

ГРАВИТАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ КАК ВОЗМОЖНЫЙ СЦЕНАРИЙ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЛУНЫ

© 2023 г. А. В. Тутуков^{1,*}, Г. Н. Дремова^{2,**}, В. В. Дремов^{2,***}

¹Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

²Российский федеральный ядерный центр, Снежинск, Челябинская область, Россия

*E-mail: atutukov@inasan.rssi.ru

**E-mail: G.N.Dryomova@mail.ru

***E-mail: V.V.Dryomov@vniitf.ru

Поступила в редакцию 15.06.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Статья посвящена проблеме происхождения Луны. Обсуждаются современные сценарии формирования системы Земля–Луна: одновременное образование Земли и Луны в околосолнечном газопылевом диске; ударное частичное разрушение Земли массивным астероидом; гравитационный захват Луны Землей; разрушение вначале двойной Луны при сближении с Землей с возможным последующим поглощением Землей компонента меньшей массы. Мы предлагаем двухстадийный сценарий гравитационного захвата Луны Землей на ранних стадиях Солнечной системы. На первой стадии, использующей гибридную численную модель в постановках задачи трех тел (Солнце, Земля и Луна) и N -тел, производится поиск и отбор временных орбит Луны вокруг Земли. Используя метод обратного интегрирования в постановке задачи N -тел, оценивается влияние приливных сил на перекачку орбитального момента Луны (P_{orb}^M) относительно Земли в ее собственный момент P_s^M . Как показывает моделирование, действия одних приливных сил не достаточно для захвата Луны Землей в короткой шкале времени ~ 100 лет ($\Delta P_s^M \sim 10^{-6} P_{\text{orb}}^M$). На второй стадии учитывается фактор вязко-диссипативной среды, приводящей к дополнительному “притормаживанию” Луны, за счет, например, столкновений с астероидами и перехода приливной энергии в тепло, что помогает Луне избавиться от избытка кинетической энергии и обрести постоянную орбиту вокруг Земли.

Ключевые слова: происхождение Луны, гипотезы, моделирование, задача трех тел

DOI: 10.31857/S0004629923110117, **EDN:** FZCDAQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные наблюдения и теория свидетельствуют, что планеты — неотъемлемая часть звездного и, как теперь выясняется, межзвездного мира всех галактик [1–6]. Теоретическая оценка их частоты, основанная на распределении двойных звезд по угловым моментам, допускала, что около трети звезд могут иметь планетные системы [1]. Позднее эта оценка была поддержана наблюдательной статистикой более пяти тысяч околозвездных внесолнечных планет [4, 7]. Максимальное число планет в планетной системе регулируется, вероятно, массами планет и следующими из них критериями устойчивости почти круговых планетных орбит.

Наблюдаемое распределение планет по большой полуоси их орбит может быть представлено выражением в дифференциальной форме: $dN = 4d \lg a$, где N — число планет, a — большая

полуось их орбиты [1, 8, 9]. Интересно, что загадка известного правила Тициуса–Боде заключена в этом соотношении, которое свидетельствует о равномерном распределении планет по логарифму большой полуоси или логарифму удельного углового момента. Кстати, распределение двойных звезд по большой полуоси их орбит следует тому же логарифмическому закону [10]. Среднее отношение наблюдаемых орбитальных периодов соседних планет составляет ~ 1.5 , а минимальное — близко к 1.1 [8, 9]. Ясно, что величина среднего отношения определяется условием устойчивости орбит планет с массой порядка массы Юпитера, а минимальное отношение — свидетельство малых масс этих соседних планет. Планеты с неустойчивыми орбитами при взаимодействии с более массивными соседями будут либо поглощены последними, либо станут членами облака Оорта, либо вообще выброшены из своей системы, став свободными объектами Галактики [6]. Планеты

на неустойчивых орбитах могут напрямую сталкиваться между собой. Такие столкновения сейчас, вероятно, уже зарегистрированы наблюдателями [11].

Примечательно, что планеты-гиганты Солнечной системы имеют много спутников, плоскости орбит которых, как правило, близки к экваторам самих планет. Распределение больших спутников Юпитера по большим полуосям их орбит повторяет указанное выше распределение планет по их большим полуосям орбит вокруг своих звезд. Два этих обстоятельства позволяют полагать, что процесс образования систем спутников около больших планет Солнечной системы повторяет в значительной степени сценарий формирования самой Солнечной системы в протопланетном околосолнечном газопылевом диске.

Интересно, что аналог околосолнечного газопылевого диска уже обнаружен [12]. Планета CQ Lupi B с массой $\sim 30M_J$ (M_J — масса Юпитера) демонстрирует присутствие около нее пылевого диска с радиусом $\sim 6R_\odot$ ($R_\odot$ — солнечный радиус). Конечно, масса спутника этой звезды заставляет видеть в нем коричневый карлик — вероятный будущий обладатель своей компактной планетной системы. Но существование аналогичных дисков около планет кажется вполне возможным, а сами диски, можно полагать, будут со временем обнаружены. Будут найдены и спутники внесолнечных планет, хотя обычные эффекты наблюдательной селекции пока исключают их обнаружение [13]. Стоит отметить, что обычному транзитному методу, вероятно, вполне доступно обнаружение близких к своим звездам тесных двойных планет со сравнимыми размерами компонентов по периодическому изменению глубины затмений, вызванному орбитальным вращением пары, или по достоверной переменной асимметрии формы кривой затмений.

Малые внутренние планеты Солнечной системы, близкие к Солнцу, такие как Меркурий и Венера, а также Марс, не имеют больших спутников. Земля и, важно, находящийся на краю Солнечной системы продолжающий формироваться и аккрецировать окружающий астероидный материал, Плутон, имеют по одному большому спутнику, что необычно для планет-гигантов нашей планетной системы. Если самые большие спутники планет-гигантов имеют массы порядка 0.001 от массы самих планет, то для системы Земля—Луна это отношение около 0.01, а для системы Плутон—Харон — 0.1. Очевидно заметное отличие последних двух систем от систем спутников планет-гигантов Солнечной системы. Закономерно возникает вопрос о причинах такого отличия и о возможных сценариях их формирования. Для объяснения причин возникновения Солнечной системы обычно привлекают сценарий Канта и

Лапласа об одновременном образовании Солнца в ходе коллапса вращающегося протосолнечного газопылевого облака и его планет и спутников в протопланетном диске, аккумулирующем избыточный угловой момент [1, 2]. Сегодня известно с десяток сценариев, что отражает существенное углубление наших представлений об эволюции одиночных и двойных звезд различных классов [14].

Для упрощения ориентирования в данной статье предлагаем краткое ее описание. Во Введении формулируется проблема происхождения Луны как часть общей проблемы образования спутников планет и феномена двойных планет. В разделе 2 делается небольшой экскурс в историю изучения вопроса происхождения Луны с кратким анализом состояния современных моделей и теорий, а также ставится акцент на общую проблему двойных планет и рассматривается как иллюстрация нашей системы Земля—Луна, в частности. В разделе 3 излагается постановка задачи в моделях трех и N -тел, а также описывается метод интегрирования. В разделе 4 демонстрируются и обсуждаются полученные результаты. В Заключение кратко подводятся итоги моделирования.

2. ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ—ЛУНА

Луна, ярчайший объект ночного неба Земли, с давних времен привлекала внимание естествоиспытателей. Предметом пристального интереса были и остаются как ее наблюдаемые свойства, так и проблема ее возникновения. Уникальность Луны — единственного спутника планеты земного типа — состоит в самом факте ее существования, что заставляет задуматься о ее происхождении. Ниже будут прокомментированы несколько возможных сценариев, предлагающих разные версии появления спутника Земли.

2.1. Сценарий мегаимпакта

Самый популярный на сегодня сценарий возникновения Луны, как “оторванной” части Земли, имеет, что естественно для астрономии, глубокие исторические корни. Ее автор — дед Чарльза Дарвина, утвердившего идею эволюции в биологии. Английский естествоиспытатель и инженер Эразм Дарвин (1731—1802) в поисках разгадки истории Луны предложил обратить внимание на глобус Земли, где, по его мнению, не достает твердого вещества. Не исключено, предложил Дарвин, что молодая Земля вращалась столь быстро, что часть ее в районе Тихого океана оторвалась от Земли, образовав Луну. Сын Чарльза Дарвина, Георгий, ста годами позже прадеда показал, что приливные силы быстровращаю-

щейся молодой Земли могли со временем отодвинуть Луну от Земли на ее современное место [15, 16]. Таким образом, Дарвины создали первый вариант современного популярного сценария образования спутника Земли.

Много позднее, в 1948 г. Биркгофом и другими [17] этот сценарий был “модернизирован”: они предложили, что роль быстрого вращения молодой Земли мог бы сыграть достаточно большой и быстрый астероид, столкнувшийся с Землей и оторвавший ее часть. Со временем вырванное из Земли вещество сформировало Луну. Возможность самого столкновения — мегаимпакта — следует признать очевидной в рамках аккумуляционного сценария образования планет земного типа Солнечной системы. Такие мегаимпакты могут, в частности, объяснить ненулевые эксцентриситеты и наклоны орбит планет Солнечной системы.

