



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

Препринты ИПМ • Препринт № 229 за 2018 г.



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

Легкоступов М.С.

К вопросу о модели  
образования планетных  
систем звезд

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** 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](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-229)  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-229>

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

**М.С. Легкоступов**

**К вопросу о модели образования  
планетных систем звезд**

**Москва — 2018**

## **Легкоступов М.С.**

К вопросу о модели образования планетных систем звезд

Представлена модель образования планетных систем звезд, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных колец) в протопланетном диске.

**Ключевые слова:** протосолнечная туманность, коллапс, протопланетный газопылевой диск, гравитационная неустойчивость, протопланетное газопылевое кольцо, планетная система

## **Michail Semenovich Legkostupov**

To the question of the formation model of planetary systems of stars

The model of the formation of planetary systems of stars is presented, which is based on the origin and development of large-scale gravitational instabilities (protoplanetary rings) in a protoplanetary disk.

**Key words:** protosolar nebular, collapse, protoplanetary gas-dust disk, gravitational instability, protoplanetary gas-dust ring, planetary system

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 17.

## **Введение**

Основные положения модели образования Солнечной планетной системы, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных газопылевых колец) в протопланетном диске Солнца, были опубликованы в работах [1–4, 7–12]. К этому же направлению принадлежат работы [5, 6, 13]. В настоящее время в научных кругах появился интерес к этой модели, в публикациях других авторов приводятся ссылки на них, на международной конференции (81-я ежегодная конференция международного Метеоритного Общества, Москва, 22 – 27 июля 2018 года [13]) прошло обсуждение модели. Чтобы исключить неточности в интерпретации предложенной модели, представляется целесообразным опубликовать модель образования Солнечной планетной системы, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (модель протопланетных колец), в достаточно полном изложении.

Астрофизические исследования последних лет привели к неожиданному открытию газопылевых колец в протопланетных дисках звезд [14, 15, 16, 17], которые были предсказаны при разработке модели крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных газопылевых колец) [1–4, 7–12]. В данной работе представлен анализ результатов астрофизических исследований по работам [14, 15, 16, 17], исходя из представлений модели протопланетных колец.

По нашим представлениям, невозможно правильно описать образование планетной системы Солнца без рассмотрения его в рамках единого процесса сжатия (коллапса) протосолнечной туманности [3, 9], в результате которого сформировался протопланетный диск Солнца и далее планетная система.

В научной литературе в настоящее время нет установившегося определения протопланетного газопылевого диска Солнца, встречаются различные его названия: «околосолнечный газопылевой диск», «солнечная туманность» (solar nebular) или «допланетное облако» и др. Поэтому для правильного понимания представленных исследований вводятся следующие определения. Протосолнечная туманность – это межзвездное газопылевое облако, в котором начинался коллапс и формировалось Солнце. Околосолнечное газопылевое облако (околосолнечное облако) – это вращающееся газопылевое облако, которое окружает образующееся Солнце. Протопланетный газопылевой диск Солнца (протопланетный диск) – это околосолнечное газопылевое облако после отделения его от Солнца.

### **1. Основные положения модели образования Солнечной планетной системы, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных газопылевых колец) в протопланетном диске**

**1.** В данных исследованиях предполагается, что Солнце и его планетная система образовались из вращающейся газопылевой протосолнечной

туманности в результате единого динамического процесса ее сжатия – коллапса, аналогично, как это было предсказано Кантом [18] и Лапласом [19]; [20], [21]. Этот процесс можно условно разделить на две стадии: образование звезды (Солнца) с формирующимся околосолнечным газопылевым облаком и образование протопланетного газопылевого диска с последующим образованием планет.

**2.** Протосолнечная туманность в начальном ее состоянии представляла собой вращающееся газопылевое облако с плотностью  $\sim 10^{-18}$ – $10^{-19}$  г/см<sup>3</sup>; температурой  $\sim 10^0$  К; массой, приблизительно равной массе Солнца, и массовой долей пыли  $\sim 1\%$ , которое удерживалось собственной гравитацией [22, 23, 24, 25]. Более точные оценки показывают, что масса протосолнечной туманности на 10–30% больше солнечной [28]. Известно, что в таком состоянии изолированное облако гравитационно устойчиво [26].

Каким образом облако перешло в гравитационно неустойчивое состояние? Общепринятая точка зрения заключается в том, что произошло внешнее воздействие (возмущение), которое перевело протосолнечную туманность в состояние гравитационной неустойчивости и привело к последующему ее коллапсу. Возможны несколько явлений, которые могли привести к таким внешним возмущениям: вспышка сверхновой [27]; сжатие протосолнечной туманности при ее прохождении через спиральный рукав [28]; образование массивной звезды вблизи протосолнечной туманности [29].

Это была первая гравитационная неустойчивость при образовании Солнечной планетной системы.

**3.** Формирование Солнца как звезды произошло за промежуток времени, равный примерно  $0,1 \cdot 10^6$  лет [21]. Солнце за этот период (первая стадия) аккумулировало около 90% своей массы. В это же время (одновременно с формированием Солнца) происходило образование околосолнечного облака. На стадии формирования Солнца околосолнечное газопылевое облако являлось аккреционным, т.е. существовал поток газопылевой среды из облака на Солнце. На этой стадии в основном произошло не только перераспределение массы между околосолнечным облаком и Солнцем, но и перераспределение между этими объектами момента количества движения. При выходе Солнца на главную последовательность оказалось, что масса протосолнечной туманности на  $\approx 99\%$  сосредоточена на Солнце, а момент количества движения на  $\approx 98\%$  связан с протопланетным диском.

**4.** Вторая стадия формирования Солнечной системы соответствует стадии Т Тельца до выхода Солнца на главную последовательность [21, 20, 24, 25]. К началу второй стадии аккреционный поток резко уменьшается и околосолнечное газопылевое облако отделяется от Солнца, образуя протопланетный газопылевой диск. Этот процесс объясняется тем, что среда протосолнечной туманности изначально вращается. При падении слоя вещества диска на Солнце в силу сохранения его момента количества движения скорость вращения этого слоя возрастает. Слой вещества протопланетного диска

останавливается, когда центробежная сила этого слоя сравнивается с силой притяжения Солнца. К этому времени вокруг Солнца может сохраниться лишь незначительная по массе прозрачная часть аккреционной оболочки. Более значительная ее часть находится вдали от звезды в виде тора, окружающего звезду и входящего в состав протопланетного диска. На второй стадии идет более медленное формирование протопланетного диска Солнца, и эта стадия по ее продолжительности оценивается примерно в  $10^6$ – $10^7$  лет [21, 25, 20].

На начальной стадии эволюции протопланетного диска, пока процессы концентрации его пылевой компоненты не привели к существенному изменению среды диска, хотя и локальному, состояние его газопылевой среды можно с достаточной точностью описывать уравнением состояния идеального газа [30].

