



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 15 за 2021 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

М.С. Легкоступов

Гравитационная
неустойчивость и
образование планетных
систем звезд солнечного
типа

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Легкоступов М.С. Гравитационная неустойчивость и образование планетных систем звезд солнечного типа // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 15. 32 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2021-15>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-15>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

М.С. Легкоступов

**Гравитационная неустойчивость
и образование планетных систем
звезд солнечного типа**

Москва — 2021

Легкоступов М.С.

Гравитационная неустойчивость и образование планетных систем звезд солнечного типа

Основополагающие принципы модели протопланетных колец – модели образования планетных систем звезд, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных колец) – распространены на образование регулярных спутников планет. На основе этих принципов предложена полная модель образования планетных систем, включая и их спутники, для звезд солнечного типа (модель газопылевых колец).

Ключевые слова: протосолнечная туманность, гравитационная неустойчивость, протопланетный диск, протоспутниковый диск, астрофизические наблюдения, планетная система

Michail Semenovich Legkostupov

Gravitational instability and the formation of planetary systems of solar-type stars

The fundamental principles of the protoplanetary ring model – the model of formation of planetary systems of stars, which is based on the origin and development of large-scale gravitational instabilities (protoplanetary rings) – are extended to the formation of regular planetary satellites. Based on these principles, a complete model of the formation of planetary systems, including their satellites, (model of gas and dust rings) for solar-type stars is proposed.

Key words: protosolar nebular, gravitational instability, protoplanetary disk, protoplanetary ring, protosatellite disk, astrophysical observations, planetary system

1. Введение

Данная работа посвящена проблеме образования планетных систем звезд солнечного типа, включая и происхождение спутников планет. В работах [1–14] была представлена разработка новой модели образования планетных систем звезд солнечного типа – модели протопланетных колец, альтернативной общепризнанной теории аккумуляции планет из твердых тел и частиц (модели твердотельной аккумуляции) [15, 16]. В основе представленной модели лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных колец) в протопланетном диске звезд [3, 14]. В настоящей работе основополагающие принципы модели протопланетных колец распространены на образование регулярных спутников планет. На основе этих принципов предложена полная модель образования планетных систем, включая и их спутники, для звезд солнечного типа (модель газопылевых колец).

В настоящее время в научной литературе нет установившихся названий структур планетных систем звезд в процессе их образования. Так, встречаются различные названия газопылевого протопланетного диска Солнца: например, «газопылевой околосолнечный диск», «солнечная туманность» (solar nebular) или «допланетное облако» и др. Поэтому для правильного понимания представленных исследований вводятся следующие определения для звезд солнечного типа. Протозвездная туманность – это газопылевое межзвездное облако, в котором начинается коллапс и формируется звезда. Газопылевое околосолнечное облако (околосолнечное облако) – это окружающее звезду облако, газопылевое вещество которого вращается вокруг звезды. Газопылевой протопланетный диск звезды (протопланетный диск) – это газопылевое околосолнечное облако после отделения его от звезды. Газопылевые протопланетные кольца (протопланетные кольца) – это газопылевые кольца, на которые разделяется протопланетный диск в результате его гравитационной неустойчивости. Газопылевое протопланетное сгущение (протопланетное сгущение (облако)) – это газопылевое сгущение (протопланетная «туманность»), образовавшееся в результате эволюции протопланетного кольца, и из которого в дальнейшем формируется протопланета и ее протоспутниковый диск. Протопланета – это газопылевое сгущение, которое в процессе самогравитационного сжатия превращается в планету. Газопылевой протоспутниковый диск (протоспутниковый диск) – это окружающее протопланету облако, газопылевое вещество которого вращается вокруг протопланеты. Газопылевые протоспутниковые кольца (протоспутниковые кольца) – это газопылевые кольца, на которые разделяется протоспутниковый диск в результате его гравитационной неустойчивости, и из которых в дальнейшем образуются регулярные спутники планеты.

Существуют два типа спутников: регулярные и нерегулярные. Регулярные спутники обращаются по почти круговым орбитам, расположенным в экваториальной плоскости планеты, а движение спутника вокруг планеты

происходит в направлении вращения планеты. Нерегулярные спутники находятся на более удаленных орбитах, сильно вытянутых и наклоненных к экваториальной плоскости планеты; направление их обращения вокруг планеты произвольное, чаще обратное вращению планеты.

При изложении материала будем придерживаться следующей концепции: рассматриваются основные физические процессы модели протопланетных колец, которые определяют эволюцию протозвездной (протосолнечной) туманности (более детальное рассмотрение положений модели представлено в работах [17–19]); для проверки достоверности основных положений рассматриваемых моделей в качестве критерия истины используются экспериментальные данные, в том числе результаты астрофизических наблюдений [20–25]; изложение модели газопылевых колец проводится в сопоставлении с моделью твердотельной аккумуляции [15, 16].

2. Образование планет в планетных системах звезд солнечного типа в модели протопланетных колец

Рассмотрим эволюцию протозвездной туманности в модели протопланетных колец на примере протосолнечной туманности [17, 19]. В этой модели предполагается, что звезда солнечного типа и ее планетная система образовались из вращающейся газопылевой протозвездной туманности в результате единого динамического процесса ее сжатия – коллапса, аналогично тому, как это было предсказано И. Кантом [26] и П.С. Лапласом [27]. Эта гипотеза подтверждена современными наблюдениями за образованием молодых звезд и их протопланетных дисков [28–32]. В вопросе о причине коллапса мы придерживаемся общепринятой точки зрения, заключающейся в том, что произошло внешнее воздействие (возмущение), которое перевело протосолнечную туманность в состояние гравитационной неустойчивости и привело ее к последующему коллапсу. Формирование Солнца как звезды произошло за промежуток времени, равный примерно 10^6 лет [33]. В это же время (одновременно с формированием Солнца) происходило образование газопылевого околосолнечного облака, которое являлось аккреционным. К началу выхода Солнца на главную последовательность аккреционный поток резко уменьшился и околосолнечное облако отделилось от Солнца, образуя газопылевую протопланетную диск [33–36].

В результате астрофизических наблюдений за молодыми звездами солнечного типа была доказана достоверность как основополагающей гипотезы о совместном образовании звезды солнечного типа и ее планетной системы из единой газопылевой протозвездной (протосолнечной) туманности, так и достоверность следующих важных гипотез [28–32]:

– процесс планетообразования начинался в газопылевом протопланетном диске;

– закон вращения газопылевых протопланетных дисков близок к закону Кеплера.

В процессе коллапса протосолнечной туманности, произошедшего в результате первоначальной гравитационной неустойчивости ее среды, плотность туманности постоянно возрастала. В этом случае, по логике гравитационной неустойчивости по Джинсу [37], критическая длина волны потенциальной гравитационной неустойчивости среды туманности уменьшалась, начиная от величины $\sim 1,6 \cdot 10^{17}$ см, которая соответствовала начальному размеру протосолнечной туманности. На определенной стадии эволюции протосолнечной туманности гравитационная неустойчивость ее среды должна была проявиться, так как критическая длина волны Джинса становится меньше размеров туманности.

В работах [8 – 10, 14] было показано, что с высокой степенью вероятности протопланетный диск Солнца в начальной стадии своей эволюции был гравитационно неустойчивым по отношению к крупномасштабным возмущениям с длиной волны, сравнимой с расстоянием между планетами. В результате данной гравитационной неустойчивости в диске образовались газопылевые протопланетные кольца, которые и соответствовали зонам планет Солнечной системы [17, 19].

Астрофизические исследования последних лет привели к неожиданному открытию газопылевых колец в протопланетных дисках звезд [20 – 25], которые были предсказаны при разработке модели протопланетных колец [3 – 5, 8 – 13]. Изображения протопланетных дисков при астрофизических наблюдениях были получены с высокой степенью разрешения. Таким образом, впервые со времен П.С. Лапласа появилась реальная возможность экспериментальной проверки достоверности теоретических моделей образования планетных систем как Солнца, так и других звезд солнечного типа.

Как известно [17, 19], в классической теории аккумуляции планет из твердых тел и частиц [15, 16] отсутствует явление, наблюдаемое в астрофизических исследованиях в виде газопылевых кольцевых структур в протопланетных дисках звезд солнечного типа. В модели твердотельной аккумуляции гравитационная неустойчивость на начальной стадии эволюции протопланетного диска, т.е. фактически в газовой среде, исключается [15, 16].

В модели протопланетных колец газопылевые кольца в протопланетном диске возникают естественным путем в результате его гравитационной неустойчивости. Образовавшееся газопылевое протопланетное кольцо, как правило, гравитационно неустойчиво и фрагментирует, в общем случае, на несколько газопылевых сгущений, которые, взаимодействуя между собой, сталкиваясь и объединяясь, и приводят к образованию протопланетного сгущения (протопланетной «туманности») [10, 17, 19]. В дальнейшем в результате эволюции протопланетной «туманности» из нее образуются протопланета и ее протоспутниковый диск.

Анализ работ по астрофизическим наблюдениям [18, 19] показывает, что представленный сценарий образования планетных систем звезд солнечного типа наилучшим образом описывает результаты астрофизических наблюдений [20 – 25].

Итак, на стадии эволюции газопылевого протопланетного кольца образовалось протопланетное сгущение (протопланетная «туманность»), из которого впоследствии и образуются протопланета и ее протоспутниковый диск.