Большой вклад в изучение Луны внесла космическая программа НАСА “Аполлон”, основная цель которой как раз состояла в том, чтобы выяснить, как образовалась Луна. К середине 70-х годов XX века сценарий Дарвина-Биркгофа эволюционировал в теорию мегаимпакта [18], согласно которой объект размером с Марс (так называемая Тейя) сталкивается с Протоземлей, в результате чего образуется сначала диск вокруг Земли, а потом Луна. Расчеты первого поколения 3D гидродинамического моделирования [19] показали возможность образования обедненных железом вращающихся дисков вокруг Земли. В более поздних расчетах [20], моделирующих низкоскоростной касательный удар, удалось воспроизвести наблюдаемый ресурс углового момента системы Земля–Луна, а также массу и объемную плотность реальной Луны. Ударный сценарий становился все более популярным и, наконец, приобрел эпитет “канонический”. Его описанию посвящены обзоры [21, 22].

2.2. “Изотопный кризис”

Несмотря на то, что сценарий мегаимпакта признан наиболее хорошо изученным, в последнее десятилетие он стал предметом острых дискуссий [23] из-за трудностей в объяснении сходства изотопов мантий Луны и Земли. Это выглядело парадоксально на фоне данных химического анализа пород Земли и Луны, которые показали различие в содержании тяжелых элементов, таких как Fe или Ni (их обилие на Земле по сравнению с Луной), а также различие в эндогенном составе летучих соединений (отсутствующих на Луне) [24]. Выявленные различия хорошо встраиваются в сценарий мегаимпакта и захвата, полагая что Луна и Земля образовались из разных по химическому составу объектов. Метеориты с Марса и с родительских тел главного пояса астероидов име-

ют отличный от Земли изотопный состав. Почему тогда Земля и Луна оказались “изотопически неразличимы”, например, по содержанию изотопов O_2 и W, а также ряда других литофильных элементов [25]?

Известно, что изотопный состав космических объектов меняется с удалением их от Солнца. Это позволяет предположить, следуя ранним догадкам Си [26], что Земля и Луна образовались в околосолнечном диске как свободные планеты на близких орбитах и были связаны гравитацией в единую систему позднее. Изначальная близость орбит околосолнечных Луны и Земли дает малую величину их относительной скорости, что могло бы обеспечить низкоскоростной касательный мегаимпакт или захват Луны Землей.

Таким образом, разрешение проблемы “изотопного кризиса” потребовало введения дополнительных ограничений, в первую очередь, требование земноподобной Тейи. Постепенно стали вводить разные режимы импактных событий, чтобы лучше обеспечить сходство изотопов Земли и Луны.

2.3. Режимы диффузионной релаксации диска: ко-аккреция, синестии, мультиимпакты

В решении проблемы изотопической тождественности Луны и Земли предлагается сценарий скоростного некасательного удара [27], в результате которого создаются диск и планета, более близкие по химическому составу, чем при “каноническом” мегаимпакте. Основная трудность этого сценария состоит в том, чтобы образовать достаточно массивный диск за одно столкновение.

Режим высокоинтенсивных мегаимпактов, немного превосходящих по энергии “канонический” мегаимпакт, приводит к образованию сильно испаренных “синестий”, когда вращающееся гидростатическое тело выходит за границы своего теплового предела, образуя вязко растекающуюся дискообразную область [28]. В процессе диффузионной релаксации диска происходит перемешивание испаренной фракции протоземной мантии с веществом ударника — Тейи, — начальные составы которых могут отличаться, и изотопный состав выравнивается [29, 30].

Отдельное внимание заслуживает сценарий мультиимпакта, или множественного взаимодействия популяции первичных планетезималей с планетами, обеспечивая рост последних. Динамика макроударов и формирование долунных околоземных роев малых тел, из которых позднее аккрецировала Луна, описываются в модели ко-аккреции, впервые предложенной Рускол [31] на основе идей академика О.Ю. Шмидта. Еще в 40-е годы XX века академик О.Ю. Шмидт сфор-

мулировал эволюционный подход в изучении околосолнечного протопланетного облака, из которого возникли Земля и Луна [32], в противоположность событийному варианту происхождения Луны в результате мегаимпакта. Развивая дальше эти идеи, его ученики, Е.Л. Рускол и В.С. Сафонов, в рамках теории ко-аккреции построили статистическую модель эволюции популяции крупных планетезималей, постепенно истощающихся в результате макроударов, порождающих рой малых тел, из которых позднее аккрецируют спутники, как, например, Луна [33]. Наиболее полные результаты этой теории представлены в работах [34–37], в которых также обсуждаются главные трудности теории ко-аккреции — накопление адекватной массы и углового момента в протопланетном диске.

В другом варианте мультиимпакта, смоделированном Руфу и др. [38], образование Луны в результате серии (более 20) мини-импактов, произведенными менее массивными, чем Тейя, (субмарсианскими) “ударниками”. Каждый такой импакт рождает мини-луну, которая через механизм прилива-отлива мигрирует “наружу”. Все эти мини-луны постепенно “расчищают” себе орбиту от других себе подобных, неизбежно сталкиваясь и слипаясь, формируя современную Луну с составом, близким к составу средней планетезимальной окрестности. Основная проблема этого механизма — низкая эффективность слипания мини-лун [39].

Также делаются попытки разрешения проблемы изотопного сходства в концепции общего газопылевого облака. Его эволюция моделируется методом динамики частиц, позволяющим выделить из кольцеобразных структур диска газопылевые сгущения, интерпретируемые как предвестники систем планета-спутник [40]. В этой же концепции рассматривается сценарий столкновительной эволюции двух газопылевых сгущений, высвобождающей угловой момент, необходимый для формирования системы Земля—Луна [41].

Как уже подчеркивалось, сценарий гравитационного захвата Землей околосолнечной планеты на близкой к Земле орбите также приемлем в решении проблемы изотопного сходства Луны и Земли.

2.4. Сценарий гравитационного захвата Луны

Укажем три фактора, заслуживающих внимание, в отношении уникальности Луны. Во-первых, нужно подчеркнуть соизмеримость масс Земли и Луны, что не характерно для многочисленных спутников планет-гигантов Солнечной системы. Во-вторых, Луна аккумулирует почти 80% углового момента системы Земля—Луна [42].

И еще одной примечательной особенностью Луны является то, что сила притяжения Луны Солнцем почти в два раза превосходит силу притяжения Луны Землей! То есть, фактически, Луна вращается вокруг Солнца, а Земля лишь немного возмущает ее почти круговую околосолнечную орбиту. Все эти обстоятельства приводят к тому, что систему Земля—Луна часто называют двойной планетой.

Названные выше особенности параметров Луны привлекают внимание к сценарию независимого образования Земли и Луны в околосолнечном протопланетном диске с последующим приливным захватом Землей Луны, оказавшейся поблизости, в пределах досягаемости приливных сил Земли [25, 41]. Интересен сценарий гравитационного захвата Солнечной системой Луны и, возможно, других членов Солнечной системы из общегалактического поля свободных астероидов и планет [43].

Захват Луны Землей может быть результатом приливного взаимодействия Земли и Луны в рамках задачи трех тел, имея в качестве третьего тела Солнце, на что указывают современное расстояние между Луной и Землей и почти круговая орбита Луны [16, 44]. Но, не исключено, что такой вариант не реализуется при сближении Земли и Луны в строго динамической постановке этой задачи, и энергия системы Земля—Луна остается положительной. Для сброса остающейся положительной энергии взаимодействия этой системы можно рассмотреть два варианта “антикика”, тормозящего пространственное движение “свободной” Луны относительно Земли. Первый состоит в привлечении приливной диссипации энергии пространственного движения Луны при достаточно близком взаимодействии ее с Землей. Численная величина этого “антикика” может быть оценена при решении задачи трех тел, включающей Солнце, Землю и Луну.

Второй вариант сброса избыточной энергии системы Земля—Луна состоит в предположении, что Луна до сближения с Землей была двойной планетой. Другой компонент, меньшей массы, был Луной потерян, унеся избыток энергии возникшей системы Земля—Луна, как это бывает обычно при гравитационном взаимодействии трех тел [6]. Судьбой потерянного Луной компонента могла стать поглотившая его после освобождения при прямом столкновении Земля. Поглощение планетами своих спутников не следует считать слишком необычным. Такое событие, вероятно, может объяснить чересчур медленное осевое вращение Венеры, необычное положение оси вращения Урана в плоскости его орбиты и, возможно, причину отсутствия спутников у планет земного типа в Солнечной системе. То есть,

например, Венера могла в прошлом поглотить свою Луну и остаться в результате без своего спутника с очень медленным осевым вращением.

Где могла быть исходная одиночная или двойная Луна до встречи с Землей и превращения в спутник Земли? Более вероятным для начальной Луны кажутся исходные орбиты, близкие к орбите растущей в ходе аккреции Земле. Интересно, что акты подобных захватов наблюдаются в настоящее время на примере астероидов [45]. Захват при этом происходил на неустойчивые околоземные орбиты со временем жизни в несколько лет, по происшествии которых астероиды при участии Луны терялись Землей. Еще одно потенциально перспективное местопребывания Луны до встречи с Землей — это точки Лагранжа L_4 и L_5 системы Солнце—Земля. Там недавно были найдены астероиды — Земные Троянцы [46]. Численное моделирование показывает, что в этих областях может сохраниться исходный астероидный материал [6]. Луна могла возникнуть в одной из этих точек и со временем оказаться выбитой из нее случайным астероидом на орбиту, близкую к орбите Земли около Солнца, что облегчило бы ее последующий захват Землей. Возможность гравитационного захвата Землей свободных около-солнечных астероидов подтверждается, например, недавно обнаруженным вторым спутником Земли, астероидом 2020 CD3 [47].

