989б. Т. 23. № 3. С. 197–206. (*Ipatov S.I.* Evolution of the orbital eccentricities of planetesimals during formation of the giant planets // *Sol. Syst. Res.* 1989b. V. 23. № 3. P. 119–125.)
- Ипатов С.И.* Эволюция орбит растущих зародышей планет-гигантов, первоначально двигавшихся по сильно эксцентричным орбитам // *Письма в Астрон. журн.* 1991. Т. 17. № 3. С. 269–281.
- Ипатов С.И.* Миграция тел в процессе аккумуляции планет // *Астрон. вестн.* 1993. Т. 27. № 1. С. 83–101. (*Ipatov S.I.* Migration of bodies in the accretion of planets // *Sol. Syst. Res.* 1993. V. 27. № 1. P. 65–79. https://www.academia.edu/44448077/Migration_of_bodies_in_the_accretion_of_planets.)
- Ипатов С.И.* Миграция небесных тел в Солнечной системе. Изд-во УРСС, 2000. 320 с. (также Изд. стереотип. URSS. 2021. 320 с.)

- <https://doi.org/10.17513/np.451>.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=46237738>.
- Ипатов С.И.* Устойчивые орбиты в зоне питания планеты Проксима Центавра с // *Астрон. вестн.* 2023. Т. 57. № 3. С. 248–261.
<https://doi.org/10.31857/S0320930X23030039>
(Ipatov S.I. Stable orbits in the feeding zone of planet Proxima Centauri c // *Sol. Syst. Res.* 2023. V. 57. № 3. P. 236–248.)
- Маров М.Я., Ипатов С.И.* Процессы миграции в Солнечной системе и их роль в эволюции Земли и планет // *Успехи физ. наук.* 2023. Т. 193. № 1. С. 2–32.
<https://doi.org/10.3367/UFN.2021.08.039044>
- Маров М.Я., Шевченко И.И.* Экзопланеты: природа и модели // *Успехи физ. наук.* 2020. Т. 190. № 9. С. 897–932.
<https://doi.org/10.3367/UFN.2019.10.038673>.
- Маров М.Я., Шевченко И.И.* Экзопланеты. Физика, Динамика, Космогония. М.: Физматлит, 2022. 192 с.
- Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
- Чеботарев Г.А.* Динамические пределы Солнечной системы // *Астрон. журн.* 1964. Т. 41. № 5. С. 983–989.
- 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.
- Brasser R., Duncan M.J., Levison H.F.* Embedded star clusters and the formation of the Oort cloud // *Icarus.* 2006. V. 184. P. 59–82.
- Brasser R., Higuchi A., Kaib N.* Oort cloud formation at various galactic distances // *Astron. and Astrophys.* 2010. V. 516. id. 72 (12 p.).
- Clement M.S., Kaib N.A., Raymond S.N., Walsh K.J.* Mars' growth stunted by an early giant planet instability // *Icarus.* 2018. V. 311. P. 340–356.
- Clement M.S., Kaib N.A., Raymond S.N., Chambers J.E., Walsh K.J.* The early instability scenario: Terrestrial planet formation during the giant planet instability, and the effect of collisional fragmentation // *Icarus.* 2019. V. 321. P. 778–790.
- Dones L., Weissman P.R., Levison H.F., Duncan M.J.* Oort Cloud formation and dynamics // *Comets II* / Eds: Featou M.C., Keller K.U., Weaver H.A. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 2004. P. 153–174.
- Dones L., Brasser R., Kaib N., Rickman H.* Origin and evolution of the cometary reservoirs // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 197. P. 191–269.
- Duncan M., Quinn T., Tremaine S.* The formation and extent of the Solar System comet cloud // *Astron. J.* 1987. V. 94. P. 1330–1338.
- Dybczynski P.A., Leto G., Jakubik M., Paulech T., Neslušán L.* The simulation of the outer Oort cloud formation. The first giga-year of the evolution // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 487. P. 345–355.
- Emel'yanenko V.V., Asher D.J., Bailey M.E.* Centaurs from the Oort cloud and the origin of Jupiter-family comets // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2005. V. 361. P. 1345–1351.
- Emel'yanenko V.V., Asher D.J., Bailey M.E.* The fundamental role of the Oort cloud in determining the flux of comets through the planetary system // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2007. V. 381. P. 779–789.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12269.x>
- Emel'yanenko V.V., Asher D.J., Bailey M.E.* A model for the common origin of Jupiter family and Halley type comets // *Earth, Moon, and Planets.* 2013. V. 110. P. 105–130.
<https://doi.org/10.1007/s11038-012-9413-z>
- Fernandez J.A., Brunini A.* The buildup of a tightly bound comet cloud around an early Sun immersed in a dense Galactic environment: Numerical experiments // *Icarus.* 2000. V. 145. P. 580–590.