**5.** Плотность протопланетного диска, образующегося в результате коллапса, резко возрастает по сравнению с плотностью протосолнечной туманности. Например, планетная система Земля–Луна образовалась из зоны протопланетного диска Солнца, находящейся на расстоянии около 1 а.е. от Солнца. Средние параметры среды этой зоны диска следующие: плотность  $\sim 3 \cdot 10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>, температура  $\sim 300^\circ\text{K}$  [30]. Видно, что в результате сжатия протосолнечной туманности плотность протопланетного диска увеличилась примерно на десять порядков по сравнению с плотностью протосолнечной туманности. Именно столь значительное увеличение плотности протопланетного диска привело его в состояние гравитационной неустойчивости и к дальнейшему образованию планет.

**6.** В результате коллапса протосолнечной туманности вокруг Солнца образовался протопланетный диск в состоянии гравитационной неустойчивости. Это вторая гравитационная неустойчивость при коллапсе протосолнечной туманности. Для того чтобы в среде диска начала развиваться гравитационная неустойчивость, необходимы соответствующие возмущения среды диска [32, 26, 11]. Такие возмущения зарождаются при резком уменьшении аккреционного потока из диска на Солнце. Возмущения имеют симметрию радиального возмущения и в результате гравитационной неустойчивости среды диска из них образуются протопланетные газопылевые кольца, которые соответствуют зонам планет Солнечной системы.

**7.** Протопланетное кольцо при трехмерном рассмотрении, как правило, гравитационно неустойчиво и фрагментирует, в общем случае, на несколько газопылевых сгущений, которые, взаимодействуя между собой, сталкиваясь и объединяясь, и приводят к образованию протопланеты и ее спутников (спутника).

**8.** Процесс образования планетного тела происходит внутри протопланетного облака путем передвижения пылевой компоненты под действием гравитационного поля облака в центральную его часть, где и формируется тело планеты.

**9.** Газовая составляющая протопланетных облаков земной группы выносятся из них солнечным ветром, когда Солнце находится на стадии Т Тельца. По разным источникам информации продолжительность солнечного ветра несколько различается [33, 21, 25], но, вероятно, ее можно оценить равной примерно  $10^6$  лет.

**10.** В процессе образования Солнечной планетной системы основная масса газопылевого вещества протопланетного диска аккумулируется в протопланетах и их спутниках. Однако часть этого вещества оказывается вне этой системы. Поведение вещества, которое оказалось вне протопланет и их спутников, происходит по законам теории (модели) твердотельной аккумуляции, разработанной и подробно исследованной Шмидтом О.Ю., Сафроновым В.С. и его учениками [34, 30].

## **2. Анализ данных, относящихся к образованию Солнечной планетной системы, и обоснование модели протопланетных колец**

В данном разделе приводится обоснование положений модели протопланетных колец, представленных в разделе 1.

### **2.1. К положению 1 модели протопланетных колец**

Гипотезы образования Солнца и солнечной системы можно разделить на две группы [30]. Первая из них восходит к классическим гипотезам Канта [18] и Лапласа [19] о совместном образовании Солнца и его планетной системы из единой протосолнечной газопылевой туманности. Вторая группа гипотез предполагает раздельное образование Солнца и его протопланетного диска, из которого впоследствии сформировались планеты [30].

В данных исследованиях предполагается верной гипотеза о совместном образовании Солнца и его планетной системы из единой протосолнечной газопылевой туманности, которая подтверждена и современными наблюдениями за образованием молодых звезд и их протопланетных дисков [22, 28, 35, 23, 36].

### **2.2. К положению 2 модели протопланетных колец**

Гравитационная неустойчивость (по Джинсу) – это есть нарастание со временем пространственных возмущений плотности и скорости среды под действием сил самогравитации [37]. Развитие гравитационной неустойчивости ведет к образованию в общем случае сгущений среды, в частном случае – к коллапсу всего облака. Таким образом, наличие сгущений в рассматриваемой среде, возникших под действием сил самогравитации, говорит о том, что в этой среде развивалась гравитационная неустойчивость.

Приведем более полные данные по составу среды протосолнечной туманности и другие ее характеристики, которые необходимы для понимания проблемы гравитационной неустойчивости, приводящей к коллапсу протосолнечной туманности.

Протосолнечная туманность, кроме параметров, указанных в положении 2, обладала моментом количества движения  $\sim 10^{52}$  г·см<sup>2</sup>/с [30, 28]. Туманность являлась молекулярным облаком, содержащим H<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O и другие сложные

соединения. Химический состав туманности близок к составу Солнца. Если принять атомарное содержание водорода соответствующим числу  $10^5$ , то для следующих по обилию элементов имеем [30, 28]: He –  $10^4$ ; O –  $10^2$ ; C – 60; N и Ne – 20; Si, Mg и Fe – 10; S – около 5; Ca, Ar и Al – 1. Содержание остальных элементов, вместе взятых, не превосходит 1. В состав твердых частиц (пылинок) входит около 1% вещества по весу. В протосолнечной туманности, как и в других межзвездных облаках, не образуются изолированные планетные тела, более того, в них не наблюдается рост частиц пыли более  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  см [38, 28].

Начальное состояния протосолнечной туманности с достаточной точностью описывается уравнениями газовой динамики с учетом гравитационного взаимодействия. При этом среда протосолнечной туманности ведет себя в этом случае как идеальный газ, так как содержит очень мало пыли [30].

Известно, что протосолнечная туманность в таком состоянии и в условиях самогравитации, но без внешних воздействий гравитационно устойчива, т.е в таком состоянии протосолнечная туманность может находиться бесконечно долго [26]. В терминах гравитационной неустойчивости по Джинсу это объясняется тем, что критическая длина волны Джинса ( $\lambda_J$ ) равна размеру протосолнечной туманности или масса протосолнечной туманности не превышает критическую массу Джинса ( $M_J = \lambda_J^3 \cdot \rho$ ).

В действительности же произошло сжатие (коллапс) протосолнечной туманности, в результате которого образовалось Солнце и планетная система. Это произошло благодаря внешнему воздействию, при котором протосолнечная туманность перешла в гравитационно неустойчивое состояние:  $\lambda_J \leq D$ , где  $D$  – характерный размер протосолнечной туманности. Таким образом, размер первой гравитационной неустойчивости протосолнечной туманности был максимальный:  $\lambda \approx D \approx 1,069 \cdot 10^4 \text{ а.е.} = 1,6 \cdot 10^{17} \text{ см.}$  [20].

В настоящее время в научном мире нет общепринятой точки зрения на то, какой тип воздействия произошел на протосолнечную туманность. Так, в работах [27, 39] приводятся данные, что вблизи протосолнечной туманности произошел взрыв сверхновой, а в работе [29, 40] приводятся доказательства воздействия на туманность звездного ветра от массивной звезды.

Несмотря на это, результаты исследований, как теоретических, так и экспериментальных (экспериментальные наблюдения за звездами и их протопланетными дисками), позволяют сделать вывод, что науке в настоящее время с большой вероятностью известно начальное состояние протосолнечной туманности. Конечное состояние эволюции протосолнечной туманности известно с большой точностью, так как это экспериментальный факт: образование Солнца и Солнечной планетной системы. В эволюции туманности между этими двумя точками существует ряд нерешенных до конца проблем.