2.5. Проблема двойных планет

Рассмотрим более чем естественный вопрос, почему планеты Солнечной системы за исключением Плутона, вероятно еще не закончившего процесс своего формирования, не имеют спутников с массами, сопоставимыми с массами самих планет? Самый общий вариант ответа причин явной разницы в степени двойственности звезд и планет очевиден. Он состоит в принципиальном отличии механизма формирования звезд (очень глубокий коллапс протозвезды) от механизма образования планет (аккумуляция вещества околозвездного диска). Ясно, что вещество этого диска имеет большой угловой момент и, кажется, это открывает дорогу к образованию двойных планет. Можно в рамках предельно простой модели оценить большую полуось a двойной планеты, образованной в результате консервативной аккумуляции вещества двух соседних узких слоев тонкого околозвездного кеплеровского диска шириной d и массой m каждого слоя около звезды с массой M . Из условия равенства относительного орбитального углового момента этих слоев орбитальному угловому моменту аккумулярованной в ходе аккреции в них двойной планеты следует, что $a/d \approx M/m(d/R)^3$, где R — радиус диска. Для того, чтобы a/d было меньше единицы, что необходи-

мо для гравитационной связанности системы, при наблюдаемом для планетных систем характерном отношении расстояния между планетами к их радиусу орбиты d/R около 0.5 найдем, что масса диска должна быть больше $0.1 M$. Это, вероятно, открывает путь для образования кратных звездных систем в массивных околозвездных дисках. Но массы наблюдаемых планет и протопланетных дисков меньше $0.01 M$. То есть, угловой момент вещества околозвездного диска столь велик, а его масса столь мала, что делает образование двойных планет со сравнимыми массами компонентов за счет консервативной аккумуляции вещества кеплеровского диска невозможным.

Потенциально большие возможности скрыты в приливном взаимодействии Луны и Земли для передачи кинетической энергии и углового момента Луны в энергию и угловой момент вращения Земли за счет их неупругого взаимодействия во время сближений и преходящих фаз существования на квазиустойчивых орбитах, обнаруженных при численном моделировании их гравитационного взаимодействия в рамках задачи трех тел. Простые оценки давно показали, что моментоемкость осевого вращения Земли, оцениваемая из баланса ускорения свободного падения (9.8 м/с^2) и центростремительного ускорения ($\sim 0.0337 \text{ м/с}^2$), в несколько раз превосходит современный орбитальный момент Луны.

Наблюдаемые сейчас вековое удаление Луны от Земли 4 см/год [48] и замедление осевого вращения Земли являются наглядными свидетельствами механизма приливного взаимодействия Луны и Земли. Однако количественный учет этого взаимодействия остается пока сложным [49]. Признавая это удаление вековым, можно найти, что за время жизни Солнца это удаление составит величину порядка современного удаления Луны от Земли. То есть, начальное удаление Луны от Земли могло быть много меньше наблюдаемого сегодня. И, что важно, экстраполяция этого удаления на будущее время жизни Солнца приведет к удвоению наблюдаемого удаления. Но, удвоив свое удаление от Земли, Луна окажется ближе к границе полости Хилла Земли, а ее орбита станет неустойчивой. В результате Земля может потерять Луну еще до окончания эволюции Солнца. Возникает вопрос о ее дальнейшей судьбе. Удалить Луну за пределы Солнечной системы, как это смог бы Юпитер [6], Земля не может из-за своей малой массы и большой глубины потенциальной ямы своей орбиты. Поэтому потерянная Луна либо снова станет спутником Земли, существенно обновив свою орбиту, либо будет поглощена Землей, заметно изменив параметры вращения последней. Простая оценка показывает,

что современного углового момента Земли достаточно для реализации представленного сценария эволюции орбиты Луны. Вопрос об эффективности приливных сил подлежит теперь изучению.

Вероятно, главный источник диссипации углового момента и кинетической энергии протопланетного вещества планет земной группы — взаимодействие твердотельного компонента околосолнечного газопылевого диска с газом. Исходное отношение массы газа к массе пыли в диске достигает ~100, что делает газ потенциально очень эффективным аккумулятором избытков кинетической энергии и углового момента пыли, собираемой гравитацией и аккумуляцией в планеты земной группы. При малых относительных скоростях формирующихся планет земной группы и окружающего их газа в протопланетном газовом диске этот путь избавления от избытка углового момента и кинетической энергии системы Земля—Луна кажется реалистичным [50]. Газовый компонент диска из зоны планет земной группы со временем, очевидно, удаляется, оставляя, в основном, одиночные планеты. Конечно, в этом варианте потери избытков энергии и углового момента формирующихся планет, кажется, остается открытым вопрос о сценарии образования одиночных планет-гигантов Солнечной системы. Напомним, что, как было показано выше, угловой момент газа тонкого диска слишком велик для возникновения в нем планет за счет только гравитации. Вероятный сценарий их образования может быть двухстадийным [51]. Сначала при сопровождении передачи избытка углового момента газовому компоненту диска формируется твердотельное ядро планеты. Газовый компонент околосолнечного диска на далекой холодной периферии Солнечной системы трудноудалим и поэтому аккрецируется массивными твердотельными ядрами планет-гигантов. Проблема удаления избытка углового момента на этой стадии аккреции газа планетами-гигантами, судя по плоской системе окружающих их малых спутников, решается, в основном, путем создания протяженных околосолнечных газовых дисков, аккумулирующих угловой момент молодых планет-гигантов.

2.6. Спутники планет-гигантов

Как уже отмечалось во Введении, планеты-гиганты Солнечной системы имеют много спутников, подсистема которых повторяет, в основном, структуру самой Солнечной системы, что позволяет при поиске сценариев их образования ограничиваться, как правило, традиционным сценарием Канта—Лапласа [52, 53]. Интересно отметить, что распределение спутников планет-гигантов Солнечной системы по большим полуосям a_{moon} их орбит может быть описано в первом

приближении тем же самым соотношением, что приведено во Введении для планет Солнечной системы: $dN = 4d \lg a_{\text{moon}}$ [1]. Это “родство” также является аргументом сценария образования системы спутников планет-гигантов по аналогии с образованием самих планетных систем путем аккумуляции твердых тел в околосолнечном диске [32, 54, 55]. Эта задача решалась неоднократно численно в рамках модели N тел конечных размеров [56–58]. Количество образующихся спутников планеты в рамках этих моделей определялось целиком принятыми начальными размерами диска [56, 58]. При этом компактный диск, вероятно, возникающий при столкновении большого астероида с Землей в рамках ударного сценария Дарвина—Биркгофа [16, 17], быстро за счет столкновительной аккумуляции превращается в Луну. Отсутствие больших спутников у Марса, Венеры и Меркурия в рамках этого сценария можно объяснить отсутствием подходящих ударных астероидов и соответствующих столкновений.

2.7. Двойная планета Плутон—Харон

Двойные астероиды в Солнечной системе хорошо известны [59]. Кроме того, на краю планетной части Солнечной системы имеется двойная планета Плутон—Харон с “иррегулярными” отношением масс компонентов и наклоном орбитальной плоскости системы к плоскости орбит. Примечательно, что эта двойная планета находится в настоящую эпоху на стадии аккумуляционной “сборки”, аккрецируя окружающее ее астероидное вещество пояса Койпера [1]. Примечательно также, что система Плутон—Харон имеет четыре малых спутника с ретроградными орбитами [60]. Отношение масс основных компонентов этой системы — девять, а расстояние между ними около 20 000 км [2].

Двойственность Плутона есть надежное свидетельство того, что на стадии роста больших планет они могут проходить стадию двойных планет, аккумулирующих избыточный угловой момент. Современная масса Плутона в пять раз меньше массы Луны и только в девять раз больше массы Харона [2]. Само существование системы Плутон—Харон подтверждает допустимость предположения о возможной двойственности начальной Луны, еще свободной от Земли. И, кроме того, существование двойной планеты Земля—Луна на фоне системы Плутон—Харон — вероятное свидетельство неоконченной “сборки” нашей планеты, запоздавшей по сравнению с другими планетами земной группы.

2.8. Поиск двойных экзопланет

Изучению двойственности внесолнечных планет пока препятствуют очевидные эффекты на-

блюдательной селекции. Недавнее тщательное исследование затмений 70 звезд с планетами-гигантами [61] показало, что только у одной планеты с орбитальным периодом 737 дней обнаружен близкий спутник с отношением масс ~ 40 . Этот результат укрепляет вывод о том, что двойные планеты с близкими массами компонентов, в отличие от звезд, очень редки. Теоретическая оценка вероятности образования двойных планет-гигантов $\sim 10\%$ [62].

Активное гравитационное взаимодействие планет с близкими орбитами следует признать распространенным явлением в мире планетных систем Галактики. Свидетельством этого является неожиданно большая доля обнаруженных внесолнечных планет с большими эксцентриситетами орбит даже при орбитальных периодах, меньших десяти дней [63, 64]. Причем важно, что даже среди самых близких к своим звездам планет с орбитальными периодами $< 3^d$ заметная часть планет имеет орбиты, сильно отклоняющиеся от плоскости орбит планет своей планетной системы, а часть планет имеют даже ретроградные орбиты [65, 66]. Последнее свидетельствует о том, что планеты-гиганты в процессе “сборки” часто активно взаимодействуют между собой при установлении конечного состояния регулярно распределенных по большой полуоси почти круговых орбит.