3. Образование спутников планет

в планетных системах звезд солнечного типа

Многочисленные исследования [15, 16, 29] показывают, что некоторые планеты и их спутниковые системы в Солнечной системе подобны планетной системе Солнца. Это особенно хорошо видно на примере Юпитера [29]. Так как системы регулярных спутников планет очень напоминают уменьшенную планетную систему Солнца, то это дает основание говорить о сходстве процессов их образования [15, 16, 29].

3.1. Образование регулярных спутников планет

в модели газопылевых колец

Как известно [33, 35, 36], при образовании планетной системы Солнца происходит последовательное сжатие газопылевой среды протосолнечной туманности, которое начинается с ее коллапса.

Рассмотрение физических процессов в модели протопланетных колец показывает, что в результате образования в диске протопланетных колец плотность среды в них возрастает. Дальнейшее сжатие среды колец происходит в процессе их самогравитации. Фрагментация протопланетного кольца на отдельные сгущения и последующее их объединение в одно сгущение также приводит к увеличению плотности среды по сравнению с протопланетным диском в его начальном состоянии [20, 23, 24, 25]. В результате этого процесса образуется газопылевое протопланетное сгущение (облако). В предлагаемой модели газопылевых колец эволюция протопланетного сгущения (облака) происходит подобно эволюции протосолнечной туманности: под действием самогравитации протопланетного сгущения образуется протопланета и ее аккреционный газопылевой протоспутниковый диск. В этом случае протопланетное сгущение (облако) можно рассматривать по аналогии с протосолнечной туманностью как протопланетную «туманность».

За счет сжатия вещества протоспутникового диска он становится гравитационно неустойчивым и подобно протопланетному диску разделяется на газопылевые протоспутниковые кольца. Протоспутниковое кольцо может быть гравитационно неустойчивым. В этом случае механизм образования спутников подобен механизму образования планет [17, 19]: протоспутниковое

кольцо фрагментирует, в общем случае, на несколько газопылевых сгущений, которые, взаимодействуя между собой, сталкиваясь и объединяясь, и приводят к образованию регулярного спутника планеты.

3.2. Образования спутников планет в модели твердотельной аккумуляции и в других моделях

В классической теории аккумуляции планет из твердых тел и частиц (модели твердотельной аккумуляции) [15, 16] нет необходимости вводить газопылевой протоспутниковый диск. Формирование спутников планет в этой модели происходит в процессе эволюции газопылевого протопланетного диска, ключевым моментом которого является образование в диске роя твердых тел [15, 16]. Планета образуется из этого роя твердых тел путем их твердотельной аккумуляции. Когда планета приобрела по крайней мере половину своей массы, происходит формирование вращающегося вокруг планеты протоспутникового роя твердых тел путем гравитационного захвата тел из протопланетного диска. Одновременно с этим в протоспутниковом рое устанавливается поток тел в направлении планеты. Спутники планеты образуются из протоспутникового роя твердых тел, которые остались на орбите вокруг планеты, путем их твердотельной аккумуляции [15, 16].

Следует отметить, что в настоящее время наиболее принятыми научным сообществом являются модели образования регулярных спутников в аккреционном газопылевом (или пылевом) протоспутниковом диске на поздней стадии формирования планеты [29]. В работах [38, 39] предполагается, что аккреционный поток вещества через протоспутниковый диск на планету определяется темпом аккреции из окружающей зоны протопланетного диска Солнца в сферу Хилла планеты. Альтернативный подход [40 – 42] предполагает, что на стадии формирования спутников аккреция вещества из протопланетного диска Солнца на протоспутниковый диск закончилась. После этого протоспутниковый диск эволюционирует как самостоятельный, изолированный вязкий диск.

В этих моделях [38 – 42] протоспутниковый диск рассматривается как гравитационно устойчивый, а образование спутников в диске происходит путем твердотельной аккумуляции из твердых тел и пыли, в том числе и аккрецируемых из протопланетного диска Солнца.

Из других существующих моделей образования протоспутниковых дисков остановимся на следующих.

Модель, предложенная в работах [43, 44], предполагает, что планета (Юпитер, Сатурн), имеющая большой объем и достаточно высокую температуру, начинает остывать и сжиматься. В процессе сжатия внешние экваториальные слои планеты, имеющие наибольший угловой момент, начинают отделяться от планеты, образуя газопылевой протоспутниковый диск. Критические оценки этой модели связаны с большой массой протоспутникового диска [38, 39].

Модель коаккреции [45] предполагает гравитационный захват планетой планетезималей из протопланетного диска Солнца и образование протоспутникового диска планеты путем соударений планетезималей и более мелких тел внутри ее сферы Хилла. В этой модели также рассматривается возможность гравитационного захвата в протопланетном диске Солнца нескольких тел размерами до нескольких десятков километров, которые послужили зародышами, на которые затем происходила аккреция пыли и мелких планетезималей, приведшая к образованию спутников [45, 46].

Следует отметить, что процесс коаккреции, вероятно, был основным механизмом образования нерегулярных спутников, которые имеют большие значения наклона орбит и эксцентриситетов [29, 39].

Модель мегаимпакта – это соударение планеты с телом планетарного масштаба [47]. Данная модель наиболее разработана для образования Луны, хотя и в этом случае она встречается со значительными трудностями [48 – 50], которые многократно возрастают при попытке применения этой модели для объяснения образования спутников Юпитера и Сатурна [29].

Рассмотрение существующих моделей планетных систем показывает, что в настоящее время нет общепринятой модели образования спутников планет. В то же время общепризнанно, что процесс образования планетных систем звезд и их спутников является единым эволюционным процессом и для его описания необходимо построение единой самосогласованной теории [15, 16, 29]. В настоящее время такой теории не существует, и разработка ее в рамках теории аккумуляции планет из твердых тел и частиц (модели твердотельной аккумуляции) [15, 16] встречает значительные трудности [16].

3.3. Экспериментальные данные по образованию планетных систем звезд солнечного типа и их трактовка с позиций различных теоретических моделей

1. Для выбора модели образования планетной системы Солнца большой интерес представляют работы Галимова Э.М. по геохимическому составу планет [48, 50 – 53]. Совершенно ясно, что геохимический состав планет и их спутников будет существенным образом зависеть от модели образования планетной системы Солнца. В результате геохимических исследований Галимов Э.М. выдвинул гипотезу, что формирование планеты и ее спутников происходит из одного газопылевого облака (сгущения), и на примере системы Земля - Луна в его работах показано, что эта гипотеза наилучшим образом позволяет объяснить известные геохимические факты и ограничения. В то же время в рамках модели твердотельной аккумуляции планет, в том числе и в модели мегаимпакта образования Луны [47], возникают значительные трудности в объяснении ряда геохимических составов и изотопных систем [53]. В рамках данной работы нет возможности останавливаться на всех геохимических зависимостях системы Земля – Луна, эти результаты достаточно подробно изложены в работе [53].

Результаты геохимических исследований Галимова Э.М. [48, 50, 52, 53] наилучшим образом согласуются с моделью газопылевых колец, так как в этой модели образование планеты и ее спутников (спутника) действительно происходит из единого газопылевого протопланетного сгущения (облака) – протопланетной «туманности».

2. В июле 2019 года была опубликована работа [54], в которой представлены результаты впервые проведенного наблюдения за газопылевым околопланетным (протоспутниковым) диском планеты PDS 70 c, вращающейся вокруг звезды PDS 70. Звезда PDS 70 – это карликовая звезда, масса которой составляет примерно три четверти массы Солнца. Планета PDS 70c по массе в 5-10 раз больше Юпитера и расположена от звезды примерно на расстоянии, равном расстоянию Нептуна от Солнца.

Авторы наблюдали излучение в видимой части спектра, известное как H – alpha излучение, которое испускается, когда водород из околопланетного диска падает на планету и становится ионизированным. Это дает основание предполагать, что наблюдаемый околопланетный (протоспутниковый) диск является аккреционным газопылевым диском. Авторы предполагают, что спутники Юпитера образовались из аналогичного протоспутникового диска. Авторы также полагают, что прямое наблюдение за планетами с околопланетными (протоспутниковыми) дисками позволит проверить теории формирования планет.

Таким образом, астрофизические наблюдения за планетами других звезд солнечного типа [54] подтверждают правильность предположения о существовании этапа в эволюции протопланетного диска, на котором происходит образование протопланеты и окружающего ее аккреционного газопылевого протоспутникового диска.

Не исключено, что в недалеком будущем могут появиться сообщения об астрофизических наблюдениях газопылевых колец в протоспутниковом диске планеты, как это произошло с газопылевыми протопланетными кольцами, которые наблюдали в протопланетных дисках [20 – 25].

3. Наиболее убедительным свидетельством об образовании газопылевых протоспутниковых колец в протоспутниковом диске, из которых и сформировались регулярные спутники, на наш взгляд, являются кольца внешних планет Солнечной системы (планет-гигантов), из них наиболее известны кольца Сатурна.