В настоящее время науке неизвестно другого взаимодействия, кроме гравитационного, которое могло бы привести к образованию таких объектов,



как Солнце и планеты Солнечной системы. Поэтому сжатие (коллапс) протосолнечной туманности, образование Солнца, образование планетной системы являются результатом гравитационной неустойчивости среды протосолнечной туманности в процессе ее эволюции.

На ряде этапов эволюции протосолнечной туманности следует учитывать излучение. В этих случаях уравнение состояния идеального газа становится неприемлемым, так как, несмотря на малое содержание пыли в среде, при учете излучения следует учитывать взаимодействие излучения и с пылевой составляющей [28].

### **2.3. К положению 3 модели протопланетных колец**

По современным представлениям при формировании Солнца околосолнечное газопылевое облако являлось аккреционным, поток вещества из которого на звезду в максимуме мог достигать величин  $\dot{M}_d \sim 10^{-5} - 10^{-6} \cdot M_s / год$  [41]. После того как Солнце практически сформировалось (стадия Т Тельца), аккреция вещества на звезду резко уменьшилась до  $\dot{M}_d \sim 10^{-8} - 10^{-9} \cdot M_s / год$  [42]. Эта остаточная аккреция обусловлена вязкостью диска при его дифференциальном вращении [28].

Весьма сложной проблемой является проблема перераспределения момента количества движения между Солнцем и протопланетным диском, решение которой в завершённом виде до настоящего времени отсутствует.

Коллапс протосолнечной туманности происходит при резко выраженной негомологичности ее сжатия – центральная область туманности, образуя протосолнце, сжимается быстрее. При аккреции вещества из околосолнечного газопылевого облака протосолнцу передается момент количества движения, но большая его часть остается в околосолнечном облаке [28]. Предложено несколько механизмов перераспределения момента количества движения между протосолнцем и околосолнечным газопылевым облаком: турбулентная вязкость [43, 44], МГД турбулентность [45] и другие, которые в принципе позволяют объяснить наблюдаемое распределение момента количества движения между Солнцем и планетной системой, но эти модели требуют дальнейшего развития и совершенствования.

В общем перераспределении момента количества движения во время формирования Солнца и протопланетного диска играют существенную роль биполярные вращающиеся потоки ионизованного газа (протосолнечный и/или дисковый ветер) [28]. Эти потоки уносят с собой момент количества движения. В результате этого явления момент количества движения Солнца уменьшается.

### **2.4. К положению 4 модели протопланетных колец**

Протопланетный газопылевой диск сформировался к началу второй стадии эволюции протосолнечной туманности, которая соответствует нахождению Солнца на стадии Т Тельца [21, 25, 24, 20]. Важное значение имеют характеристики протопланетного диска, находящегося на этом этапе эволюции.

Состав среды протопланетного диска на этом этапе не отличается от состава среды протосолнечной туманности. Среда диска на 98% состоит из газа, в котором обилия по массе молекулярного водорода, гелия и всех остальных веществ составляют соответственно 0,71; 0,28; 0,01. На пылевые частицы по разным источникам приходится по массе от 0,5 до 1,5%. Размер пылинок по данным современных исследований, включая и результаты современных наблюдений за протопланетными дисками других звезд [28], находятся в пределах 0,1–1 см, что значительно превышает размер пылевых частиц в протопланетной туманности. По данным работ [21, 31] в протопланетном диске Солнца частицы достигают распределения по размерам, в котором имеются и мелкие частицы размером около 1 мкм, поддерживающие высокую непрозрачность вещества диска, и крупные около 1 см. Это говорит о том, что в околосолнечном облаке и протопланетном диске наблюдается рост пылевых частиц. Предполагают, что в протопланетном диске Солнца может происходить рост размеров частиц при столкновениях между собой за счет их слипания [20, 34]. Возможными механизмами слипания частиц пыли являются: ван-дер-ваальсовы силы; разные типы «радиационного» спекания [20]; эффект холодной сварки [34] и другие. Произойдет ли слипание или дробление частиц при столкновении, зависит от их относительной скорости.

Протопланетный диск на начальной стадии своей эволюции имеет следующие размеры. Внутренний радиус диска ( $r_{in}$ ) не может быть меньше центробежного радиуса, который для Солнечной системы составляет  $r_c \geq 0,2$  а.е.  $\approx 3 \cdot 10^{12}$  см [28]. В наших расчетах  $r_{in} = 4,49 \cdot 10^{12}$  см. Внешний радиус диска ( $r_{ex}$ ) превышает радиус орбиты Плутона, равный 39,44 а.е. =  $5,9 \cdot 10^{14}$  см. В наших расчетах  $r_{ex} = 5,91 \cdot 10^{14}$  см. Толщина протопланетного диска по данным работ [31, 3, 9] изменяется в зависимости от его радиуса, а его максимальная толщина увеличивается при возрастании его массы.

Относительно величины массы протопланетного диска среди исследователей нет единой точки зрения. Сафронов В.С. и его ученики считают, что масса диска не могла быть больше  $0,15 \cdot M_s$ , где  $M_s$  – масса Солнца [50, 20, 30]. Хойл Ф. [46] и Шацман Е. [47] поддерживают эту точку зрения, считая, что масса диска была порядка  $(0,01 - 0,1) \cdot M_s$ . Камерон А.Г. [48, 49] и Левин Б.Ю. [20] доказывают, что масса диска могла превышать массу Солнца. Оценки с использованием результатов работы Поляченко В.Л. и Фридмана А.М. [32] показывают, что масса протопланетного диска могла составлять примерно  $0,36 \cdot M_s$ . Астрономические наблюдения газопылевых околосолнечных дисков для звезд с массой порядка Солнца на стадии Т Тельца обычно приводят к оценке массы диска, составляющей  $M_d = \sim (0,01 - 0,2) \cdot M_s$ , хотя максимальная масса аккреционного диска может достигать  $M_d = \sim (0,1 - 0,5) \cdot M_s$  [51]. Но следует отметить, что наблюдаются и звезды с массой порядка Солнца, у которых протопланетный диск (стадия Т Тельца) составляет  $M_d = \sim 0,6 \cdot M_*$ , где  $M_*$  – масса звезды [52]. Следует также обратить внимание,

что в процессе эволюции околозвездный диск достигает максимального значения и, переходя в стадию Т Тельца, постепенно теряет свою массу [42].

Плотность ( $\rho$ ) и температура ( $T$ ) среды протопланетного диска в начальной стадии его эволюции в экваториальной плоскости изменяется в соответствии с расположением планет следующим образом [31, 30, 28].