- Fouchard M., Emel'yanenko V., Higuchi A.* Long-period comets as a tracer of the Oort cloud structure // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2020. V. 132. id 43 (22 p.)
- Frantseva K., Nesvorný D., Mueller M., van der Tak F.F.S., ten Kate I.L., Pokorný P.* Exogenous delivery of water to Mercury // *Icarus.* 2022. V. 383. id. 114980 (11 p.).
- Gomes R., Levison H.F., Tsiganis K., Morbidelli A.* Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets // *Nature.* 2005. V. 435. № 7041. P. 466–469.
- Hills J.G.* Comet showers and the steady-state infall of comets from the Oort cloud // *Astron. J.* 1981. V. 86. P. 1730–1740.
- Ipatov S.I.* Accumulation and migration of the bodies from the zones of giant planets // *Earth, Moon, and Planets.* 1987. V. 39. № 2. P. 101–128.
<http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1987EM%26P...39..101I>.
- Ipatov S.I.* Possible migration of the giant planets embryos // 22nd Lunar and Planet. Sci. Conf. 1991. P. 607–608.
<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1991LPI....22..607I>.
- Ipatov S.I.* Migration of planetesimals from beyond Mars' orbit to the Earth // 14th Europlanet Sci. Congress 2020. EPSC2020-71.
<https://doi.org/10.5194/epsc2020-71>
- Ipatov S.I.* Delivery of water and volatiles to planets in the habitable zone in the Proxima Centauri system // Abstracts of the AASTCS Habitable Worlds 2021 Workshop (22–26 February 2021, a virtual conference). Open Engagement Abstracts, Bull. Am. Astron. Soc. 2021. V. 53. № 3. e-id 2021n3i1126 (5 p.)
<https://baas.aas.org/pub/2021n3i1126/release/2>.
- Ipatov S.I.* Scattering of planetesimals from the feeding zone of Proxima Centauri c // Thirteenth Moscow Solar System Symp. (13M-S3) (October 10–14, 2022, Moscow, the Space Research Institute). 13MS3-EP-08. P. 372–374.
<https://doi.org/10.21046/13MS3-2022.2022>
- Ipatov S.I.* Delivery of icy planetesimals to inner planets in the Proxima Centauri planetary system // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2023. V. 58. P. 752–774.
<https://doi.org/10.1111/maps.13985>
- Lambrechts M., Johansen A.* Rapid growth of gas-giant cores by pebble accretion // *Astron. and Astrophys.* 2012. V. 544. id. A32 (13 p.).
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219127>
- Lambrechts M., Johansen A.* Forming the cores of giant planets from the radial pebble flux in protoplanetary discs // *Astron. and Astrophys.* 2014. V. 572. id. A107 (12 p.).
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424343>.

- Levison H.F., Duncan M.J.* The long-term dynamical behavior of short-period comets // *Icarus*. 1994. V. 108. P. 18–36.
- Levison H.F., Duncan M.J., Brasser R., Kaufmann D.F.* Capture of the Sun's Oort cloud from stars in its birth cluster // *Science*. 2010. V. 329. P. 187–190.
- 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.
- Morbidelli A.* Origin and dynamical evolution of comets and their reservoirs // arXiv:astro-ph/0512256. 2005. 86 p.
- Morbidelli A.* Planet formation by pebble accretion in ringed disks // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 638. id. A1 (7 p.). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037983>
- Morbidelli A., Levison H.F., Tsiganis K., Gomes R.* Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System // *Nature*. 2005. V. 435. № 7041. P. 462–465.
- Morbidelli A., Brasser R., Gomes R., Levison H.F., Tsiganis K.* Evidence from the asteroid belt for a violent past evolution of Jupiter's orbit // *Astron. J.* 2010. V. 140. P. 1391–1401.
- Morbidelli A., Lambrechts M., Jacobson S., Bitsch B.* The great dichotomy of the Solar System: Small terrestrial embryos and massive giant planet cores // *Icarus*. 2015. V. 258. P. 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.06.003>
- Siraj A., Loeb A.* Interstellar objects outnumber Solar System objects in the Oort cloud // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021. V. 507. P. L16–L18.
- Schwarz R., Bazso A., Georgakarakos N., Loibnegger B., Maindl T.I., Bancelin D., Pilat-Lohinger E., Kislyakova K.G., Dvorak R., Dobbs-Dixon I.* Exocomets in the Proxima Centauri system and their importance for water transport // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 480. P. 3595–3608. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2064>
- Souami D., Cresson J., Biernacki C., Pierret F.* On the local and global properties of the gravitational spheres of influence // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2020. V. 496. P. 4287–4297.
- 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. № 7041. P. 459–461.
- Wahlberg Jansson K., Johansen A.* Formation of pebble-pile planetesimals // *Astron. and Astrophys.* 2014. V. 570. id A47 (11 p.)