В настоящее время кольцам Сатурна посвящено большое количество исследований. Особенно большой вклад в астрофизическое изучение колец внесла автоматическая межпланетная станция «Cassini–Huygens» (проект NASA, Европейского космического агентства и Итальянского космического агентства, 1997 – 2017 годы [55, 56]). По данным проекта «Cassini» [57, 58], на настоящий момент времени кольца Сатурна представляют собой плоские концентрические кольца, лежащие в плоскости экватора планеты. Кольца разделены промежутками на семь основных колец D, C, B, A, F, G, E, которые,

в свою очередь, также делятся на более мелкие кольца. Кольца расположены на расстоянии от 67000 км до 480000 км от центра Сатурна и в основном состоят из водяного льда с количеством примесей в диапазоне от 0,1% до 10% в виде силикатов и органики.

Результаты, которые были получены при реализации проекта «Cassini», в ряде исследований [59, 60] были интерпретированы как доказательство того, что возраст колец Сатурна составляет 10 – 100 млн лет. Это намного меньше возраста самого Сатурна, который оценивается в пределах 4,5 миллиардов лет. В то же время другие исследователи полагают, что такие выводы на основании полученных результатов делать преждевременно, так как на основе этих же результатов возможны и противоположные выводы: кольца могут быть ровесниками Сатурна [61].

В модели газопылевых колец, которая представлена в настоящей работе, естественной точкой зрения является гипотеза, в соответствии с которой кольца планет-гигантов произошли одновременно с образованием планеты как газопылевые протоспутниковые кольца в результате единого динамического процесса сжатия протопланетного сгущения (протопланетной «туманности») и последующей гравитационной неустойчивости образовавшегося протоспутникового диска. Из газопылевых протоспутниковых колец, расположенных за пределами Роша, образовались регулярные спутники планет-гигантов, а из газопылевых протоспутниковых колец, расположенных в пределах Роша, спутники, как правило, не смогли образоваться, и эти кольца эволюционировали в наблюдаемые в настоящее время кольца планет-гигантов.

Основной причиной, в результате которой кольца планет-гигантов сохранились до настоящего времени, является, по-видимому, приливное воздействие планеты, так как кольца находятся на расстоянии от планеты в пределах Роша.

Итак, представленные экспериментальные данные по образованию планетных систем звезд солнечного типа, включая и наблюдаемые газопылевые кольца в протопланетных дисках, могут в полной мере найти свое объяснение только в модели газопылевых колец.

4. Гипотеза Лапласа

Со времен И. Канта [26] и П.С. Лапласа [27] было предложено большое количество гипотез и теорий образования планетных систем солнечного типа [15, 16]. Как показали современные исследования [28 – 32], гипотеза Лапласа оказалась наиболее достоверной. Сам Лаплас критически относился к предложенной им гипотезе: «... но я представляю её с сомнением, которое должно вызывать всё, что не является результатом наблюдения и вычисления». В течение более 100 лет гипотеза Лапласа была популярна. В начале XX века эта гипотеза потеряла свое былое значение. Одним из основных недостатков ее был признан тот факт, что гипотеза была не в состоянии объяснить распределение массы и момента количества движения между Солнцем и

планетами [62]. В связи с представленными результатами исследований следует обратить внимание, что кольцевые структуры («концентрические кольца из паров») в протопланетных дисках, из которых образуются планеты, впервые были предложены именно Лапласом, исходя из анализа характеристик движения планет Солнечной системы [27]. В его гипотезе также представлена вся эволюция колец с образованием протопланетных сгущений и формированием протопланет и их протоспутниковых дисков, которая в общих чертах совпадает с моделью газопылевых колец. И, наконец, образование колец в протоспутниковых дисках, из которых впоследствии образуются спутники, тоже нашло отражение в гипотезе Лапласа. По Лапласу, кольца в протопланетном и протоспутниковом диске возникают в результате вращательной неустойчивости дисков, когда центробежная сила наиболее удаленного от оси вращения слоя диска превышает силу притяжения соответственно Солнца или планеты, что должно приводить к отделению этого слоя от диска и образованию кольца. Это предположение Лапласа также подвергалось многочисленной критике. Основанием для серьезных сомнений в его правильности послужило то, что протопланетный диск («атмосфера Солнца») не мог достаточно быстро вращаться, чтобы сбросить кольцо [62].

Принципиальным отличием модели газопылевых колец от гипотезы Лапласа является совершенно другой механизм образования газопылевых колец, предложенный в модели, который основан на принципе гравитационной неустойчивости. Это кардинально меняет физику явления, но интересно, что общая идея Лапласа – зарождение колец и их эволюция в процессе образования планетной системы Солнца – сохраняется и в модели газопылевых колец.

5. К вопросу о разработке общей теории образования планетных систем и их спутников для звезд солнечного типа

В полной и строгой постановке проблема образования планетных систем звезд солнечного типа, по-видимому, является одной из самых сложных в естественных науках [15].

Как известно [29], в настоящее время общепринятой теорией образования планет Солнечной системы является теория аккумуляции планет из твердых тел и частиц (модель твердотельной аккумуляции) [15, 16]. Естественно, что в первую очередь следует проанализировать возможность построения единой самосогласованной теории образования планетной системы Солнца на основе этой теории [15, 16].

В работах [63 – 65, 8, 12] было показано, что в рамках модели твердотельной аккумуляции при объяснении ряда явлений встречаются значительные трудности. Так, одним из ключевых вопросов в эволюции протопланетного диска в этой модели [15, 16] является образование достаточно крупных тел (зародышей планет), способных продолжать расти с помощью

собственного гравитационного поля. В научной литературе возможность такого объединения малых твердых тел неоднократно подвергалась сомнению [63 – 65].

Экспериментальные и теоретические исследования последних лет [29] показали, что вероятность слипания частиц, когда их размеры увеличиваются до $\gg 10$ см, стремится к нулю. Поэтому не следует ожидать, что объединение частиц при столкновениях может привести к образованию крупных тел размером порядка 1–10 м [66, 67]. Вероятно, в рамках модели твердотельной аккумуляции единственным путем образования планетезималей, из которых затем образуются планеты, является гравитационная неустойчивость пылевого слоя, расположенного в экваториальной плоскости протопланетного диска. Хотя, судя по современным представлениям, и в этой части проблемы появились трудности: возникновение турбулентности в пылевом слое препятствует его уплотнению [29].

С другой стороны, в работах [10, 19] было высказано утверждение, что полная физическая модель образования Солнечной планетной системы должна включать в себя как физические процессы модели протопланетных колец, так и физические процессы, на основе которых построена теория аккумуляции планет из твердых тел и частиц.

5.1. Результаты наблюдений за планетными системами звезд солнечного типа, которые определяют основные положения теоретических моделей образования планет

Для того чтобы оценить, какие физические процессы должны быть включены в первую очередь в физическую модель, обратимся к следующим экспериментальным фактам по образованию планетной системы Солнца и рассмотрим их с точки зрения как модели твердотельной аккумуляции, так и модели газопылевых колец.

1. Коллапс протосолнечной туманности – эта гипотеза подтверждена современными астрофизическими наблюдениями за образованием молодых звезд и их протопланетных дисков [28 – 32].

В теории аккумуляции планет из твердых тел и частиц рассмотрение формирования планет начинается с момента уже сформировавшегося протопланетного диска [15, 16].

В модели газопылевых колец существенное значение имеет начальный этап эволюции протосолнечной туманности: гравитационная неустойчивость протосолнечной туманности, последующий ее коллапс (сжатие) с образованием протопланетного диска с соответствующими характеристиками, что создает условия для последующей гравитационной неустойчивости в протопланетном диске [17, 19].

2. В начале XXI века были открыты газопылевые кольца в протопланетных дисках звезд. На изображениях при астрофизических исследованиях они представляют собой яркие кольцевые газопылевые структуры, разделенные

темными промежутками, в которых плотность газопылевого вещества существенно понижена [20, 23, 24, 25].

Как известно [17, 19], в классической теории твердотельной аккумуляции [15, 16] отсутствует явление, наблюдаемое в астрофизических исследованиях в протопланетных дисках звезд солнечного типа в виде кольцевых газопылевых структур.

В процессе разработки модели газопылевых колец [17, 19] газопылевые кольца, наблюдаемые в астрофизических исследованиях в протопланетных дисках [20, 23, 24, 25], были предсказаны в работах [3 – 5, 8 – 13] и названы протопланетными кольцами [3]. Возникают они в рамках этой модели естественно и красиво в результате гравитационной неустойчивости протопланетного диска [19].

3. Гипотеза о существовании аккреционного газопылевого околопланетного (протоспутникового) диска на определенном этапе эволюции протопланетного диска подтверждена астрофизическими наблюдениями [54].

В классической теории твердотельной аккумуляции [15, 16] нет необходимости вводить газопылевой протоспутниковый диск: в этой модели предполагается существование вращающегося вокруг планеты протоспутникового роя твердых тел, который образовался путем гравитационного захвата тел из протопланетного диска (см. подраздел 3.2). Спутники планеты образуются из этого протоспутникового роя твердых тел путем твердотельной аккумуляции. В работе [45] предпринята попытка сформировать газопылевой протоспутниковый диск путем коаккреции из твердых тел и планетезималей на орбите планеты. Однако такая модель вызывает серьезные возражения, так как вводит существенные инволюционные процессы в общий эволюционный процесс модели (трудно представить образование газовой компоненты в виде водорода при коаккреции из твердых тел).

В модели газопылевых колец, как это было рассмотрено в подразделе 3.1 настоящей работы, протопланета и ее аккреционный газопылевой протоспутниковый диск образуются в процессе эволюции протопланетного кольца из протопланетного сгущения (протопланетной «туманности») подобно протопланетному диску Солнца, не нарушая логику модели.