$r = 0,387$  а.е. =  $5,791 \cdot 10^{12}$  см (Меркурий):  $\rho \sim 1 \cdot 10^{-8}$  г/см<sup>3</sup>,  $T \sim 750$  °К;

$r = 0,723$  а.е. =  $1,082 \cdot 10^{13}$  см (Венера):  $\rho \sim 6 \cdot 10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>,  $T \sim 450$  °К ;

$r = 1$  а.е. =  $1,496 \cdot 10^{13}$  см (Земля):  $\rho \sim 3 \cdot 10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>,  $T \sim 300$  °К ;

$r = 1,524$  а.е. =  $2,279 \cdot 10^{13}$  см (Марс):  $\rho \sim 1,5 \cdot 10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>,  $T \sim 140$  °К ;

$r = 5,203$  а.е. =  $7,783 \cdot 10^{13}$  см (Юпитер):  $\rho \sim 3,6 \cdot 10^{-10}$  г/см<sup>3</sup>,  $T \sim 40$  °К ;

$r = 9,554$  а.е. =  $1,429 \cdot 10^{14}$  см (Сатурн):  $\rho \sim 1,8 \cdot 10^{-10}$  г/см<sup>3</sup>,  $T \sim 25$  °К ;

$r = 19,191$  а.е. =  $2,871 \cdot 10^{14}$  см (Уран):  $\rho \sim 5,1 \cdot 10^{-11}$  г/см<sup>3</sup>,  $T \sim 12$  °К ;

$r = 30,109$  а.е. =  $4,504 \cdot 10^{14}$  см (Нептун):  $\rho \sim 3 \cdot 10^{-11}$  г/см<sup>3</sup>,  $T \sim 10$  °К .

Как известно, вещество протопланетного диска Солнца вращается. В отсутствие вращения вещество диска упало бы на Солнце. Предполагается [3, 9, 11], что закон вращения вещества протопланетного диска близок к закону Кеплера.

Высокая разрешающая способность современных экспериментальных методов наблюдений за звездами позволила установить закон вращения некоторых газопылевых дисков, который оказался близким к кеплеровскому [28].

В теории образования планет путем аккумуляции твердых тел и частиц [34, 30] считается, что турбулентность в протопланетном диске на стадии его образования поддерживалась падением газопылевого вещества из диска на протосолнце. После окончания стадии образования диска предполагается, что аккреция газопылевого вещества на протосолнце прекращается и турбулентность в диске быстро затухает (за несколько оборотов вращения вещества) при условии, что отсутствует конвекция в направлении к экваториальной плоскости.

Согласно современным исследованиям эти представления в общем случае не подтверждаются, но тем не менее не исключаются. Как показали наблюдения за молодыми звездами, сопоставимыми по массе с Солнцем (классические звезды Т Тельца), их диски и после завершения стадии коллапса остаются аккреционными. Для осуществления переноса массы из диска на звезду и одновременного переноса углового момента на периферию диска необходима высокая вязкость диска, и наиболее реальным ее источником является турбулентность. Однако вопрос о пространственном распределении и продолжительности существования турбулентности в диске остается не до конца решенным. С другой стороны, наблюдается много «активных», турбулизированных аккреционных дисков вокруг молодых звезд с возрастными до нескольких миллионов лет [28], но есть и «пассивные», с низким или нулевым темпом аккреции на звезду [28].

Турбулентность, как и температура, противодействует наступлению гравитационной неустойчивости в протопланетном диске.

### **2.5. К положению 5 модели протопланетных колец**

В представляемой модели протопланетный диск в начальной стадии эволюции находится в состоянии гравитационной неустойчивости. Для анализа состояния проблемы эволюции протопланетного диска на начальной ее стадии необходимо рассмотреть данную проблему в рамках существующих моделей образования Солнечной планетной системы.

В общепринятой теории (модели) твердотельной аккумуляции [34, 30] гравитационная неустойчивость на начальной стадии эволюции протопланетного диска, т.е. фактически в газовой среде, исключается. В процессе эволюции пылевые частицы в этой модели перемещаются в экваториальную плоскость диска под действием вертикальной компоненты тяготения Солнца, которая, в отличие от радиальной компоненты, не уравновешивается центробежной силой, действующей на вращающееся вещество диска. Движение пылевых частиц тормозится сопротивлением газа, который в отличие от пыли не перемещается, находясь в состоянии гидростатического равновесия, так как его поддерживает градиент газового давления. Таким образом, за счет перемещения пылевых частиц в экваториальную плоскость плотность пылевой компоненты в ней возрастает.

Одновременно происходит рост размеров пылинок при их столкновениях. Экспериментальные и теоретические исследования последних лет [28] 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 [53, 54]. Поверхностные молекулярные силы уже не работают при таких масштабах размеров и скоростей, а самогравитация еще не работает из-за малости этих тел. Она начинает работать только для тел размером более 100 м, которые благодаря ей могут удерживать на своей поверхности более мелкие тела и частицы [34, 30]. Однако образование стометровых планетезималей при парных столкновениях более мелких тел не обеспечивается гравитационными силами из-за их малости по сравнению с силами взаимодействия этих тел с окружающим газом — силами лобового сопротивления.

Вероятно, единственным путем образования планетезималей, из которых затем образуются планеты, является в рамках модели твердотельной аккумуляции гравитационная неустойчивость пылевого слоя 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 [28].

Итак, в модели твердотельной аккумуляции при достижении в пылевом слое критической плотности в нем происходит гравитационная неустойчивость

с образованием пылевых сгущений. Пылевые сгущения имеют следующие средние значения массы и экваториального радиуса [30]:

$$m_o \approx \frac{\sigma_p^3}{\rho_*^2}, \quad a_o \approx \frac{\sigma_p}{2\rho_*}.$$

Для зоны Земли, если  $\sigma_p \approx 10 \text{ г/см}^2$ ,  $\rho_* \approx 1,42 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3$ , то имеет место:

$$m_o \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ г}, \quad a_o \approx 4 \cdot 10^7 \text{ см}, \quad (12)$$

а критическая плотность в этих условиях составляет

$$\rho_{кр} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3.$$

На расстоянии Земли от Солнца пылевые сгущения превращаются в твердые тела на временах порядка  $10^4$  лет, а на расстоянии Юпитера – на временах порядка  $10^6$  лет. Образовавшиеся твердые тела (планетезимали) продолжают расти за счет столкновений и на определенной стадии возникают зародыши планет – достаточно большие тела, способные в дальнейшем расти с помощью собственного гравитационного поля. Из зародыша или слияния нескольких зародышей образуется планета. Время роста, например, планеты Земля оценивается в этой модели  $\approx 10^8$  лет.

Как видно из оценки (12), длина волны возмущений при гравитационной неустойчивости в пылевом слое протопланетного диска в модели Шмидта–Сафронова составляет  $\approx 4 \cdot 10^7$  см.

Обратимся к другим моделям и представлениям. Например, авторы работ [20, 32, 55] полагают, что протопланетный диск Солнца был гравитационно неустойчивым уже на начальной стадии эволюции, и рассматривают возмущения с длиной волны порядка расстояния между планетами (крупномасштабные гравитационные неустойчивости). Как известно, минимальное расстояние между планетами Солнечной системы составляет  $\approx 0,3 \text{ а.е.} = 0,449 \cdot 10^{13} \text{ см}$ .