Часть планет, оказавшихся в процессе “сборки” на слишком близких неустойчивых орбитах при достаточно больших массах, могут приобрести большие эксцентриситеты своих орбит или, даже, быть выброшены из своих планетных систем, обретя статус “свободных” планет Галактики. Численная модель взаимодействия Юпитера с астероидным и планетным окружением показала высокую эффективность выброса массивными планетами планет малой массы из родительских систем [6].

Микролинзирование оказалось эффективным методом регистрации “свободных” планет. Подробное фотометрическое исследование более двадцати миллионов звезд молодой ОВ ассоциации из Верхней подгруппы Скорпиона позволило обнаружить около сотни “свободных” планет в этой области [67]. Детальный анализ результатов наблюдений привел авторов к выводу, что наблюдательному обнаружению доступны пока только наиболее массивные планеты. Полное число “свободных” планет в Галактике может быть сопоставимо с числом галактических звезд [5, 68]. Это обстоятельство подчеркивает решающую роль активного гравитационного взаимодействия планет на стадии их формирования в околозвездном пространстве.

За рамками рассмотрения остались и другие сценарии появления Луны. Например, сценарий, предполагающий образование компактного пылевого диска или тора около Земли, столкновительная эволюция которого со временем привела бы к образованию Луны. Но причины возникновения такого тора около Земли и отсутствия аналогичных образований около других планет земного типа остаются в этом сценарии неясными.

Прилет Луны с периферии планетной части Солнечной системы или из межзвездного пространства кажется маловероятным из-за большой скорости относительно Земли, которую она бы приобрела из-за большой разности гравитационного потенциала. А моделирование зависимости частоты захвата межзвездных объектов планетами Солнечной системы падает со скоростью V как V^{-2} при скоростях, меньших 1 км/с, и как V^{-6} при больших относительных скоростях [69].

Какой итог можно подвести к разнообразию сценариев происхождения Луны? Несмотря на то, что модель мегаимпакта получила широкую поддержку после Гавайской конференции 1984 г., посвященной проблеме образования Луны, модель захвата остается конкурентноспособной, поскольку располагает значительно большим фазовым объемом для захвата в отличие от модели лунообразующего мегаимпакта, требующего списка ограничений на реализацию низкоскоростного касательного удара [70]. Это позволяет нам непосредственно перейти к описанию задачи.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наша предыдущая работа по изучению гравитационного рассеяния малых тел Юпитером продемонстрировала некоторые возможности планет-гигантов для формирования околозвездных и межзвездных АКП-структур (АКП: астероиды-кометы-планеты [6]). Повторение этой же процедуры для Земли позволит расширить наше представление о роли планет земного типа в создании архитектуры планетных систем. Юпитер может делать многое своим мощным гравитационным полем, теперь интересно понять, на что способно гравитационное поле Земли в ходе формирования планетных систем.

Мы остановились на сценарии гравитационного захвата околосолнечной Луны Землей с орбиты близкой к земной орбите. Моделирование захвата проводится в два этапа. На первом этапе в рамках задачи трех тел (Солнце, Земля и Луна) осуществляется поиск “перспективных” для захвата Луны околосолнечных орбит, которые бы пересекали сферу гравитационного влияния Земли, т.е. сферу Хилла Земли [71]. Радиус этой сферы оценивается

как $r_{\text{Hill},E} = a_E(M_E/3M_\odot)^{1/3} \approx 1.5 \times 10^9$ м, где M_E и $M_\odot$ — массы Земли и Солнца соответственно, a_E — большая полуось орбиты Земли (1 а.е. = 1.496×10^{11} м). На втором этапе в рамках решения задачи N -тел изучается вопрос о влиянии приливного взаимодействия на отбор орбитального момента системы Земля–Луна.

3.1. Модель планеты в задаче N -тел

Второй этап моделирования реализован в задаче N -тел, или гравитационно связанных структурных элементов, необходимых для учета конечных размеров Луны и Земли, что позволяет оценить эффективность приливного торможения Луны Землей на различной глубине проникания в ее сферу Хилла и продуктивность перекачки орбитального момента Луны относительно Земли в спиновый момент Луны. Для модели Луны и Земли задавалось одинаковое число структурных элементов — “узлов”, — которые распределялись внутри сферы фактического радиуса планеты в соответствии с плотной упаковкой гранецентрированной кубической кристаллической решетки. Каждый такой структурный элемент “прячется” внутри сферы радиуса $r_a = a\sqrt{2}/4$, где a — период решетки, $2r_a$ — расстояние между ближайшими соседями. При выборе $a = d/12$ (d — диаметр планеты) количество структурных элементов — “узлов” — составляет $N = 3583$. Такая модель планеты — искусственная, поскольку напрямую не учитывает давление электромагнитных сил, отвечающих за прочностные характеристики планетного вещества, и переход энергии деформации в тепло. Учет механической прочности задается неявно запретом на сближение узлов на расстояние, меньшее r_a . При нарушении этого условия “включается” алгоритм возвращения “узлов” на прежнее место, а их скорости делаются сонаправленными. В некотором роде это имитация “пластилиновой” планеты, которая под действием приливных сил деформируется, сохраняя суммарный объем разрушенных фрагментов.

3.2. Метод интегрирования

Интегрирование уравнений движения (трех или N тел), записанных в ньютоновской форме в декартовых координатах:

$$M^k \frac{d^2 r_{\alpha}^k}{dt^2} = -\frac{\partial U}{\partial r_{\alpha}^k}, \quad k = 1, \dots, N, \quad \alpha = x, y, z,$$

проводилось с использованием скоростной формулировки численного алгоритма Верлета–Вейса [72]. Здесь

$$U_{ij} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N \frac{GM_i M_j}{|\vec{r}_{ij}|}$$

— энергия гравитационного взаимодействия структурных элементов — “узлов” — планеты. Используемый алгоритм интегрирования представляет явную консервативную схему второго порядка точности. Шаг интегрирования выбирается из анализа характерного времени, за которое под действием самогравитации структурный элемент пройдет свой собственный размер $r_a/2$. Например, ускорение свободного падения на Луне $g_M \sim 1.6$ м/с² дает ограничение на Джинсовскую шкалу “узла” $t_J = \sqrt{2r_a/g_M} \approx 500$ с. Выбор шага интегрирования на порядок меньше ($h_t = 25$ с) обеспечивает сохранение всех интегралов движения. Подробное описание численной схемы дано в [73].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

4.1. Задача трех тел: устойчивость околоземных орбит Луны

Данная серия расчетов, проведенная в постановке задачи трех тел, потребовалась для исследования околоземной орбиты Луны на устойчивость. Расчеты охватывают интервал примерно 80 оборотов Земли вокруг Солнца. Изначально Луна задавалась как спутник Земли на круговой орбите с начальным радиусом r_M^0 , который варьировался от 400 000 до миллиона километров. С увеличением r_M^0 орбита Луны становилась нестабильной из-за нарастающих возмущений, вызванных солнечными приливами. Для вариантов с $r_M^0 \leq 500 000$ км изменение радиуса орбиты Луны вследствие эффектов приливной гравитации не превышало 15%, но уже для варианта с $r_M^0 = 650 000$ км приливные возмущения со стороны Солнца достигли амплитуды порядка 50%, т.е. радиус орбиты Луны изменялся более чем в два раза. В расчетах с $r_M^0 \geq 675 000$ км статус Луны как спутника Земли поменялся на статус околосолнечной планеты.

На рис. 1 приведены результаты расчетов по выборочным вариантам с $r_M^0 = 600 000, 700 000, 800 000$ и 10^6 км. Первый слева столбец графиков показывает изменение со временем расстояния между Землей и Луной на интервале в 80 оборотов Земли вокруг Солнца. Средний столбец графиков иллюстрирует траекторию Луны (красно-оран-