4. В астрофизических наблюдениях за экзопланетами обнаружено достаточно короткое время жизни протопланетных дисков. Оказалось, что протопланетные диски живут не более 10 миллионов лет. По данным работы [68], среднее время жизни изученных газопылевых дисков составляло 3–6 миллионов лет. Отсюда следует, что экзопланеты должны сформироваться в пределах времени жизни газопылевого диска, т.е. в пределах нескольких миллионов лет.

Теория аккумуляции планет из твердых тел и частиц в стандартном варианте по Сафронову В.С. приводит к выводу, что «...Земля росла в течение $\sim 10^8$ лет...» [15]. В работе [15] также представлены данные, что зародыш

Сатурна, способный захватывать газ путем аккреции, мог вырасти за 500 – 800 млн лет. «Поэтому газ в этой зоне должен был сохраняться около 10^9 лет» Далее, стандартная оценка для Урана и Нептуна дает «неприемлемо большое время аккумуляции для этих планет $\sim 10^{11}$ лет» [16].

Таким образом, теоретические данные о времени образования планет Солнечной системы, полученные в рамках модели твердотельной аккумуляции, существенно превосходят результаты, полученные в ходе астрофизических наблюдений.

В предлагаемой модели газопылевых колец планеты образуются в результате гравитационной неустойчивости среды диска, и время образования планет в этом случае будет значительно меньше, чем в модели твердотельной аккумуляции. В работах [10, 19] было показано, что модель Энеева–Козлова во многих аспектах близка к модели протопланетных колец (модели газопылевых колец), а на временах эволюции с момента распада протопланетного кольца на газопылевые сгущения эти модели практически совпадают. Используя это сходство моделей, в качестве примера приведем данные о времени образования планет в модели Энеева–Козлова по результатам работы Мясникова В.П. и Титаренко В.И. [69]. В этой работе проведено численное моделирование эволюции газопылевого сгущения (протопланеты), имеющего массу, эквивалентную массе Земли с концентрацией примесей изотопов короткоживущего ^{26}Al . Показано, что конденсация протопланеты с приведенными параметрами начинается через 3,3 млн лет. Как видно, эти данные согласуются с результатами астрофизических наблюдений.

5. Как известно [15, 29], планеты Солнечной системы делятся на две группы: планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты внешней области Солнечной системы (планеты–гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Рассмотрим образование планет в этих группах в моделях твердотельной аккумуляции и газопылевых колец.

В модели твердотельной аккумуляции [15, 16] предполагается два сценария образования планет. Первый сценарий, состоящий из одной стадии, разработан для планет земной группы и представляет собой образование планет путем твердотельной аккумуляции твердых тел и частиц. Вторым сценарий предполагает существование двух стадий образования планет для внешней области Солнечной системы. Опишем этот процесс в общих чертах на примере Юпитера [15, 16]. На первой стадии формируется твердотельный зародыш (ядро) Юпитера массой около 10 масс Земли путем твердотельной аккумуляции. На второй стадии происходит аккреция газовой компоненты на образовавшийся твердотельный зародыш.

В модели газопылевых колец [17, 19] предполагается единственный сценарий образования планет для обеих групп планет Солнечной системы. Планеты образуются в результате эволюции протопланетных колец, как это описано в разделе 2 настоящей работы.

6. Экспериментальным фактом является четко выраженная упорядоченность планетной системы Солнца и высокая степень взаимосогласованной устойчивости характеристик движения планет Солнечной системы, что позволило зародиться и эволюционировать разумной жизни на планете Земля [29, 70]. Орбиты планет не пересекаются и расположены не случайным образом: средние радиусы их орбит подчиняются правилу Тициуса–Боде.

Общепринятое положение о происхождении планетной системы Солнца, которое подтверждено современными астрофизическими наблюдениями, заключается в том, что планетная система эволюционировала в наблюдаемое упорядоченное и устойчивое состояние из первоначально хаотически взаимодействующих частиц пыли и газа в протопланетном диске Солнца. Естественно, что предлагаемые модели образования планетной системы Солнца должны объяснить, как произошел этот переход.

В рамках теории образования планет путем аккумуляции твердых тел и частиц [15, 16] трудно объяснить феномен этого перехода. Прежде всего, это связано с тем, что основные физические процессы образования планет (столкновения частиц пыли, пылевых сгущений, твердых тел и их объединение) в модели твердотельной аккумуляции являются стохастическими. Поэтому характеристики образовавшихся планет, в том числе и параметры их орбит, являются случайными величинами. Вот как описывает эту ситуацию Витязев А.В. с соавторами в монографии [16]: «...никакое уточнение и усложнение теории в будущем не позволит чисто теоретически вычислить расстояния, на которых должны сформироваться планеты. Теория (и численные расчеты) при заданном распределении вещества (поверхностной плотности) может дать лишь оценку числа формирующихся планет и относительных расстояний».

Основной гипотезой в модели твердотельной аккумуляции планет является образование достаточно крупных тел (зародышей планет), способных продолжать расти с помощью собственного гравитационного поля [15, 16]. Это – безусловно, правильная гипотеза, но она не гарантирует образования упорядоченной и устойчивой планетной системы. Так, например, Wetherill [71] провел моделирование процесса объединения 500 достаточно крупных тел (10^{24} – 10^{25} г) в зоне планет земной группы. Он пришел к выводу, что растущие Земля и Венера имели значительный шанс столкнуться с двумя–тремя телами лунных размеров или даже с телом, имевшим массу, близкую к массе Меркурия или Марса.

В представлениях модели твердотельной аккумуляции естественной выглядит и модель мегаимпакта – соударения планеты с телом планетарного масштаба, разработанная для образования спутников планет [47].

Следует подчеркнуть, что любое столкновение планетарных тел могло привести к прекращению развития разумной жизни на планете Земля или, в лучшем случае, к ее существенной деградации.

Итак, в модели твердотельной аккумуляции предполагается, что процесс образования планет в протопланетном диске идет путем последовательного процесса взаимодействия пыли и твердых частиц друг с другом и их объединения в тела более крупных размеров, и так постепенно до возникновения зародышей планет, а через них – и к образованию планет.

Принципиально иной механизм образования планетных систем звезд солнечного типа предложен в модели газопылевых колец [17, 19]. В этой модели существенно, что образование звезд, протопланетных дисков и далее протопланет идет путем первоначального единого динамического процесса сжатия (коллапса) газопылевого вещества, заключенного в протозвездной (протосолнечной) туманности, что общепризнанно. Как известно [17, 19], этот процесс запускается с помощью гравитационной неустойчивости среды туманности. На следующем этапе газопылевой протопланетный диск, находясь на стадии начальной эволюции, в результате крупномасштабной гравитационной неустойчивости разделяется на газопылевые протопланетные кольца [17, 19], из которых впоследствии образуются протопланеты и их протоспутниковые диски (см. раздел 2).

В модели газопылевых колец гравитационная неустойчивость среды играет ведущую роль в инициировании крупномасштабных процессов самогравитации, а именно: коллапс протозвездной (протосолнечной) туманности инициирован гравитационной неустойчивостью среды туманности [17, 19]; образование газопылевых протопланетных колец инициировано гравитационной неустойчивостью среды протопланетного диска [17, 19]; образование газопылевых протоспутниковых колец инициировано гравитационной неустойчивостью среды протоспутникового диска (см. подраздел 3.1). Следует отметить, что перечисленные процессы связаны с перемещением и сжатием больших масс газопылевого вещества соответственно: в пределах протозвездной (протосолнечной) туманности; в пределах протопланетного диска и в пределах протоспутникового диска. Естественно, что физические процессы (столкновения частиц пыли, пылевых сгущений, твердых тел и их объединение), на основе которых строится модель твердотельной аккумуляции, идут параллельно в рассматриваемых средах, но на данных этапах не играют существенной роли в силу их незначительной величины по сравнению с физическими процессами, вызванными гравитационной неустойчивостью сред.

Численное моделирование крупномасштабной гравитационной неустойчивости для среды в плоском случае было проведено в работе [12], где достаточно полно описаны особенности этого явления.

Так как в модели газопылевых колец планеты образуются из протопланетных колец в результате их эволюции (см. раздел 2), то и орбиты планет формируются посредством протопланетных колец, структура которых гравитационно сбалансирована. Таким образом планеты как бы «расставляются» на безопасных от столкновений расстояниях. В целом этот

сценарий (в сочетании с приливными взаимодействиями и другими гравитационными воздействиями) и обеспечивает четко выраженную упорядоченность планетной системы Солнца и высокую степень взаимосогласованной устойчивости характеристик движения планет Солнечной системы, что позволило зародиться и эволюционировать разумной жизни на планете Земля.

Таким образом, представленные экспериментальные данные по образованию Солнечной системы находят полное объяснение только в рамках модели газопылевых колец. Отсюда следует, что при построении единой самосогласованной теории образования планетной системы Солнца необходимо учитывать крупномасштабную гравитационную неустойчивость при эволюции протосолнечной туманности на всех этапах, где она проявляется.

5.2. Главный пояс астероидов

Для построения единой самосогласованной теории образования планетной системы Солнца весьма важную информацию, по нашему мнению, может дать анализ образования главного пояса астероидов, расположенного между планетами Марс и Юпитер.