В модели Фридмана–Поляченко [32, 26] на основе оценок принимается, что протопланетный диск Солнца был гравитационно неустойчивым и на начальной стадии его эволюции. В этих условиях в протопланетном диске образуются «нарастающие со временем кольцеобразные возмущения плотности» (протопланетные кольца), которые «располагаются в нем согласно закону Тициуса–Бодэ» [26]. Отсюда следует, что длина волны кольцеобразных гравитационных неустойчивостей соответствует расстоянию между планетами, а характерный радиальный размер – ширина кольцеобразных газопылевых сгущений – соответствует зонам планет. Например, ширина кольцеобразного газопылевого сгущения в области Земли составляет  $\approx 6 \cdot 10^{12} \text{ см}$ . В дальнейшем в этой модели из протопланетных колец образуются протопланеты.

В модели Энеева–Козлова [56, 57, 58, 59], как и в модели твердотельной аккумуляции, предполагается существование в протопланетном диске гравитационной неустойчивости по отношению к возмущениям достаточно малой длины волны, которая приводит к образованию планетезималей. Но, в отличие от модели твердотельной аккумуляции, Т.М. Энеев и И.И. Козлов предположили, что планетезимали являются не твердыми телами, «а более или менее разреженными газопылевыми сгущениями». В этой модели представляется весьма интересным следующий полученный результат: кольцевое сжатие вещества протопланетного диска, масса которого «пренебрежимо мала по сравнению с массой центрального тела (Солнца)» [56, 57, 58, 59]. Эволюция каждой из кольцевых областей завершается образованием газопылевой протопланеты. В нашей терминологии кольцевое сжатие вещества – это протопланетные кольца. Другими словами, протопланетный диск в модели Энеева–Козлова оказался гравитационно неустойчивым к возмущениям с длиной волны, приближенно равной расстоянию между планетами.

Для выбора адекватной модели образования планет Солнечной системы большой интерес представляют работы Э.М. Галимова [33, 60, 61, 62]. На основе полученных результатов геохимических исследований состава планет Э.М. Галимов выдвинул гипотезу о том, что формирование планетного тела происходит из газопылевого сгущения (облака), и на примере системы Земля–Луна в его работах показано, что эта гипотеза наилучшим образом позволяет объяснить известные геохимические факты и ограничения.

Следует подчеркнуть, что в основе всех моделей образования Солнечной планетной системы лежит фундаментальное свойство гравитирующей среды – ее гравитационная неустойчивость. Отличие же моделей заключается только в пространственных размерах, на которых начинает развиваться гравитационная неустойчивость. Однако это обстоятельство приводит к существенным различиям в образовании Солнечной планетной системы.

Анализ показывает: чтобы построить адекватную модель образования Солнечной планетной системы, следует ответить на вопрос: могла ли реализоваться крупномасштабная гравитационная неустойчивость в протопланетном диске Солнца?

Учитывая основополагающее значение этого вопроса для построения модели, было целесообразно провести исследования в этом направлении.

Как известно [3, 7, 30], гравитационная неустойчивость протопланетного диска существенным образом зависит от состава его среды. В этих исследованиях, цель которых состояла в изучении гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца именно на начальной стадии его эволюции, было показано, что среда диска на этой стадии может быть с достаточной точностью представлена как идеальный газ [3, 7, 30]. В этом предельном случае протопланетный диск обладает наибольшей гравитационной устойчивостью. Присутствие в газовой среде пылевой компоненты только усиливает гравитационную неустойчивость диска.

Безусловно, основой образования планет, в особенности планет земной группы, является пылевая составляющая газопылевой среды, и на этапе образования планетных тел, т.е. вне начальной стадии эволюции протопланетного диска, пренебрегать ею, естественно, недопустимо.

Краткие результаты исследований гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца:

1. Работы [10, 11, 12] были посвящены исследованию зарождения гравитационной неустойчивости в бесконечной однородной изотропной среде с параметрами, соответствующими среде протопланетного диска, с целью определения критической плотности однородной среды, при которой возникают крупномасштабные гравитационные неустойчивости. Результаты этих исследований представляются весьма важными, так как если критическая плотность однородной среды будет больше, чем плотность среды протопланетного диска в начальной стадии ее эволюции, то на этом можно и заканчивать дальнейшие исследования – гравитационная неустойчивость протопланетного диска в этих условиях исключается.

Основной результат этих исследований при плоских начальных возмущениях состоит в том, что критическая плотность, при которой возникает крупномасштабная гравитационная неустойчивость, примерно на четыре порядка меньше критической плотности ( $\rho_{кр} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3$ ), полученной в рамках теории [34, 30], и на два порядка меньше плотности ( $\sim 3 \cdot 10^{-9} \text{ г/см}^3$ ) газовой среды в зоне Земли [30].

Важным для понимания возникновения гравитационной неустойчивости является полученный результат о необходимости для зарождения гравитационной неустойчивости начального возмущения среды, превышающего ее флуктуационные возмущения.

Таким образом, результаты этих исследований дают основание утверждать, что при рассмотрении гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца необходимо принимать во внимание возможное развитие крупномасштабных неустойчивостей, как неустойчивостей, которые зарождаются при наименьшей критической плотности из всех возможных. При этом длина волны крупномасштабных неустойчивостей может быть сопоставима с расстоянием между планетами.

2. Следующая работа [63] была посвящена исследованию зарождения гравитационных неустойчивостей при радиальных начальных возмущениях бесконечной однородной изотропной среде. Наблюдалась гравитационная неустойчивость в виде радиальных колец, положение которых соответствует положению планет солнечной системы при начальном возмущении газовой среды, которое было предложено Фридманом А.М и Поляченко В.Л. [32, 26].

3. Для исследований протопланетного диска Солнца была разработана модель диска в приближении Роша (масса протопланетного диска много меньше массы Солнца): среда диска – политропный газ, излучение не учитывается; турбулентность отсутствует; диск находится в равновесном

стационарном невозмущенном состоянии; закон вращения среды диска близок к закону Кеплера; модель представлена в аналитическом виде [3].

4. Образование протопланетных колец возможно, если система протопланетного диска с центральным источником гравитационного поля способна в определенной степени удерживать (сохранять) такие кольца. В работах этого направления [3] показано, что при соответствующем законе угловой скорости вращения среды протопланетные кольца могут существовать и в двумерной осесимметричной постановке в приближении Роша они устойчивы.

5. Разработана численная модель эволюции протопланетного диска [3], в основе которой лежит метод численного решения двумерных газодинамических течений в областях сложной формы с подвижными границами, разработанный Годуновым С.К. и Забродиним А.В. с соавторами [64, 65]. Методом численного моделирования в двумерном осесимметричном приближении показана устойчивость протопланетного тороидального кольца, расположенного на расстоянии планеты Нептуна, параметры которого получены из аналитического решения и приведены в работе [3].

Путем постановки численного эксперимента наблюдалось зарождение кольцевых, тороидальных структур в протопланетном диске при «включении» собственного гравитационного поля диска [5].