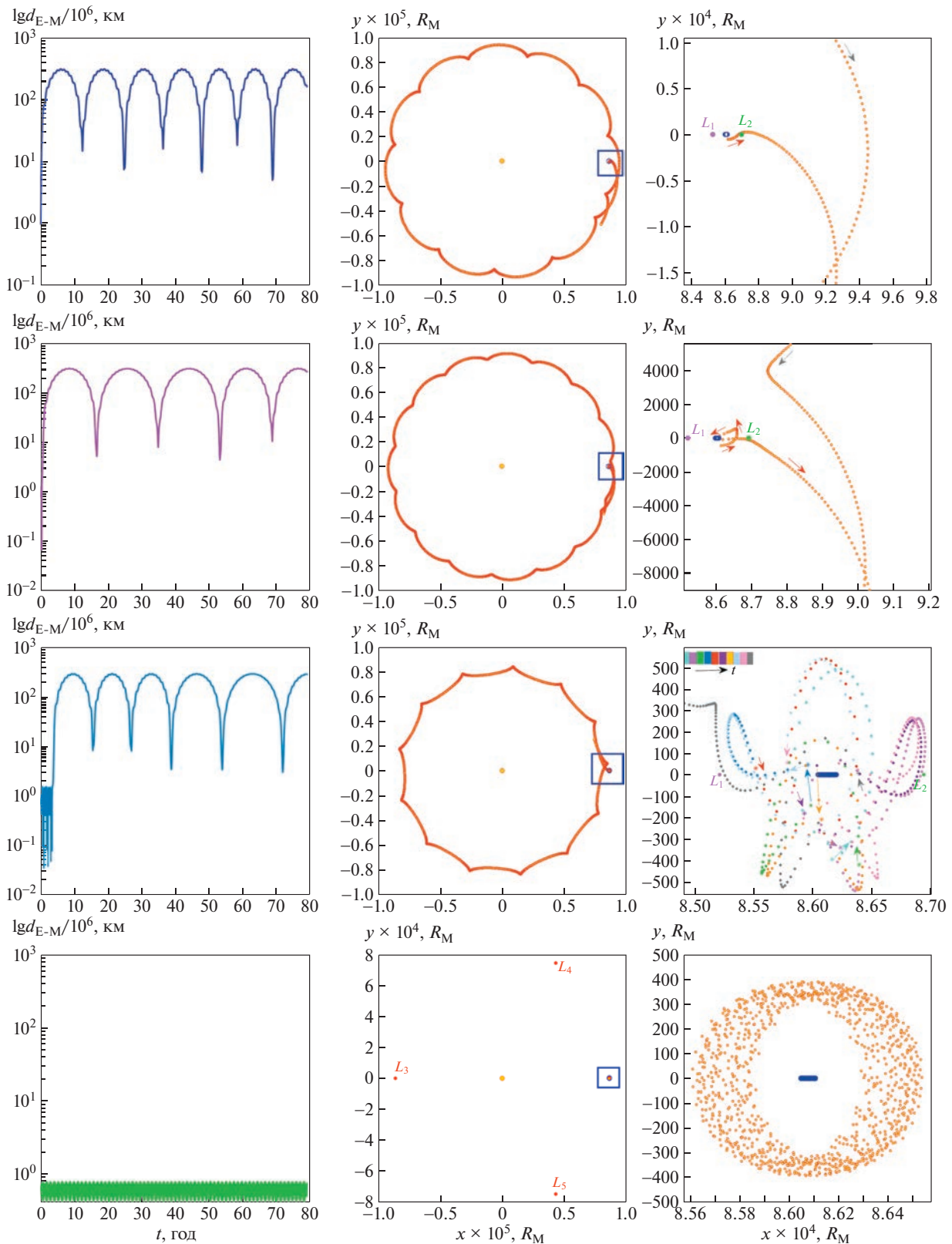


Рис. 1. Расстояние между Землей и Луной как функция времени за интервал в 80 оборотов Земли вокруг Солнца. Каждый ряд графиков соответствует своему значению начального радиуса круговой орбиты Луны: 10^6 км, 8×10^5 км, 7×10^5 км, 6×10^5 км. На левом графике в каждой строке показаны кривые сближения Земли и Луны. Средний график строки дает представление о траектории Луны. Здесь R_M — радиус Луны. Правый график показывает в увеличенном масштабе синий квадрат среднего графика. Красными стрелками показано начало движения, серыми — движение по околосолнечной орбите. Описание правого графика третьей строки см. в тексте.

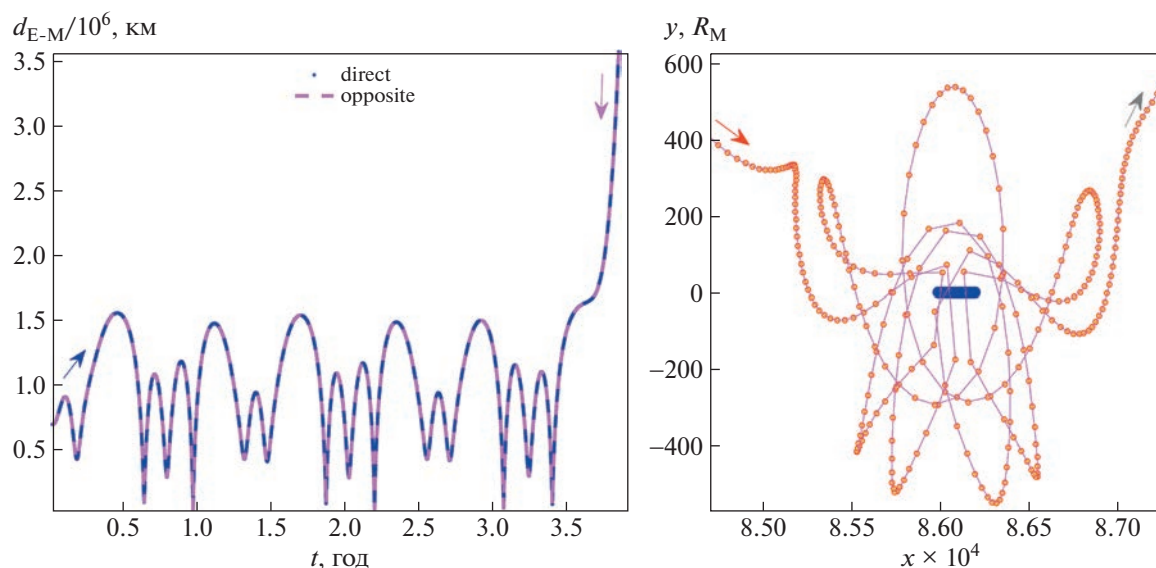


Рис. 2. Вариант расчетов в постановке задачи трех тел с $r_M^0 = 700\,000$ км при прямом и обратном интегрировании. Левая панель — сравнение сближения Луны с Землей как функция времени для прямого (синий цвет) и обратного (цвет маджента) интегрирования. На правой панели выделена область захвата Луны, совершающей 14 оборотов вокруг Земли, прежде чем вновь уйти на околосолнечную орбиту. Красными стрелками показано начало движения, серыми — движение по околосолнечной орбите.

жевые незакрашенные кружки) во вращающейся вместе с Землей (обозначена синим кружком) относительно Солнца (желтый кружок) системе координат. Третий столбец графиков дает подробную траекторию Луны вблизи Земли (в синем квадрате среднего графика).

Как видно из центральных графиков первого и второго ряда рис. 1, в вариантах с $r_M^0 = 10^6$ и $800\,000$ км Луна уходит на околосолнечную внешнюю по отношению к Земле орбиту. Один из признаков внешней околосолнечной орбиты Луны во вращающейся с Землей вокруг Солнца системе координат — это выпуклая форма “фестонов”, накладывающихся на движение Луны. Для варианта с большой полуосью в миллион километров Луна сразу уходит на околосолнечную орбиту (правый график первого ряда рис. 1). В варианте с $r_M^0 = 800\,000$ км Луна, прежде чем выйти на самостоятельную околосолнечную орбиту, делает один оборот вокруг Земли (правый график второго ряда рис. 1).

В варианте с $r_M^0 = 600\,000$ км Луна остается спутником Земли: на левом графике четвертого ряда рис. 1 показана зависимость от времени расстояния между Луной и Землей, которая соответствует эллиптической орбите с большой полуосью $600\,000$ км и эксцентриситетом ≈ 0.3 . На среднем графике четвертого ряда можно видеть свободное околосолнечное пространство: все

движение Луны заключено внутри синего квадрата, что иллюстрирует статус Луны как спутника Земли.

Наибольший интерес представляет вариант с большой полуосью Луны $r_M^0 = 700\,000$ км, в котором Луна совершила 14 оборотов, прежде чем стала внутренней околосолнечной планетой. На среднем графике третьего ряда рис. 1 приведена траектория Луны во вращающейся с Землей системе координат. Вогнутая форма “фестонов”, накладывающихся на траекторию Луны, указывает на ее статус внутренней околосолнечной планеты. На правом графике третьего ряда рис. 1 приведена последовательность околоземных оборотов Луны, которые она совершает до того, как разрывные возмущения со стороны Солнца не разорвали связь планета-спутник в системе Земля–Луна. Начало и направление каждого оборота обозначены звездочкой и стрелочкой, соответственно, в выведенной на графике панели цветовой последовательности.

Вариант с большой полуосью Луны $r_M^0 = 700\,000$ км был повторен в режиме обратного интегрирования и, как видно из рис. 2, траектория Луны в “реверс-расчете” хорошо совпала с полученной в расчете прямого интегрирования. Этот результат демонстрирует надежность численной схемы интегрирования и дает наглядное представление ситуации захвата Луны с околосолнечной внутренней (по отношению к Земле)

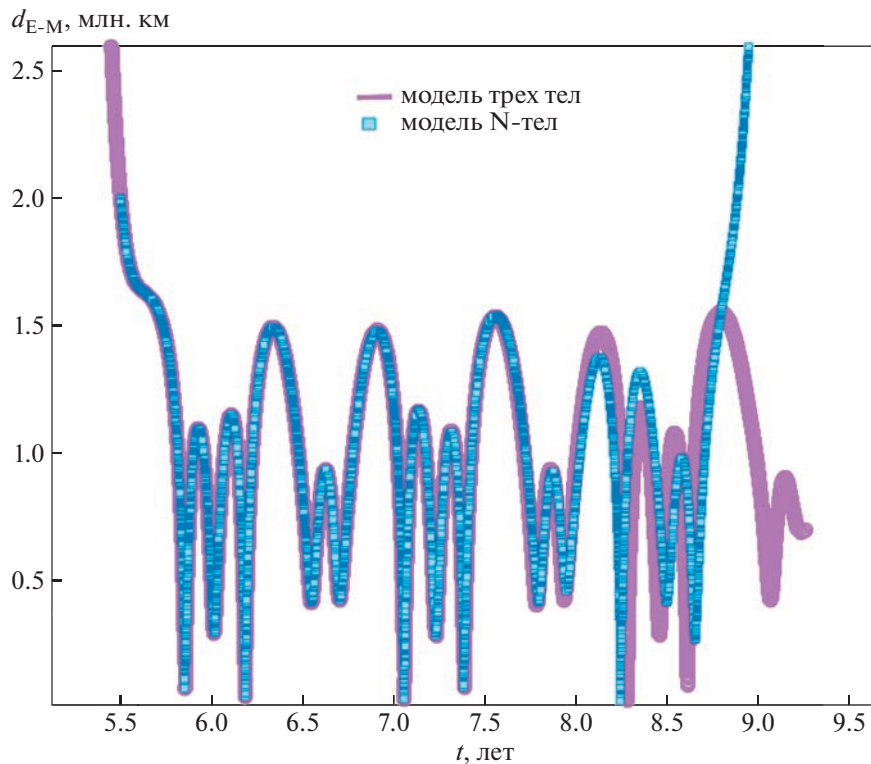


Рис. 3. Сравнение расчета с $r_M^0 = 700\,000$ км, проведенного методом обратного интегрирования в постановке задачи трех тел, и расчета с представлением Луны в модели N -тел.