Приведем данные наблюдений за главным поясом астероидов [29, 72, 73, 74]. По некоторым оценкам, в Солнечной системе может существовать не менее миллиона астероидов с размерами выше 1 км и общей массой порядка 5×10^{24} г. Главный пояс астероидов содержит большую часть астероидов Солнечной системы (примерно 99,8%), и к настоящему времени в нем открыто более 6000 астероидов. Примерно половина массы пояса астероидов приходится на 4 крупнейших объекта: Церера, Паллада, Веста и Юнона, их средние диаметры соответственно составляют: 1003 км, 608 км, 538 км, 247 км. Но большинство астероидов главного пояса имеют размеры значительно меньше, вплоть до нескольких десятков метров, а расстояние между ними оценивается в среднем в два миллиона километров. Церера является крупнейшим и наиболее массивным телом в главном поясе астероидов, по размерам превосходящим многие крупные спутники планет-гигантов. В отличие от других тел главного пояса астероидов Церера имеет форму сфероида. В 2006 году астероид Церера официально переведен в статус карликовой планеты. Главный пояс астероидов имеет форму тора. Большие полуоси орбит астероидов заключены в пределах 2,06 – 4,09 а.е., средняя полуось – 2,7 а.е. Орбитальная скорость движения астероидов – около 20 км/с, периоды обращения – от 3 до 9 лет.

Главный пояс астероидов имеет сложную пространственную структуру: «щели Кирквуда», семейства, группы, струйные потоки [29, 72, 74] «Щели Кирквуда» – это пустые области в поясе, где астероиды почти полностью отсутствуют. Примерно 1/3 объектов в поясе входит в семейства, в которые их объединяют по сходству характеристик орбит: эксцентриситет, орбитальный наклон и другие. Когда все пять параметров орбит близки, астероиды относят к одному струйному потоку.

Астероиды главного пояса по составу разделяются в основном на три типа: С (углеродистые), S (силикатные) и М (металлические). С–тип богат на углерод, доминирует над внешними территориями пояса и вмещает более 75% наблюдаемых объектов. По поверхностному составу этот тип астероидов соотносится с углеродистыми медно–хондритовыми метеоритами, а спектры его демонстрируют древнюю Солнечную систему. S–тип (их примерно 15%) чаще встречается во внутренней части пояса при удаленности в 2.5 а.е. от Солнца. Обычно он представлен силикатами и некоторыми металлами. Астероиды М–типа представляют около 10% от общего количества и наполнены железо–никелевым и силикатным соединениями. Существует предположение, что определенная их часть могла появиться из металлических ядер дифференцированных астероидов. Есть также редкая разновидность V–типа (базальтовые).

Существуют различные гипотезы образования главного пояса астероидов. Одна из первых гипотез принадлежит Ольберсу (1803 год). Он полагал, что пояс астероидов образовался в результате разрушения крупной планеты, расположенной между Марсом и Юпитером. Действительно, согласно правилу Тициуса–Боде в этом месте должна была находиться планета. Однако более поздние исследования опровергли гипотезу Ольберса [72, 74]. Аргументами против являются: практическая невозможность формирования крупного объекта типа планеты в области главного пояса астероидов, где этот объект испытывает сильное гравитационное воздействие Юпитера; очень большое количество энергии необходимо, чтобы разрушить целую планету; существующий состав астероидов невозможно объяснить их происхождением, как осколков одной планеты.

С точки зрения теории аккумуляции планет из твердых тел и частиц [15, 16] астероиды – это "строительный" материал для планеты, образование которой было прервано из–за возмущающего действия Юпитера. В результате этого воздействия характерные скорости соударения тел в поясе астероидов достигли 5 км/с, а скорости убегания с поверхности астероидов по крайней мере в 10 раз меньше: для самого крупного, Цереры, она составляет 0,5 км/с. Отметим, что обычно в зоне образования планеты хаотическая скорость тел примерно равна скорости убегания с крупнейшего тела зоны или зародыша планеты [15], что и позволяет планетезималиям объединяться при неупругих столкновениях. В работе [15] также указывается, что десятикратный "разогрев" пояса астероидов не только делает невозможным аккреционное объединение астероидов при взаимных соударениях, но и приводит к их интенсивному столкновительному разрушению.

В рамках модели газопылевых колец предполагается, что протопланетный диск Солнца был гравитационно неустойчив, что вызвало в нем зарождение газопылевых протопланетных колец [17, 19] (см. раздел 2). На месте расположения главного пояса астероидов также образовалось газопылевое протопланетное кольцо (протопланетное кольцо главного пояса астероидов).

Однако обычный ход эволюции этого протопланетного кольца (см. раздел 2) был нарушен сильными гравитационными воздействиями формирующегося Юпитера, и протопланета не смогла образоваться. В силу указанных причин эволюция протопланетного кольца главного пояса астероидов, в отличие от других протопланетных колец Солнечной системы, пошла совершенно по другому пути – по пути, который описывается теорией аккумуляции планет из твердых тел и частиц. Таким образом, в этом случае отличие модели твердотельной аккумуляции от модели газопылевых колец заключается в том, что в модели твердотельной аккумуляции зарождение главного пояса происходило в соответствующей газопылевой зоне протопланетного диска, а в модели газопылевых колец – в газопылевом протопланетном кольце. Дальнейшая эволюция главного пояса в обеих моделях, по-видимому, в общих чертах совпадает.

При анализе результатов наблюдений за главным поясом астероидов обращает на себя внимание слишком малая общая масса астероидов, равная в настоящее время примерно 4% массы Луны. Численное моделирование показало, что начальная масса главного пояса могла быть сопоставима с массой Земли [75]. Последующие исследования позволили восстановить эволюцию главного пояса астероидов. После формирования астероидов большая их часть была выброшена из главного пояса в результате гравитационного воздействия Юпитера. Существенную роль в этом процессе сыграл орбитальный резонанс, который проявляется, когда период обращения астероидов находится в простом целочисленном соотношении с орбитальным периодом Юпитера. В этом случае происходит регулярное сближение астероидов с планетой-гигантом, что вызывает дестабилизацию орбит астероидов в результате увеличения эксцентриситета. Как следствие, орбита теряет устойчивость, что в конечном итоге приводит к выбросу астероидов из области резонанса [76]. Так возникли «щели Кирквуда».

Итак, в результате гравитационного воздействия Юпитера большинство планетезималей оказались раздробленными на фрагменты, большая часть из которых была выброшена из главного пояса астероидов, чем и объясняется его низкая плотность и малая масса. Часть астероидов была выброшена за пределы Солнечной системы, другая часть перешла на вытянутые орбиты, по которым они, попадая во внутреннюю область Солнечной системы, сталкивались с планетами земной группы. Последний феномен получил название интенсивной метеоритной бомбардировки планет земной группы и произошел он примерно 3,9 млрд лет назад [29, 72].

В работе [77] было проведено новое исследование древней лунной породы, доставленной на Землю астронавтами «Аполлона-16» в 1972 году. В пяти образцах, извлеченных из скал, были найдены участки, отвечающие за древнюю «бомбардировку». 30 таких участков были проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии и электронного микроанализа. Оказалось, что по составу они очень напоминают

углеродосодержащие метеориты с хондритовой структурой, которые, в свою очередь, происходят от одного определенного типа астероидов – это астероиды типа С главного пояса. Авторы делают вывод, что именно астероиды ответственны за доставку вещества на Луну в то далекое время. В работе [77] не рассматривался вопрос о причинах возникновения интенсивной метеоритной бомбардировки, на который в настоящее время нет однозначного ответа. Например, существует модель «Ницца» [78], в которой предполагается, что планеты–гиганты Солнечной системы сначала сформировались относительно близко друг к другу, а потом в результате гравитационных взаимодействий мигрировали на современные орбиты. Считается, что эти передвижения произвели значительные гравитационные воздействия на объекты Солнечной системы. Они могли привести к возникновению облака Оорта — далекого скопления комет – и дестабилизировать астероиды главного пояса. Следует отметить, что миграция планет–гигантов в соответствии с моделью «Ницца» не находит объяснения в модели газопылевых колец, так как в этой модели орбиты планет гравитационно сбалансированы еще на стадии образования протопланетных колец.

Из изложенного выше следует, что эволюция главного пояса астероидов достаточно хорошо описывается в модели твердотельной аккумуляции. Этот вывод становится понятным, если принять во внимание, что эта модель разрабатывалась в том числе и на основе физико–химических исследований метеоритов [15, 16, 79].

Таким образом, в модели газопылевых колец физические процессы модели твердотельной аккумуляции начинают проявляться, когда в основном заканчиваются процессы, инициированные крупномасштабной гравитационной неустойчивостью, т.е. после образования планет, спутников или же в случаях, когда процесс образования планеты или спутника был прерван (главный пояс астероидов, кольца планет–гигантов).

5.3. Нерегулярные спутники планет

В отличие от регулярных спутников орбиты нерегулярных спутников сильно вытянуты, наклонены к экваториальной плоскости планеты и находятся на более удаленных расстояниях от планеты. Так, самый дальний регулярный спутник Юпитера обращается на среднем расстоянии $\approx 1,9$ млн км от планеты, а известные нерегулярные спутники движутся на среднем расстоянии до 31 млн км, что сравнимо с размером сферы Хилла Юпитера [29, 39]. В основном нерегулярные спутники обращаются вокруг своей планеты в направлении, обратном ее вращению. Как правило, нерегулярные спутники собраны в группы, в которых присутствует крупный спутник и более мелкие. Например, в группах спутников Юпитера содержится до 17 мелких спутников, которые продолжают двигаться по сходным орбитам [29, 39]. Наблюдаемые характеристики нерегулярных спутников не представляется возможным описать в представлениях моделей, разработанных для регулярных спутников.