6. В исследованиях, результаты которых представлены в работах [7, 8, 9], получены приближенные дисперсионные уравнения для экваториальной плоскости протопланетного диска, которые в предельных своих приближениях совпадают с результатами работ Джинса, Чандрасакхара, Бела и Шацмана, Сафронова, Фридмана и Поляченко. Из полученных дисперсионных уравнений ((4.101\*\*), (1.1), (1.16) [9]) следует: вращение протопланетного диска стабилизирует его гравитационную устойчивость в начальной стадии его эволюции настолько, что только при массе, превышающей  $(0,15 - 0,2) \cdot M_S$ , диск переходит в гравитационно неустойчивое состояние. Приводятся данные, которые позволяют заключить, что диск массой  $> (0,15 - 0,2) \cdot M_S$  с большой вероятностью мог существовать.

Следует также учесть, что крупномасштабная гравитационная неустойчивость может проявиться на более ранней стадии аккреционного диска, когда его масса значительно выше (до  $0,5 \cdot M_S$ ), чем на поздней стадии Т Тельца, а основные аккреционные процессы в диске в это время уже закончились. Последнее имеет место в районе резкого спада темпа аккреции диска ([45], fig. 8).

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют утверждать, 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.



### **2.6. К положению 6 модели протопланетных колец**

В результате коллапса протосолнечной туманности образовались Солнце и протопланетный диск, вращающийся вокруг него. Как было показано, протопланетный диск с большой вероятностью находился в состоянии гравитационной неустойчивости. Это вторая по счету гравитационная неустойчивость при коллапсе протосолнечной туманности. Для того чтобы в среде диска начала развиваться гравитационная неустойчивость, необходимы соответствующие начальные возмущения среды диска [32, 26, 11, 12]. В данной модели предполагается, что такие возмущения зарождаются при резком уменьшении аккреционного потока из диска на Солнце. Эти возмущения имеют симметрию радиального возмущения, и в результате гравитационной неустойчивости среды диска из них образуются протопланетные кольца, которые соответствуют зонам планет Солнечной системы. В отличие от первой гравитационной неустойчивости протосолнечной туманности, которая была вызвана внешним воздействием, вторая гравитационная неустойчивость произошла за счет начального возмущения, вызванного внутренними причинами, а именно: динамикой эволюции среды диска.

Явление, подобное зарождению начальных возмущений при резком уменьшении аккреционного потока из диска на Солнце, наблюдалось в исследованиях при включении собственного гравитационного поля диска при начальных данных в модели Роша [5]. В этом случае зарождались крупномасштабные кольцеобразные (тороидальные) возмущения в среде диска [5].

### **2.7. К положению 7 модели протопланетных колец**

Итак, в результате гравитационной неустойчивости в протопланетном диске образовались протопланетные кольца. Как показано в работах [2, 3, 4], в аналитической модели протопланетного диска в приближении Роша существуют аналитические решения протопланетных колец в двумерном (осесимметричном) приближении. В этом приближении протопланетные кольца устойчивы в силу жесткого условия осевой симметрии. В трехмерном приближении ситуация изменяется.

Протопланетное кольцо, возникшее в результате гравитационной неустойчивости, как правило, не может быть устойчивым в трехмерном измерении. Действительно, размеры протопланетного кольца в азимутальном направлении превосходят  $\lambda_j$ , которое определено для соответствующей зоны протопланетного диска. Так как протопланетное кольцо при своем образовании сжимается за счет собственного гравитационного поля, то азимутальная критическая длина волны становится еще меньше и протопланетное кольцо начинает распадаться на фрагменты. Данное описание поведения газопылевого кольца в протопланетном диске не является новым. Так, при рассмотрении возникновения планетезималей Сафронов В.С. также обращается к гравитационной неустойчивости протопланетного диска, приводящей к образованию кольцевой структуры, которая в дальнейшем распадается на

локальные пылевые сгущения [34], стр. 76; [30], стр. 39. Снытников В.Н. с соавторами в работах по численному моделированию процессов, возникающих в протопланетном диске [66, 67], также наблюдали образование кольцевых структур, в последующем распадающихся на фрагменты. Одна из последних работ в этом направлении была выполнена Кривцовым А.М. и Галимовым Е.М. с соавторами [68], в которой показано, что протопланетное кольцо распадается на фрагменты (кластеры) с последующим образованием одного или двух пылевых объектов.

Фрагменты, образовавшиеся в результате распада протопланетного кольца, представляют собой крупномасштабные газопылевые сгущения в зоне соответствующей планеты, которые, взаимодействуя между собой и сталкиваясь, и приводят к образованию протопланеты. Для описания взаимодействия крупномасштабных газопылевых сгущений, на наш взгляд, целесообразно обратиться к модели формирования планетных систем Энеева–Козлова [56, 57, 58, 59], предложенной в 1977 году.

В процессе образования протопланет из протопланетных колец возможно образование и спутников планет (на это указывалось в работах [2, 3, 4]). Следует отметить, что, хотя произошло разделение протопланетного диска на кольца, они не являются независимыми, а образовавшиеся из них фрагменты (газопылевые сгущения) могут испытывать влияния остальных фрагментов, в том числе и находящихся в других зонах. Вследствие сложного характера взаимодействия может оказаться, что некоторые газопылевые сгущения могут приобрести значительный момент количества движения относительно протопланеты, и их слияние как целого будет невозможно. Газопылевое сгущение или его часть останется на орбите протопланеты, превратившись в ее спутник. Эта схема в своих общих чертах соответствует идее Галимова Э.М. об образовании Земли и Луны из единого протопланетного облака. Для установления точного сценария образования спутников планет необходимы дополнительные исследования.

### **2.8. К положению 8 модели протопланетных колец**

В рамках предложенной модели [1–4, 7–12] проблемы зародышей планет вообще не возникает. Процесс образования планетного тела происходит внутри протопланеты (протопланетного облака) путем передвижения пылевой компоненты под действием гравитационного поля облака в центральную его часть, где и формируется тело планеты.

Совершенно ясно, что геохимический состав планет будет существенным образом зависеть от модели образования планетной системы Солнца. В результате геохимических исследований Галимов Э.М. выдвинул гипотезу, что формирование планетных тел происходит из газопылевого сгущения (облака), 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 (образования

Луны в результате столкновения космического тела планетарного размера с Землей) [69], возникают значительные трудности в объяснении ряда геохимических составов и изотопных систем [62]. В рамках данной работы нет возможности останавливаться на всех геохимических зависимостях системы Земля–Луна, эти результаты достаточно подробно изложены в работе [62]. В настоящей работе приведем лишь одно красивое доказательство образования железного ядра Земли, следуя Галимову Э.М.

В протопланетном газопылевом сгущении, состав которого был близок к составу протосолнечной туманности, железо находилось в окисленном состоянии – FeO. Газовая среда представлена в основном водородом. В центральной части протопланетного сгущения за счет его сжатия в некоторый момент будут достигнуты температуры, достаточные для испарения FeO. Как известно, водород является эффективным восстановителем, и он связывается с кислородом, а железо выделяется в чистом виде. Далее железо конденсируется в металлические частицы, которые под действием силы тяжести падают в центр протопланеты, образуя металлическое ядро из Fe. Ранее приемлемого механизма образования железного ядра Земли не было предложено.