орбиты, на которой Луна, попадая в зону Хилла Земли, совершает 14 оборотов вокруг Земли и снова уходит на околосолнечную орбиту, но теперь уже внешнюю. “Реверс-расчет” был повторен в модели N -тел, используемой для описания Луны и Земли.

4.2. Задача N тел: устойчивость околоземных орбит Луны

Из простых соображений ясно, что в рассматриваемой геометрии при отсутствии диссипативных сил захват Луны на финитную орбиту вокруг Земли невозможен. Иначе при обратном интегрировании мы приходим к противоречию. Поэтому вариант с $r_M^0 = 700\,000$ км был повторен в постановке задачи N -тел (Луна и Земля представлены в модели N структурных элементов — “узлов”) для оценки степени влияния приливных (диссипативных) сил. Сравнение результатов расчетов, полученных в постановке задачи трех и N -тел, представлены на рис. 3. Хорошо видно совпадение кривых сближения Луны и Земли на первых десяти оборотах Луны вокруг Земли, после которых расхождение стало увеличиваться, и, в итоге, в постановке задачи N -тел Луна раньше на один оборот вокруг Земли ушла на околосол-

нечную орбиту. В модели N -тел для Луны, объекта конечных размеров, был оценен прирост собственного углового момента, по величине которого можно сделать заключение об очень слабом раскручивании Луны — угловая скорость колеблется в диапазоне $\sim 2.25 \times 10^{-7} - 1.2 \times 10^{-6}$ оборотов в секунду ($\sim 10-50$ дней один оборот). Величина собственного момента Луны составляет порядка миллионной доли от ее орбитального момента относительно Земли (рис. 4), т.е. перекачка не эффективна на шкале времени порядка ~ 100 лет, что исключает тенденцию “быстрого” захвата за счет только перекачки орбитального момента системы в осевой момент Луны. Однако моментоемкость вращения Земли превосходит Лунную, что оставляет надежду на существенную дополнительную возможность потери орбитального момента системы.

Захват Луны с таким низким темпом может реализоваться за миллионы лет, нас же интересует “ускоренный” темп перекачки моментов, что возможно в событиях слабых столкновений. Поэтому на следующем этапе моделирования мы подключаем процедуру искусственного “притормаживания” Луны, которое могло быть вызвано столкновениями с астероидами.

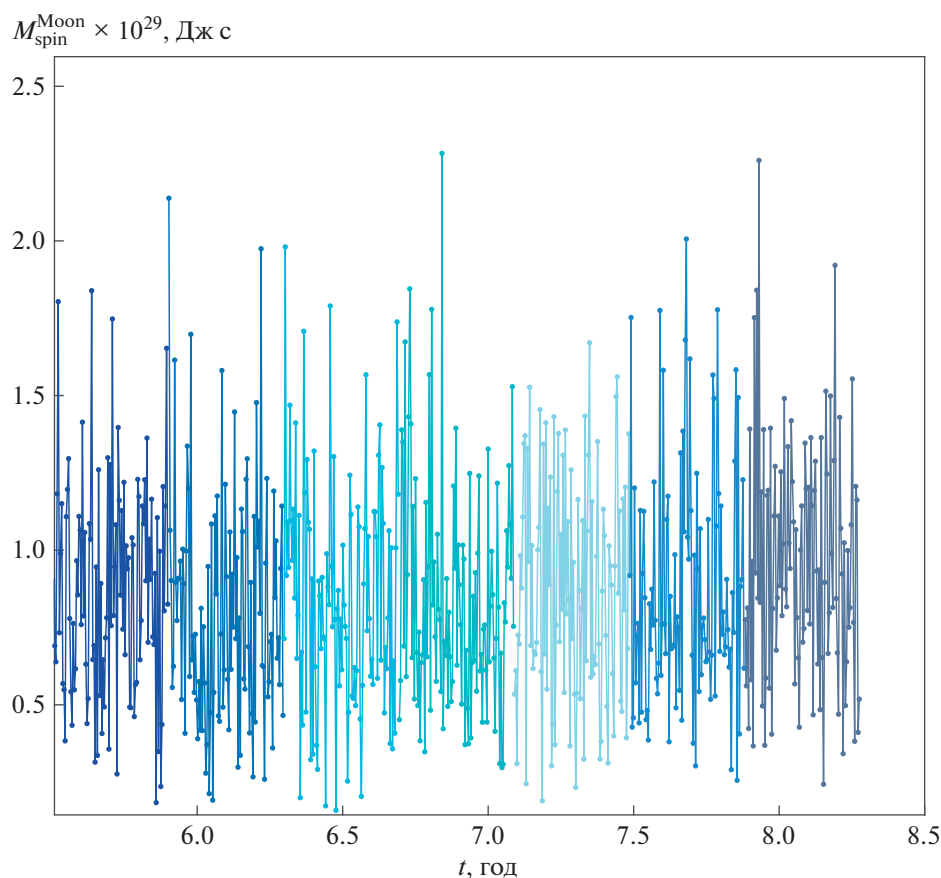


Рис. 4. Изменение со временем собственного момента Луны $M_{\text{spin}}^{\text{Moon}}$, рассчитанного в модели N -тел, в варианте с большой полуосью Луны $a_M = 700\,000$ км.

4.3. Фактор вязкой среды в задаче захвата Луны Землей

Поскольку учета одних приливных сил оказалось недостаточно для задачи захвата свободной Луны Землей на устойчивую орбиту, были включены в рассмотрение другие диссипативные факторы, как, например, вязкость, создаваемая “обломками” неизрасходованного на образование планет твердотельного компонента протопланетного околозвездного диска, тормозимого газом.

Сколько нужно отнять у Луны ее орбитального момента, чтобы произошел захват? На этот вопрос мы ответили серией расчетов, в которых учли искусственное “притормаживание”. За базовый был взят вариант с $r_M^0 = 700\,000$ км, повторенный методом обратного интегрирования до момента сближения Луны и Земли на расстояние двух миллионов километров. С этого зафиксированного положения было проведено шесть расчетов, в которых в первый момент наибольшего сближения Луны с Землей (на расстояние $\sim 76\,200$ км) “включается” процедура притормаживания Луны. Эта процедура включается один

раз, чтобы принудительно уменьшить полную скорость Луны. Было проведено шесть вариантов с уменьшением полной скорости Луны на 2, 1, 0.5, 0.01, 0.05, 0.001% от ее начального значения.

Результаты этих расчетов, проведенных в задаче трех тел, показаны на рис. 5. Согласно расчетам, при изменении полной скорости Луны менее чем на 0.05%, Луна после нескольких сближений с Землей уходит на околосолнечную орбиту. Уменьшая скорость Луны на 0.05–2% от ее начального значения, можно захватить Луну на устойчивую орбиту вокруг Земли. С уменьшением эффекта притормаживания орбита Луны вокруг Земли становится более вытянутой — апогей увеличивается от 143 000 до 1 200 000 км, а перигей уменьшается от 75 000 до 45 000 км. Эти данные дают нам представление о начальных параметрах устойчивой орбиты Луны вокруг Земли, последующее приливное воздействие на которую со стороны Земли и Солнца должно циркуляризовать ее орбиту в масштабе миллиардов лет, что выходит за рамки нашего изучения.