Для образования нерегулярных спутников предложены модели захвата планетами–гигантами планетезималей, твердых тел и астероидов из околопланетного пространства, движущихся по гелиоцентрическим орбитам и пересекающих сферу Хилла планеты [29, 39]. При этом группы спутников образуются в результате разрушения захваченного твердого объекта при столкновении его со спутником планеты.

Таким образом, образование нерегулярных спутников укладывается в представления модели твердотельной аккумуляции.

5.4. Модель газопылевых колец как основа построения общей теории образования планетных систем звезд солнечного типа

Проведенный анализ показывает, что единая самосогласованная теория образования планетно–спутниковой системы Солнца может быть построена только на совместных принципах как модели протопланетных колец, так и модели твердотельной аккумуляции. Физическая модель должна включать в себя физические процессы обеих моделей. Однако вклад этих физических процессов в эволюцию протосолнечной туманности на разных ее стадиях существенно различается.

Рассмотрим поэтапно в рамках модели газопылевых колец эволюцию протосолнечной туманности и основные физические процессы, ответственные за эволюцию на этих этапах.

Начальная плотность среды протосолнечной туманности приблизительно составляет $\sim 10^{-18} - 10^{-19}$ г/см³, с массовой долей пыли $\sim 1\%$ и размером частиц пыли $10^{-5} - 10^{-4}$ см [28, 31, 35, 36]. Объединение и слипание частиц пыли на начальной фазе коллапса ничтожно мало.

На стадии коллапса протосолнечной туманности, инициированного гравитационной неустойчивостью ее газопылевой среды, доминирует процесс самогравитационного сжатия туманности.

На начальной стадии эволюции протопланетного диска плотность его среды возрастает по сравнению с начальной плотностью протосолнечной туманности и изменяется в зависимости от радиуса диска в пределах от $\sim 1 \cdot 10^{-8}$ г/см³ до $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ г/см³ [16, 29, 38]. Пылевая компонента среды диска по массе составляет $\sim 1\%$. Размер пылинок по данным современных исследований, включая и результаты современных наблюдений за протопланетными дисками других звезд [29], находится в пределах 0,1–1 см, что значительно превышает размер пылевых частиц в протосолнечной туманности.

На этой стадии эволюции в газопылевой среде протопланетного диска за счет возрастания плотности возникает крупномасштабная гравитационная неустойчивость, в результате которой в диске образуются газопылевые протопланетные кольца на расстояниях, соответствующих орбитам планет [17, 19]. Между орбитами Марса и Юпитера образуется протопланетное кольцо главного пояса астероидов. В промежутках между кольцами газопылевая среда практически отсутствует.

Протопланетные кольца в газопылевой среде протопланетного диска зарождаются в зонах диска, на которые он разделяется в результате гравитационной неустойчивости. Образование колец происходит путем самогравитационного сжатия вещества в возникших зонах диска [6, 12].

По астрофизическим наблюдениям, размеры твердых частиц в протопланетных кольцах в начальной фазе их эволюции могут достигать сантиметровых размеров [20, 23, 24, 25].

Процесс самогравитационного сжатия вещества в возникших зонах диска преобладает над процессами твердотельной аккумуляции. В то же время столкновения частиц пыли, пылевых сгущений, твердых частиц и их объединение происходит на этом этапе более интенсивно.

Как правило, протопланетное кольцо эволюционирует с образованием протопланетной «туманности» (см. раздел 2). Однако протопланетное кольцо не является независимым образованием. В системе протопланетных колец оно гравитационно взаимодействует со всеми кольцами. Фрагментация протопланетного кольца и дальнейшая его эволюция зависят как от гравитационной устойчивости самого кольца, так и от воздействий на него со стороны других колец и зарождающихся в них протопланет. В силу этого разные кольца в образовавшейся структуре колец обладают существенно отличающимися эволюционными характеристиками, что подтвердили современные астрофизические исследования кольцевых структур протопланетных дисков звезд солнечного типа [20, 23, 24, 25]. Существует предположение, что формирование планеты Юпитер происходило значительно раньше некоторых других планет и существенно опережало эволюцию протопланетного кольца главного пояса астероидов [16]. По-видимому, основной причиной, которая нарушила обычную эволюцию протопланетного кольца главного пояса астероидов с образованием протопланеты, было гравитационное воздействие растущего Юпитера на это кольцо (см. подраздел 5.2). В этих условиях протопланетное кольцо главного пояса астероидов, в отличие от других протопланетных колец Солнечной системы, стало эволюционировать в соответствии с теорией аккумуляции планет из твердых тел и частиц [15, 16]. Такой ход эволюции кольца в окружении формирующихся планет, которые оказывали на него гравитационные воздействия, привел к образованию не планеты, а пояса астероидов. Хотя следует отметить, что в составе главного пояса астероидов образовалась и карликовая планета Церера.

Остальные протопланетные кольца Солнечной системы эволюционировали с образованием протопланетных «туманностей» (см. раздел 2). На этом этапе эволюции протопланетных колец ведущую роль играли физические процессы фрагментации колец на газопылевые сгущения и последующего их объединения в протопланетную «туманность».

Эволюция протопланетной «туманности» происходит подобно эволюции протосолнечной туманности. Под действием самогравитации из

протопланетной «туманности» образуется протопланета и ее аккреционный газопылевой протоспутниковый диск (см. подраздел 3.1). На этом этапе преобладают процессы самогравитационного сжатия среды протопланетной «туманности», а образовавшиеся в этой среде в результате твердотельной аккумуляции твердые частицы и более крупные твердые образования включаются в общий процесс сжатия с образованием протопланеты и далее планеты. На определенном этапе сжатия протопланетной «туманности» в результате совместного действия самогравитации и закона сохранения момента количества движения образуется газопылевой протоспутниковый диск планеты.

Эволюция протоспутникового диска планеты происходит подобно эволюции протопланетного диска. На определенном этапе эволюции в результате гравитационной неустойчивости среды протоспутникового диска происходит образование газопылевых протоспутниковых колец. Эволюция протоспутниковых колец, орбиты которых находятся за пределами Роша, заканчивается образованием регулярных спутников (см. подраздел 3.1). Протоспутниковые кольца, расположенные в пределах Роша, испытывают сильное гравитационное воздействие планеты – приливное воздействие, которое препятствует образованию спутника. Эволюция этих газопылевых колец, как правило, развивается по сценарию модели твердотельной аккумуляции. Подобные кольца планет–гигантов эволюционировали в наблюдаемые в настоящее время кольца этих планет.

Образование нерегулярных спутников, в отличие от регулярных, следует теории аккумуляции планет из твердых тел и частиц.

Таким образом, на основе модели газопылевых колец с включением также принципов модели твердотельной аккумуляции построена общая физическая модель планетных систем звезд солнечного типа, которая описывает образование как планет, так и их спутников.

6. Хаос и самоорганизация при образовании Солнечной системы

Во многих работах [29, 70, 80] утверждается, что Солнечная система в настоящее время имеет высокую степень упорядоченности. С этим нельзя не согласиться. По-видимому, не случайно Резерфорд предложенную им модель атома назвал планетарной моделью, в которой электроны вращаются вокруг ядра подобно планетам Солнечной системы. Каким образом произошла высокая самоорганизация Солнечной системы, которая эволюционировала из первоначально хаотического состояния?

М. Я. Маров, рассматривая самоорганизацию Солнечной системы в рамках традиционных моделей, приходит к выводу, что самоорганизация была обеспечена гравитацией и приливными взаимодействиями [29, 80].

В модели газопылевых колец, которая предложена в данной работе, можно детально проследить за эволюцией Солнечной системы и ее самоорганизацией.

Эволюция Солнечной системы есть эволюция протосолнечной туманности, которая рассмотрена в разделах 2 и 3 настоящей работы. Остановимся на основных моментах самоорганизации протосолнечной туманности в рамках предложенной модели. Безусловно, основную роль в самоорганизации Солнечной системы на всех этапах ее эволюции играет закон всемирного тяготения в сочетании с законом сохранения ее момента количества движения. Вместе с тем в процессе образования Солнечной системы отчетливо просматриваются в зависимости от времени несколько основных циклов самоорганизации, каждый из которых был инициирован крупномасштабной гравитационной неустойчивостью среды определенного пространства протосолнечной туманности.

Первый цикл самоорганизации начался с коллапса (стремительного сжатия) протосолнечной туманности и, как известно [17, 19], был инициирован гравитационной неустойчивостью ее среды. Закончился первый цикл самоорганизации образованием Солнца и протопланетного диска (см. раздел 2).

Второй цикл самоорганизации был инициирован крупномасштабной гравитационной неустойчивостью среды протопланетного диска и привел к разделению диска на протопланетные кольца, из которых образовались протопланеты и их протоспутниковые диски. Следует подчеркнуть, что, формируя протопланетные кольца, природа как бы «расставляет» будущие планеты на безопасных от столкновений расстояниях, обеспечивая тем самым устойчивость планетной системы.