### **2.9. К положению 9 модели протопланетных колец**

Во всех предложенных моделях образования планетной системы Солнца возникает проблема исчезновения из системы газовой компоненты. Общепринятая точка зрения заключается в том, что газовая компонента выносится из системы солнечным ветром, интенсивность которого достигает максимума на стадии T Тельца [20, 26]. При образовании протопланет земной группы их газовая оболочка разрушается интенсивным солнечным излучением и выносится за пределы планет земной группы [20]. Юпитеру практически удалось удержать газовую компоненту, Сатурну – в меньшей степени, а Уран и Нептун большую часть своей газовой компоненты потеряли.

По разным источникам информации продолжительность солнечного ветра несколько различается [33, 21, 25], но, вероятно, ее можно оценить равной примерно  $10^6$  лет.

### **2.10. К положению 10 модели протопланетных колец**

В настоящее время общепринятой теорией образования Солнечной планетной системы является теория Шмидта–Сафронова [34, 30], которая объясняет образование планет путем аккумуляции твердых тел и частиц. Если сделать поправку на то, что не все планеты Солнечной системы являются твердыми телами, то аккумуляция планетами твердых тел и частиц для определенного этапа образования планетной системы является экспериментальным фактом. Таким образом, любая теория образования Солнечной планетной системы, претендующая на описания процессов ее образования в полном и завершенном виде, должна учитывать это обстоятельство и быть способной описать этот экспериментальный факт.

При образовании протопланет не все вещество протопланетного диска было захвачено этим процессом. Гравитационная неустойчивость и поведение

пылевых частиц в газе – это, в общем, независимые процессы, которые идут параллельно, но могут и влиять друг на друга. В части вещества, которая осталась вне протопланетных колец и далее вне протопланет, пылевые частицы, сталкиваясь между собой, растут и оседают в экваториальной плоскости диска. Динамика и рост этих частиц описывается теорией твердотельной аккумуляции [34, 30]. Следует обратить внимание, что рост плотности пылевой компоненты в районе экваториальной плоскости может создать условия, когда пылевая компонента по плотности преобладает над газовой компонентой, как это и предполагал Сафронов В.С. [34]. Тогда, как показано в работе [9], гравитационной неустойчивостью могут обладать и возмущения с короткой длиной волны, и вся теория твердотельной аккумуляции начинает работать для среды, оставшейся вне планет. Образовавшиеся твердые тела начинают взаимодействовать с планетами, и возникает картина, которую мы и наблюдаем: падают на планеты и их спутники пылевые частицы, метеоры, метеориты, болиды, астероиды.

### **3. Сравнительная характеристика моделей образования Солнечной планетной системы**

Несмотря на то что в настоящее время общепринятой теорией образования планетной системы Солнца является теория Шмидта–Сафронова [34, 30] – теория образования планет путем аккумуляции твердых тел и частиц, в рамках этой теории при объяснении ряда явлений встречаются значительные трудности.

1. В теории [34, 30] рассматривается гравитационная неустойчивость пылевого слоя протопланетного диска, которая приводит к возникновению газопылевых сгущений с размерами  $\approx 4 \cdot 10^7$  см, из которых впоследствии образуются твердые тела (планетезимали). Как известно [32, 26], гравитационно неустойчивая среда характеризуется критической длиной волны Джинса ( $\lambda_J$ ), которая разделяет диапазоны потенциально устойчивых ( $\lambda < \lambda_J$ ) и неустойчивых ( $\lambda > \lambda_J$ ) возмущений данной среды. Существенной особенностью гравитационно неустойчивой среды является невозможность самопроизвольного (или флуктуационного) зарождения гравитационных возмущений. Для проявления гравитационной неустойчивости необходимо на данную среду воздействовать начальным возмущением в области ее неустойчивости ( $\lambda > \lambda_J$ ), как это, например, произошло в случае зарождения коллапса в протосолнечной туманности. При этом, как показывают исследования [10, 11, 12], начальные возмущения любой длины волны из диапазона неустойчивости ( $\lambda > \lambda_J$ ) могут приводить к развитию гравитационных неустойчивостей. Отсюда следует, что если в теории [34, 30] определили критическую длину волны Джинса для пылевого слоя ( $\lambda_J \leq 4 \cdot 10^7$  см), то в нем возможны гравитационные возмущения как короткой длины волны ( $\lambda \approx 4 \cdot 10^7$  см), так и крупномасштабные возмущения (например,  $\lambda \approx 0,449 \cdot 10^{13}$  см). Однако в теории [34, 30] не указано, каким образом в

протопланетном диске возникли начальные возмущения с длиной волны  $\lambda \approx 4 \cdot 10^7$  см, а просто постулируется их возникновение. С таким же успехом можно представить, что в пылевом слое возникли возмущения с длиной волны, равной  $\lambda \approx 0,449 \cdot 10^{13}$  см.

В модели протопланетных колец волна возмущения типа волны Фридмана–Поляченко возникает в среде протопланетного диска естественным образом в ходе эволюции протопланетного диска.

2. Одним из ключевых вопросов в эволюции протопланетного диска в модели [34, 30] 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. Так, в работах [70, 57, 71] вопрос об образовании зародышей планет отнесен к числу наиболее неясных и уязвимых в планетной космогонии, настоятельно требующий своего разрешения.

Действительно, например, как показывают астрономические наблюдения, возникновение малых твердых тел далеко не всегда приводит к образованию достаточно крупных тел, которые далее могут расти с помощью собственного гравитационного поля. К таким системам относятся, например, пояс астероидов в планетной системе Солнца, кольца Сатурна, кольца Урана, кольца Нептуна и др.

В рамках предложенной модели [1–4, 7–12] проблемы зародышей планет вообще не возникает, так как формирование планетных тел происходит внутри протопланет. Пылевые частицы падают в центр протопланеты под воздействием ее гравитационного поля, образуя тело формирующейся планеты.

3. Наиболее сложным для объяснения вопросом в рамках модели [34, 30] является вопрос о планетных расстояниях – правило Тициуса–Боде. Так как процессы объединения образовавшихся твердых тел в протопланетном диске носят стохастический характер, то теория в рамках этой модели принципиально не может вычислить расстояния, на которых должны в протопланетном диске сформироваться планеты [30]. Если задано распределение вещества в протопланетном диске, то эта теория может лишь оценить количество формирующихся планет и их относительные расстояния.

Закон планетных расстояний в модели [1–4, 7–12] обусловлен волной возмущения плотности среды диска, в результате воздействия которой образуются протопланетные кольца, соответствующие зонам планет, как это показано, например, в работе [32]. Численные расчеты [66, 67, 74, 5, 6, 75] подтверждают возможность образования крупномасштабных радиальных возмущений.

4. Как известно, планеты Солнечной системы по своим физическим характеристикам делятся на две группы: внутренние планеты – планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и внешние планеты – газовые гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). В модели твердотельной аккумуляции [34,

30] предполагается существование двух стадий образования внешних планет Солнечной системы. На первой стадии формируется твердотельный зародыш (ядро) планеты путем твердотельной аккумуляции. На второй стадии происходит аккреция газовой компоненты на образовавшийся твердотельный зародыш.