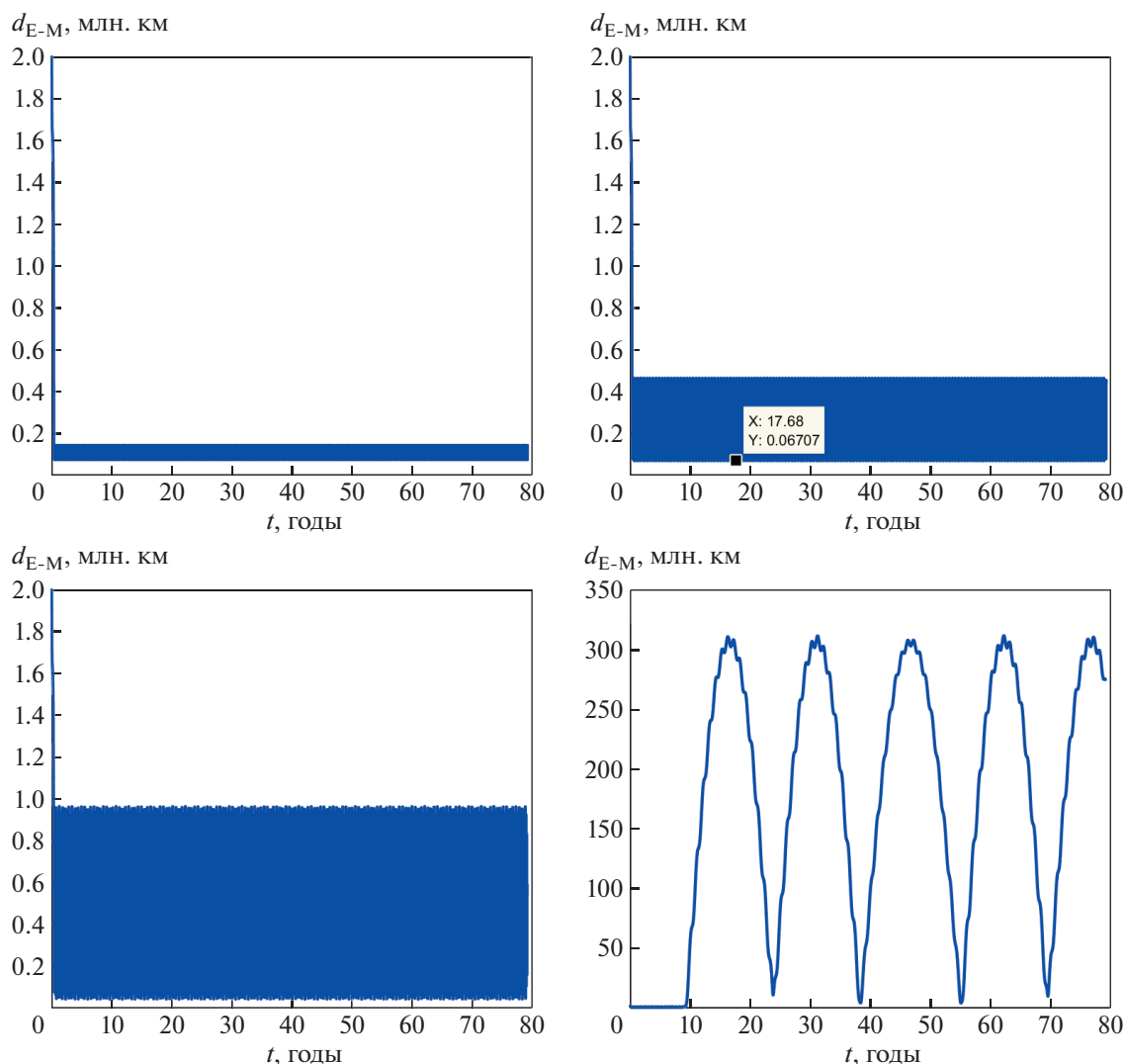


Рис. 5. Варианты расчетов в постановке задачи трех тел с $r_M^0 = 700\,000$ км с процедурой притормаживания Луны за счет одноактного уменьшения ее полной скорости в момент наибольшего сближения с Землей. На графиках (сверху вниз, слева направо) показаны варианты с уменьшением полной скорости Луны на 2, 0.5, 0.01 и 0.001%.

Если же это уменьшение скорости (на 0.05%) перевести в импульс удара, получится величина порядка 10^{24} кг · м/с, что эквивалентно удару тела по массе, например, в 100 раз меньше Луны, которое столкнулось с Луной с относительной скоростью ~ 1.3 км/с. Для одномоментного сброса импульса эта величина соответствует событию импакта, от чего мы хотели бы уйти. Полагая, что сброс энергии происходит постепенно за счет торможения Луны в околоземном пространстве, заполненном осколками астероидов и пылью, по аналогии с движением в вязкой среде, мы “размазали” импульс удара на интервале ~ 100 лет и получили скорость потери импульса $\sim 10^{15}$ кг·м/с.

Учитывая дисперсию скоростей космических “обломков” в околоземном пространстве порядка 1 км/с и среднюю плотность их вещества ~ 4 г/см³, можно оценить их характерный размер, равный ~ 1 км. Если принять большую дисперсию скоростей космических тел в околоземном пространстве, например, ~ 5 км/с, размер космических “обломков” понизится до сотни метров. Согласно результатам, полученным при моделировании бомбардировки Земли и Луны малыми телами при формировании этих планет [74], характерные скорости столкновения тел, прилетевших из зон питания Юпитера и Сатурна, с Луной составляют от 20 до 23 км/с, что дает оценку дисперсии скоростей малых космических тел $\sim 6\text{--}9$ км/с.

Таким образом, захват Луны с околосолнечной орбиты возможен, если во время сближения с Землей Луна будет ежесекундно испытывать столкновения с роем малых космических тел (декаметровых астероидов), “под дождем” которых будет происходить торможение с последующим захватом Луны на околоземную орбиту.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами расчеты в рамках задачи трех и N тел показали возможность гравитационного захвата изначально самостоятельной околосолнечной Луны на временную околоземную орбиту. Конфигурации с устойчивыми орбитами в рамках такой постановки недостижимы, иначе при обратном интегрировании это приводило бы к парадоксу — распаду устойчивой двойной системы. Другими словами, выполненное нами численное моделирование демонстрирует, что “чисто” гравитационный захват Луны на устойчивую орбиту вокруг Земли в рамках задачи трех тел невозможен.

В своих расчетах, проведенных в постановке задачи трех тел, мы показали, что для обеспечения гравитационного захвата Луны Землей необходим учет диссипативных факторов, как например, столкновение Луны с малыми космическими телами (астероидами), необходим учет вязкости газа протопланетного и околопланетного дисков, а также приливное взаимодействие Луны с Землей.

Важный для нас результат — это то, что моделирование допускает образование временных систем Земля—Луна на шкале нескольких орбитальных периодов системы, что существенно увеличивает эффективность действия диссипативных факторов в плане сброса избыточных энергии и углового момента. Итогом сброса сравнительно небольших избытков энергии и углового момента может быть образование в конечном итоге устойчивой системы Земля—Луна. Сложности сценария образования подобных систем со сравнимыми массами компонентов объясняют наблюдаемую редкость двойных планет.

В заключение хочется привести слова Жюль Анри Пуанкаре, одного из самых интуитивных физиков-философов нового времени. В своем письме Томасу Джефферсону Си в начале XX века, он написал о роли диссипации в захвате спутников: “Я тогда остановился, не без пользы, на вопросе о захвате планет сопротивляющейся средой... Влияние сопротивляющейся среды сказало в том, что произошел захват спутников” [75, 76].

Мы рассмотрели один из многочисленных возможных вариантов, которыми далеко не ис-

черпывается conundrum Луны — загадка ее происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. V. Tutukov, *Soviet Astron.* **31**, 663 (1987).
2. М. Маров, *Космос от солнечной системы вглубь Вселенной* (М.: Физматлит, 2016).
3. М. Я. Маров, И. И. Шевченко, *Успехи физ. наук* **190** (9), 897 (2020).
4. M. Reggiani, M. R. Meyer, G. Chauvin, A. Vigan, et al., *Astron. and Astrophys.* **586**, id. A147 (2016).
5. C. Clanton and B. S. Gaudi, *Astrophys. J.* **834** (1), id. 46 (2017).
6. А. В. Тутуков, Г. Н. Дремова, В. В. Дремов, *Астрон. журн.* **97** (11), 939 (2020).
7. B. J. Fulton, L. J. Rosenthal, L. A. Hirsch, H. Isaacson, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **255** (1), id. 14 (2021).
8. E. Kruse, E. Agol, R. Luger, and D. Foreman-Mackey, *Astrophys. J. Suppl.* **244** (1), id. 11 (2019).
9. M. G. MacDonald, R. I. Dawson, S. J. Morrison, E. J. Lee, and A. Khandelwal, *Astrophys. J.* **891** (1), id. 20 (2020).
10. А. Масевич, А. Тутуков, *Эволюция звезд: теория и наблюдения* (М.: Наука, 1988).
11. K. Baka and E. Schlawin, arXiv:2111.12688 [astro-ph.EP] (2021).
12. T. Stolker, S. Y. Hafferts, A. Y. Kesseli, R. J. van Holstein, et al., *Astron. J.* **162** (6), id. 286 (2021).
13. V. Dobos, S. Charnoz, A. Pal, A. Roque-Bernard, and G. M. Szabó, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **133** (1027), id. 094401 (2021).
14. А. В. Тутуков, А. В. Федорова, *Астрон. журн.* **88** (5), 419 (2011).
15. G. H. Darwin, *Philosoph. Transactions Roy. Soc. London.* **171**, 713 (1880).
16. G. H. Darwin, *Nature* **34**, 287 (1886).
17. G. Birkhoff, D. P. MacDougall, E. M. Pugh, and G. Taylor, *J. Appl. Phys.* **19**, 563 (1948).
18. W. K. Hartmann and D. R. Davis, *Icarus* **24** (4), 504 (1975).
19. W. Benz, W. L. Slattery, and A. G. W. Cameron, *Icarus* **66** (3), 515 (1986).
20. R. M. Canup and E. Asphaug, *Nature* **412** (6848), 708 (2001).
21. H. Alfvén and G. Arrhenius, *Moon* **5** (1–2), 210 (1972).
22. R. M. Canup, in: *50th Lunar and Planetary Science Conference*, held 18–22 March, 2019 at The Woodlands, Texas; LPI Contribution № 2132, id. 2044 (2019).
23. E. M. Galimov and A. M. Krivtsov, *Origin of the Moon. New Concept: Geochemistry and Dynamics* (Berlin: De Gruyter, 2012).
24. N. Dauphas, C. Burkhardt, P. Warren, and F.-Z. Teng, *Philosoph. Transactions Roy. Soc.* **A372**, id. 2013.0244 (2014).
25. R. M. Canup, K. Righter, N. Dauphas, K. Pahlevan, et al., arXiv:2103.02045 [astro-ph.EP] (2021).
26. Т. Ку, *Новые Идеи в Астрономии* (непериод. изд-е), Сб. 3, 19 (1914).