Третий цикл самоорганизации был инициирован крупномасштабными гравитационными неустойчивостями сред протоспутниковых дисков и закончился образованием регулярных спутников планет и колец планет-гигантов Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна. Как видно, каждый цикл самоорганизации приводил Солнечную систему к более высокому уровню упорядоченности (порядка).

Каждый из рассмотренных циклов самоорганизации Солнечной системы имеет сложную структуру и требует отдельного рассмотрения, которое выходит за рамки данной работы.

Между циклами самоорганизации должны находиться точки бифуркации. К одной из первых работ, в которой исследовалась эта область самоорганизации в протопланетном диске, по-видимому, можно отнести работу [12].

Как известно [3, 17, 19], при построении математической модели образования Солнечной системы на каждом цикле самоорганизации должны учитываться особенности физической модели и соответственно включаться все физические процессы, значимые для данной области цикла.

В самоорганизации Солнечной системы в модели газопылевых колец обращает на себя внимание эффективность, с которой вещество протопланетного диска аккумулируется в планеты и спутники. Вероятно, невозможно представить более совершенный и эффективный способ

образования планет и спутников, чем механизм с использованием принципа крупномасштабной гравитационной неустойчивости.

7. Заключение

В настоящей работе предложена модель газопылевых колец, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей, что приводит к образованию газопылевых протопланетных колец в протопланетном диске и газопылевых протоспутниковых колец в протоспутниковых дисках в звездах солнечного типа. В этой модели в результате эволюции из газопылевых протопланетных колец формируются протопланетные сгущения (протопланетные «туманности»), из которых впоследствии образуются протопланеты и их протоспутниковые диски. Протоспутниковые диски в результате их гравитационной неустойчивости разделяются на газопылевые протоспутниковые кольца, из которых происходят регулярные спутники планеты.

Показано, что в представленной модели находят свое естественное объяснение такие наблюдаемые явления и факты в Солнечной системе, как подобие спутниковых систем планет–гигантов и планетной системы Солнца; высокая степень упорядоченности Солнечной системы; долговременная устойчивость планетной системы Солнца, что способствовало зарождению и эволюции разумной жизни на планете Земля; кольца планет–гигантов; образование главного пояса астероидов.

На основе модели газопылевых колец предложена физическая модель единой самосогласованной теории образования планетной системы Солнца, которая объединяет как физические процессы модели газопылевых колец, так и модели твердотельной аккумуляции.

Рассмотрены некоторые вопросы хаоса и самоорганизации при образовании Солнечной системы.

Результаты научных исследований, которые вошли в настоящую работу, были в основном получены в рамках выполнения Программ фундаментальных исследований Президиума РАН, научным руководителем которых являлся академик Галимов Э.М. Эти результаты неоднократно обсуждались на отчетных конференциях в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН и на международных конференциях. Автор признателен академику Галимову Э.М. за поддержку, внимание и обсуждение результатов научных исследований.

Автор выражает глубокую благодарность Жукову В.Т., Меньшову И.С., Долголевой Г.В., Плинер Л.А., Забродиной Е.А. за интерес к работе и полезные обсуждения. Автор также выражает искреннюю признательность Гавреевой М.С. за помощь в оформлении работы.

Библиографический список

1. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Механизм аккумуляции планетарных тел. Программа № 25 фундаментальных исследований Президиума РАН. М.: 2004.
2. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Численное моделирование эволюции протопланетного диска Солнца на начальной ее стадии. Программа № 25 фундаментальных исследований Президиума РАН. М.: 2006, инв. № 8-3-06.
3. Забродин А.В., Забродина Е.А., Легкоступов М.С., Мануковский К.В., Плинер Л.А. Некоторые модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2006. № 70. 44 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2006-70>.
4. Zabrodin A.V., Zabrodina E.A., Legkostupov M.S., Manukovskii K.V. and Pliner L.A. Some Models for the Protoplanetary Disk of the Sun at the Initial Stage of its Evolution // Problems of Biosphere Origin and Evolution, vol. 1 (Editor E.M. Galimov). New York: Nova Science Publishers, Inc.2013. P. 405.
5. Забродин А.В., Забродина Е.А., Легкоступов М.С., Мануковский К.В., Плинер Л.А. Некоторые модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции // Проблемы зарождения и эволюции биосферы. (Под ред. Э.М. Галимова). М.: Либроком, 2008. С. 297–316.
6. Brushlinskii K.V., Pliner L.A., Zabrodina E.A., Menshov I.S., Zhukov V.T., Dolgoleva G.V., Legkostupov M.S. Gravitational instability in the Proto planet disk // III International conference BIOSPHERE ORIGIN AND EVOLUTION / Abstracts. – Rithymno, Crete, Greece, october 16–20, 2011. P. 31–33.
7. Брушлинский К.В., Долголева Г.В., Жуков В.Т., Забродина Е.А., Легкоступов М.С., Меньшов И.С., Плинер Л.А. К вопросу об эволюции протопланетного диска Солнца // Проблемы зарождения и эволюции биосферы. Научный сборник под ред. академика Э.М. Галимова. М.: Красанд, 2013. С. 33–46.
8. Легкоступов М.С. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть I. Постановка задачи // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 34. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-34>
9. Легкоступов М.С. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть II. Дисперсионные уравнения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 35. 33 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-35>
10. Легкоступов М.С. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть III. К развитию и обоснованию модели // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2014. № 36. 24 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-36>

11. Долголева Г.В., Легкоступов М.С., Плинер Л.А. Численное моделирование гравитационной неустойчивости протопланетного диска в одномерном приближении. Часть I. Однородная изотропная среда // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2016. № 49. 44 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-49>
12. Долголева Г.В., Легкоступов М.С., Плинер Л.А. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца // Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 2. С. 130–148.
13. Dolgoleva G.V., Legkostupov M.S., Pliner L.A. On the issue of the Solar protoplanetary disk // Mathematical models and computer simulations. 2018. Vol. 10. № 5. P. 616–628.
14. Menshov I.S., Zhukov V.T., Legkostupov M.S., Pliner L.A., Dolgoleva G.V., Zabrodina E.A. On the problem of the gravitational instability of the protoplanetary disk of the Sun // 81st annual meeting of the Meteoritical Society // Abstracts. – July 22 – 27, 2018, Moscow, Russia; Meteoritics and Planetary Science. 2018. Vol. 53. № S1. P. 6017.
15. Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
16. Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
17. Легкоступов М.С. К вопросу о модели образования планетных систем звезд // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 229. 31 с. doi:10.20948/prepr-2018-229 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-229>
18. Легкоступов М.С. К вопросу об астрофизических исследованиях протопланетных дисков звезд // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 6. 19 с.
19. Легкоступов М.С. К вопросу о модели образования планетных систем звезд солнечного типа // Математическое моделирование. 2020. Т. 32. № 3. С. 81 – 101.
20. Osorio M., Anglada G., Carrasco-González C., et al. Imaging the inner and outer gaps of the pre-transitional disk of HD 169142 at 7 mm // Astrophys. J. Lett. 2014. Vol. 791. L36.
21. Brogan C.L., et al.: (ALMA Partnership), The 2014 ALMA long baseline campaign: first results from high angular resolution observations toward the HL Tau region // Astrophys. J. Lett. 2015. Vol. 808. L3.
22. Dong R., Zhu Z., and Whitney B. Observational signatures of planets in protoplanetary disks. I. Gaps opened by single and multiple young planets in disks // The astrophysical journal letters. 2015. Vol. 809. № 1.

23. Carrasco–González C., Henning T., Chandler C.J., et al. The VLA view of the HL TAU disk: disk mass, grain evolution, and early planet Formation // *The astrophysical journal letters*. 2016. Vol. 821. № 1. L16.
24. Andrews S.M., Wilner D.J., Zhu Z., Birnstiel T., Carpenter J.M., Pérez L. M., Bai X.–N., Öberg K. I., Hughes M., Isella A. Ringed substructure and a gap at 1 au in the nearest protoplanetary disk // *Astrophys. J. Lett.* 2016. Vol. 820. L40.
25. Fedele D., Tazzari M., Booth R., et al. ALMA continuum observations of the protoplanetary disk AS 209 // *A&A*. 2018. Vol. 610. A24.
26. Кант И. Всеобщая естественная история и теория неба // Кант И. Сочинения в шести томах. Т. 1. М.: Мысль, 1963. 543 с.
27. Лаплас П.С. Изложение системы мира. Л.: Наука, 1982. 376 с.
28. Сурдин В.Г. Рождение звезд. М.: URSS, 2001. 264 с.
29. Кусков О.Л., Дорофеева В.А., Кронрод В.А., Макалкин А.Б. Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. М.: ЛКИ, 2009. 576 с.
30. Beckwith S.V.W., Sargent A.I., Chini R.S., Gusten R. A survey for circumstellar disks around young stellar object // *Astron. J.* 1990. Vol. 99. P. 924 – 945.
31. Reipurth B., Jewitt D., Keil K. (eds). Protostars and planets V. Tucson // Univ. Arisona Press, 2007. 951 p.
32. Calvet N., D’Alessio P., Hartmann L. et al. Evidence for a Developing Gap in a 10 Myr Old Protoplanetary Disk // *Astrophys. J.* 2002. Vol. 568. P. 1008–1016.
33. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. Строение протопланетного аккреционного диска вокруг Солнца на стадии Т Тельца // *Астр. вест. Исследования Солнечной системы*. 1995. Т. 29. № 2. С. 99.
34. Происхождение солнечной системы // Сборник статей под редакцией Г.Ривса. М.: Мир, 1976. 569 с.
35. Larson R.B. The collaps of rotating cloud // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1972. Vol. 156. № 4. P. 437 – 458.
36. Larson R.B. The evolution of spherical protostars with masses 0,25 M_c to M_c . // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1972. Vol. 157. № 2. P. 121 – 145.
37. Jeans J. H. *Astronomy and cosmogony*. Cambridge, 1929.
38. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А., Рускол Е.Л. Моделирование аккреционного протоспутникового диска Юпитера: оценка основных параметров // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. №6. С. 518–526.
39. Canup R.M., Ward W. R. Formation of the Galilean satellites: Condition of accretion // *Astronom. J.* 2002. Vol. 124. P. 3404–3423.

40. Coradini A., Federico C., Forni O., Magni G. Origin and thermal evolution of icy satellites // *Surv. Geophys.* 1995. Vol. 16. P. 533–591.
41. Mousis O., Gautier D. Constraints on the presence of volatiles in Ganymede and Callisto from an evolutionary turbulent model of the Jovian subnebula // *Planet. Space Sci.* 2004. Vol. 52. P. 361–370.
42. Alibert Y., Mousis O. Formation of Titan in Saturn's subnebula: constraints from Huygens probe measurements // *Astronomy and Astrophysics.* 2007. Vol. 465. №3. P. 1051–1060.
43. Pollack J. B., Reynolds R. T. Implications of Jupiter's early contraction history for the composition of the Galilean satellites // *Icarus.* 1974. Vol. 21. P. 248–253.
44. Korycansky D. G., Pollack J. B., Bodenheimer P. Numerical models of giant planet formation with rotation // *Icarus.* 1991. Vol. 92. P. 234–251.
45. Рускол Е.Л. Происхождение спутников Юпитера и Сатурна в аккреционных дисках // *Астрон. вестн.* 2006. Т. 40. №6. С. 499–504.
46. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. Модели протоспутникового диска Сатурна: условия образования Титана // *Астрон. вестн.* 2006. Т. 40. №6. С. 483–498.
47. Hartmann W.K., Davis D.R. Satellite-sized planetesimals and lunar Origin // *Icarus.* 1975. Vol. 24. P. 504 – 515.
48. Галимов Э.М. Проблема происхождения Луны // *Основные направления геохимии.* Под ред. Э. М. Галимова. М.: Наука, 1995. С. 8–43.
49. Боярчук А.А., Рускол Е.Л., Сафронов В.С., Фридман А.М. Происхождение Луны: спутниковый рой или мегаимпакт? // *Докл. РАН.* 1998. Т. 361. №4. С. 481–484.
50. Галимов Э.М. О происхождении вещества Луны // *Геохимия.* 2004. №7. С. 691–706.
51. Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В., Легкоступов М.С., Энеев Т.М., Сидоров Ю.И. Динамическая модель образования системы Земля–Луна // *Геохимия.* 2005. № 11. С. 1139 – 1150.
52. Галимов Э.М. Образование Земли и Луны из общего супрапланетного газопылевого сгущения // *Геохимия.* 2011. № 6. С. 563 – 580.
53. Галимов Э.М. Анализ изотопных систем (Hf–W, Rb–Sr, J–Pu–Xe, U–Pb) применительно к проблеме формирования планет на примере системы Земля–Луна // *Проблемы зарождения и эволюции биосферы.* Научный сборник под ред. академика Э.М. Галимова. М.: Красанд, 2013. С. 47 – 59.
54. Isella A., Benisty M., Teague R., Bae J., Keppler M., Facchini S., Pérez L. Detection of Continuum Submillimeter Emission Associated with Candidate Protoplanets // *Astrophys. J. Lett.* 2019. Vol. 879. № 2. L25.

55. Siddiqi A. A. *Beyond Earth: A Chronicle of Deep Space Exploration, 1958–2016*. National Aeronautics and Space Administration, Office of Communications, NASA History Division. 2018.
56. Harland D.M. *Mission to Saturn: Cassini and the Huygens probe*. Springer Science & Business Media. 2002.
57. Nicholson P.D., et al. A close look at Saturn's rings with Cassini VIMS // *Icarus*. 2008. Vol. 193. № 1. P. 182–212.
58. Порко К. «КАССИНИ» У САТУРНА // *В мире науки*. 2017. № 12. С. 118–127.
59. O'Donoghue J., Moore L., Connerney J., Melin H., Stallard T. S., Miller S., Baines K. Y. Observations of the chemical and thermal response of 'ring rain' on Saturn's ionosphere // *Icarus*. 2019. Vol. 322. P. 251–260.
60. Iess L., Militzer B., Kaspi Y., Nicholson P., Durante D., Racioppa P., Anabtawi A., Galanti E., Hubbard W., Mariani M. J., Tortora P., Wahl S., Zannoni M. Measurement and implications of Saturn's gravity field and ring mass // *Science*. 2019. Vol. 364, № 6445.
61. Cuzzi J. N., Estrada P. R. Compositional evolution of Saturn's rings due to meteoroid bombardment // *Icarus*. 1998. Vol. 132. № 1. P. 1–35.
62. Струве О.В., Зебергс В. *Астрономия 20 века*. М.: Мир, 1968. 551 с.
63. Gold T. Problems requiring solution // *Origin of solar system*. R. Jastrow, A. Cameron. (Eds.). Acad. Press. N. Y. – London, 1963. P. 171.
64. Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем // *Астр. вест.* 1981. Т. XV. № 2. С. 80–94.
65. Ларин В.Н. *Гипотеза изначально гидридной Земли*. М.: Недра, 1980. 216 с.
66. Sekiya M., Takeda H. Were planetesimals formed by dust accretion in the solar nebula? // *Earth Planets Space*. 2003. V. 55. P. 263–269.
67. Chiang E.I. Dust in Protoplanetary Disks // *Astrophysics of Dust*. ASP Conference Series. 2004. V. 309. Proceed. Conf. 26–30 May.
68. Haisch K. E., Lada E. A., Lada C. J. Disk frequencies and lifetimes in young clusters // *Astrophys. J.* 2001. V. 553. P. L153–L156.
69. Мясников В.П., Титаренко В.И. Эволюция самогравитирующих сгустков газопылевой туманности, участвующих в аккумуляции планетных тел // *Астр. вест.* 1989. Т. XXIII. № 1. С. 14 – 26.
70. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Модели образования планетной системы Солнца в свете зарождения в ней разумной жизни. Программа № 28 фундаментальных исследований Президиума РАН. М.: 2014.

71. Wetherill G.W. Occurrence of Giant Impacts during the growth of the terrestrial planets // *Science*. 1985. V. 228. P. 877 – 879.
72. Прокофьева В.В., Таращук В.П., Горькавый Н.Н. Спутники астероидов // *Успехи физических наук*. 1995. Т. 165. № 6. С. 661–689.
73. Горькавый Н.Н. Образование Луны и двойных астероидов // *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* 2007. Т. 103. №2. С. 143–155.
74. Симоненко А.Н. Астероиды. М.: Наука, 1985. 208 с.
75. Petit J.M., Morbidelli A., Chambers J. The Primordial Excitation and Clearing of the Asteroid Belt // *Icarus*, 2001. Vol. 153. № 2. P. 338–347.
76. Fernie J. D. The American Kepler // *American scientist*. 1999. Vol. 87. № 5. P. 398–401.
77. Joy K.H., Zolensky M.E., Nagashima K., Huss G.R., Ross D.K., McKay D.S., Kring D.A. Direct Detection of Projectile Relics from the End of the Lunar Basin-Forming Epoch // *Science*. 2012. Vol. 336. Issue 6087. P. 1426 –1429.
78. Batygin K., Brown M. E. Early dynamical evolution of the Solar System: Pinning down the initial conditions of the Nice model // *The Astrophysical Journal*. 2010. Vol. 716. №. 2. P. 1323 – 1331.
79. Urey H. C. Diamonds, Meteorites, and the Origin of the Solar System // *The Astrophysical Journal*. 1956. Vol. 124. P. 623.
80. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2014. 648 с.

Оглавление

1. Введение	3
2. Образование планет в планетных системах звезд солнечного типа в модели протопланетных колец	4
3. Образование спутников планет в планетных системах звезд солнечного типа	6
3.1. Образования регулярных спутников планет в модели газопылевых колец	6
3.2. Образования спутников планет в модели твердотельной аккумуляции и в других моделях	7
3.3. Экспериментальные данные по образованию планетных систем звезд солнечного типа и их трактовка с позиций различных теоретических моделей	8
4. Гипотеза Лапласа	10
5. К вопросу о разработке общей теории образования планетных систем и их спутников для звезд солнечного типа	11
5.1. Результаты наблюдений за планетными системами звезд солнечного типа, которые определяют основные положения теоретических моделей образования планет	12
5.2. Главный пояс астероидов	17
5.3. Нерегулярные спутники планет	20
5.4. Модель газопылевых колец, как основа построения общей теории образования планетных систем звезд солнечного типа	21
6. Хаос и самоорганизация при образовании Солнечной системы	23
7. Заключение	25
Библиографический список	26