27. *M. Ćuk and S. T. Stewart*, Science **338** (6110), 1047 (2012).
28. *S. J. Lock, S. T. Stewart, M. I. Petaev, S. B. Jacobsen*, in: *50th Lunar and Planetary Science Conference*, held 18–22 March, 2019 at The Woodlands, Texas; LPI Contribution № 2132, id. 1784 (2019).
29. *K. Pahlevan and D. J. Stevenson*, Earth and Planet. Sci. Lett. **262** (3–4), 438 (2007).
30. *S. J. Lock, S. T. Stewart, M. I. Petaev, Z. Leinhardt, M. T. Mace, S. B. Jacobsen*, and M. M. Ćuk, J. Geophys. Res. Planets **123** (4), 910 (2018).
31. *Е. Л. Рускол*, Астрон. журн. **37**, 690 (1960).
32. *О. Ю. Шмидт*, Четыре лекции о теории происхождения Земли, 2-е изд-е (М.: Изд-во АН СССР, 1949).
33. *А. В. Витязев, Г. В. Печерникова, В. С. Сафронов*, Планеты земной группы. Происхождение и ранняя эволюция (М.: Наука: Физматлит, 1990).
34. *V. V. Svetsov, G. V. Pechernikova, A. V. Vityazev*, in: *43rd Lunar and Planetary Science Conference*, held March 19–23, 2012 at The Woodlands, Texas; LPI Contribution № 1659, id. 1808 (2012).
35. *Г. В. Печерникова, Е. Л. Рускол*, в сб.: *Жизнь и Вселенная*, под ред. В. Н. Обридко и М. В. Рагульской (М.: Изд-во ВВМ, 2017).
36. *V. S. Safronov, G. V. Pechernikova, E. L. Ruskol*, and *A. V. Vityazev*, *Protosatellite swarms, Satellites*, edited by J. A. Burns and M. S. Matthews (Tuscon: Univ. of Arizona Press, 1986).
37. *A. A. Boyarchuk, E. L. Ruskol, V. S. Safronov, and A. M. Fridman*, Doklady Physics **43** (8), 505 (1998).
38. *R. Rufu, O. Aharonson, and H. B. Perets*, Nature Geoscience **10** (2), 89 (2017).
39. *R. I. Citron, H. B. Perets, and O. Aharonson*, Astrophys. J. **862** (1), id. 5 (2018).
40. *A. S. Murachev, D. V. Tsvetkov, E. M. Galimov, A. M. Krivtsov*, in: *Advances in Mechanics of Microstructured Media and Structures*, edited by F. dell’Isola, V. Eremeyev, and A. Porubov, Part of the book series: Advanced Structured Materials (STRUCTMAT) **87**, 251 (2018).
41. *S. I. Ipatov*, in: *Origins: From the Protosun to the First Steps of Life*, Proc. of the IAU **345**, 148 (2020).
42. *H. Jeffreys*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **78**, 116 (1917).
43. *F. Adams and K. Napier*, Astrobiology **22** (12), 1429 (2022).
44. *Sung-Ho Na*, J. Korean Astron. Soc. **45** (2), 49 (2012).
45. *C. de la Fuente Marcos and R. de la Fuente Marcos*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **494**, 1089 (2020).
46. *M.-T. Hui, P. A. Weigert, D. J. Tholen, and D. Fohring*, Astrophys. J. Letters **922** (2), id. L25 (2021).
47. *G. Fedorets, M. Micheli, R. Jedicke, S. Naidu, et al.*, Astron. J. **160** (6), id. 277 (2020).
48. *E. Schmutzer*, Astron. Nachricht. **326** (8), 760 (2005).
49. *M. Krizek, V. G. Gueorguiev, A. Maeder*, Gravitation and Cosmology **28** (2), 122 (2022).
50. *E. C. Ostriker*, Astrophys. J. **513** (1), 252 (1999).
51. *J. B. Pollack, O. Hubickyj, P. Bodenheimer, J. J. Lissauer, M. Podolak, and Y. Greenzweig*, Icarus **124** (1), 62 (1996).
52. *I. Kant*, *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (1755).
53. *P. S. Laplace*, *Exposition du Système du Monde* (1796).
54. *H. Alfvén*, *Physical Studies of Minor Planets*, Proc. of IAU Colloq. **12**, held in Tucson, AZ, March, 1971; edited by T. Gehrels; National Aeronautics and Space Administration SP 267, 1971, p. 315.
55. *N. Gorkavyi and T. Taidakova*, Astron. Letters **21** (6), 846 (1995).
56. *S. Ida, R. M. Canup, and G. R. Steward*, Nature **389** (6649), 353 (1997).
57. *E. Kokubo, S. Ida, and J. Makino*, Icarus **148** (2), 419 (2000).
58. *R. Hyodo, K. Ohtsuki, and T. Takeda*, Astrophys. J. **799** (1), id. 40 (2015).
59. *H. B. Perets*, Astrophys. J. Letters **727** (1), id. L3 (2011).
60. *C. A. Giuppone, A. Rodriguez, T. A. Michtchenko, A. A. de Almeida*, Astron. and Astrophys. **658**, id. A99 (2022).
61. *D. Kipping, S. Bryson, C. Burke, J. Christiansen, et al.*, Bull. Amer. Astron. Soc. **54** (5), e-id. 2022n5i04p04 (2022).
62. *H. Ochiai, M. Nagasawa, and S. Ida*, Astrophys. J. **790** (2), id. 92 (2014).
63. *V. van Eylen, S. Albrecht, X. Huang, M. G. MacDonald, et al.*, Astron. J. **157** (2), id. 61 (2019).
64. *Y. Chachan, P. A. Dalba, H. A. Knutson, B. J. Fulton, et al.*, Astrophys. J. **926** (1), id. 62 (2022).
65. *E. Knudstrup and S. H. Albrecht*, Astron. and Astrophys. **660**, id. A99, (2022).
66. *S. Albrecht, J. N. Winn, R. P. Butler, J. D. Crane, S. A. Shectman, I. B. Thompson, T. Hirano, and R. A. Wittenmyer*, Astrophys. J. **744** (2), id. 189 (2012).
67. *N. Miret-Roig, H. Bouy, S. N. Raymond, M. Tamura, et al.*, Nature Astron. **6**, 89 (2022).
68. *A. Siraj and A. Loeb*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **507** (1), L16 (2021).
69. *K. Napier, F. Adams, and K. Batygin*, Planetary Sci. J. **2** (2), id. 53 (2021).
70. *J. A. Kegerreis, S. Ruiz-Bonilla, V. R. Eke, R. J. Massey, T. D. Sandnes, L. F. A. Teodoro*, Astrophys. J. Letters **937** (2), id. L40 (2022).
71. *Г. Н. Дремова, В. В. Дремов, А. В. Тутуков*, *Физика космоса*, Препринты 50-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 30 января–3 февраля 2023 г.), стр. 523 (2023); https://astro.insma.urfu.ru/sites/default/files/school/y2023/preprint_v2sm.pdf
72. *L. Verlet and J.-J. Weis*, Phys. Rev. A **5**, 939 (1972).
73. *А. В. Тутуков, В. В. Дремов, Г. Н. Дремова*, Астрон. журн. **84** (6), 487 (2007).
74. *M. Marov and S. Ipatov*, Geochemistry International **59** (11), 1010 (2021).
75. *H. Poincare*, Bull. Astronomique (Serie I) **28**, 251 (1911).
76. *T. J. J. See*, Astron. Nachricht. **181** (23), 365 (1909).

GRAVITATIONAL CAPTURE AS A POSSIBLE SCENARIO ORIGIN OF THE MOON

A. V. Tutukov^a, G. N. Dremova^b, and V. V. Dremov^b

^a*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Russian Federal Nuclear Center, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia*

The article is devoted to the problem of the origin of the Moon. Discussed modern scenarios for the formation of the Earth-Moon system: simultaneous formation of the Earth and the Moon in the circumsolar gas of dust disk; impact partial destruction of the Earth by a massive asteroid; gravitational capture of the Moon by the Earth; destruction of the double moon at the beginning when approaching the Earth with possible subsequent absorption components of smaller mass by the Earth. We offer two-stage scenario of gravitational capture of the Moon by the Earth in the early stages Solar system. In the first stage, using a hybrid numerical model in the formulation of the three-body problem (Sun, Earth and Moon) and N -bodies, the search and selection of temporary orbits of the Moon around the Earth is carried out. Using the backward integration method in the formulation N -body problem, the influence of tidal forces on pumping of orbital moment of the Moon (P_{orb}^M) relative to the Earth at its own moment P_s^M is estimated. As the simulation shows, actions tidal forces alone are not enough to capture the Moon by the Earth in a short time time scale ~ 100 years ($\Delta P_s^M \sim 10^{-6} P_{\text{orb}}^M$). At the second stage, the factor is taken into account viscous-dissipative environment leading to additional “slowing down” of the Moon, due, for example, to collisions with asteroids and the transition of tidal energy into heat, which helps the Moon get rid of excess kinetic energy and gain constant orbit around the Earth.

Keywords: origin of the Moon, hypotheses, modeling, three body problem