В модели протопланетных колец существует другая, вероятно, более реалистичная гипотеза образования внешних планет Солнечной системы, в которой предполагается, что каждая планета сформировалась из соответствующего протопланетного кольца путем его фрагментации на крупномасштабные газопылевые сгущения, которые гравитационно взаимодействуют друг с другом и образуют протопланету (в данном случае протопланета – это газопылевое сгущение, которое в процессе гравитационного сжатия превращается в планету). Наибольшую доказательную силу эта гипотеза имеет для Юпитера и Сатурна [9].

5. Еще одна проблема, с которой пришлось столкнуться исследователям, которые занимаются изучением образования планет, — это обнаруженное при наблюдениях за экзопланетами достаточно короткое время жизни протопланетных дисков. Оказалось, что протопланетные диски живут не более 10 миллионов лет. По данным работы [72], среднее время жизни изученных газопылевых дисков составляло 3–6 млн лет. Тогда как в стандартном варианте по Сафронову В.С.: «...Земля росла в течение  $\sim 10^8$  лет...» [34]. В работе [34] также приводятся 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».

В предлагаемой модели образования планетной системы Солнца [1–4, 7–12] планеты образуются за счет гравитационной неустойчивости среды диска, и время образования планет в этом случае будет значительно меньше, чем в модели твердотельной аккумуляции. В качестве примера приведем данные о времени образования планет в модели Энеева–Козлова по результатам работы Мясникова В.П и Титаренко В.И. [73]. В этой работе проведено численное моделирование эволюции газопылевого сгущения (протопланеты), имеющего массу, эквивалентную массе Земли с концентрацией примесей изотопов короткоживущего  $^{26}\text{Al}$ . Показано, что конденсация протопланеты с приведенными параметрами начинается через 3,3 млн лет.

6. Современные методы исследований позволяют наблюдать планеты у других звезд (экзопланеты) и измерять некоторые их характеристики. Первые экзопланеты были обнаружены в конце 1980-х годов [28]. Как показывают исследования, среди планетных систем других звезд достаточно часто наблюдаются планеты типа Юпитера и «горячих юпитеров». «Горячий юпитер» – это класс планет, относящийся к газовым гигантам с массой больше или порядка массы Юпитера. В отличие от Юпитера, который находится на расстоянии 5 а. е. от Солнца, типичный «горячий юпитер» находится на расстоянии порядка 0,05 а. е. от звезды, то есть на порядок ближе,

чем Меркурий от Солнца, и на два порядка ближе, чем Юпитер. Таким образом, феномен Юпитера, который наиболее убедительно свидетельствует в пользу предлагаемой модели [1–4, 7–12], не является исключением и достаточно широко распространен в других планетных системах.

Существуют гипотезы (одна из версий выдвинута учеными из Северо-Западного университета США), что «горячий юпитер» зарождается на значительном расстоянии от звезды, а затем перемещается за счет гравитационных возмущений на такое весьма близкое расстояние от звезды.

У нас другая гипотеза. Известно [30, 22, 28], что в результате коллапса протозвездной туманности при ее определенной массе и моменте количества движения может образоваться двойная звезда. Представим себе, что масса и момент количества движения протозвездной туманности, из которой образовалась двойная звезда, будет постепенно уменьшаться, тогда при определенных массе и моменте количества движения двойная звезда не сможет образоваться. Тогда близко от этой критической точки сможет образоваться «несостоявшаяся» звезда – «горячий юпитер». В этом случае «горячий юпитер» образуется в непосредственной близости от звезды, как это и имеет место в реальности. Но в этих условиях никаких других вариантов, кроме как образование «горячего юпитера» в близлежащей от звезды зоне коллапсирующей протозвездной туманности путем крупномасштабной гравитационной неустойчивости, просто не существует – слишком высокие температуры для твердотельной аккумуляции.

#### **4. Астрофизические исследования протопланетных дисков как экспериментальные исследования, дающие возможность проверки достоверности теоретических моделей образования планетных систем звезд**

К настоящему времени с помощью субмиллиметрового телескопа ALMA удалось получить изображения протопланетных дисков звезд с высокой степенью разрешения [14, 15]. Диски представляют собой яркие кольца, разделенные темными промежутками. Яркие кольца – это газопылевые области, а в темных промежутках газопылевая среда практически отсутствует. Происхождение наблюдаемых структур анализируется в большинстве случаев в рамках теории твердотельной аккумуляции. Вполне естественно по этой теории темные промежутки трактовать как зоны уже образовавшихся планет. Но до сих пор планет в этих зонах не обнаружено. С другой стороны, возникает вопрос, в силу каких законов пространство протопланетного диска так резко разделено на зоны, в одних из которых планеты уже образовались, а в соседних процесс образования находится только в самой начальной стадии. Удовлетворительного объяснения наблюдаемой структуры протопланетных дисков предложено не было, и дискуссии по этому вопросу продолжаются.

Рассмотрим результаты астрофизических исследований, в которых были получены изображения протопланетных дисков с высокой степенью

разрешения, с точки зрения предложенной модели крупномасштабных гравитационных неустойчивостей.

Протопланетные диски на этих изображениях представляют собой яркие кольцевые газопылевые структуры, разделенные темными промежутками, в которых отсутствует газопылевое вещество (или его там незначительное количество) [14, 15, 16, 17].

Такие структуры в протопланетных дисках были предсказаны в работах [1–4, 7–12] и, как следует из предложенной модели крупномасштабных гравитационных неустойчивостей, они возникают в результате гравитационной неустойчивости протопланетного диска и были названы протопланетными кольцами. Более того, в работе [9] в 2014 году было высказано предположение, что такие структуры будут открыты в протопланетных дисках звезд: «К сожалению, мы не можем увидеть прошлое: как происходило (или не происходило) образование протопланетных колец. Единственная надежда экспериментального подтверждения – это наблюдение образования протопланетных колец в протопланетном диске другой звезды». В модели протопланетных колец протопланетные кольца представляют собой газопылевые тороидальные кольца, плотность среды в которых возрастает от поверхности кольца к его центральной линии [3, 4, 5, 6].

Так как наблюдаемые в астрофизических исследованиях «яркие» кольца состоят из газа и пылевых частиц, то естественно в рассматриваемой модели предположить, что эти кольца являются протопланетными кольцами и образовались они в результате гравитационной неустойчивости протопланетного диска. Темные промежутки между ними, в которых практически отсутствует газопылевая среда, также появились в результате гравитационной неустойчивости протопланетного диска в силу того, что газопылевая среда из этих областей перемещалась в протопланетные кольца. В модели протопланетных колец в темных промежутках между кольцами не может быть никаких планет. При дальнейшей эволюции протопланетные кольца должны сжиматься, а затем фрагментировать (разбиваться на газопылевые сгущения). Газопылевые сгущения, сталкиваясь между собой и объединяясь, должны образовать протопланету и ее спутник (или спутники).

Так как наблюдаемые газопылевые облака (протопланетные диски) вокруг звезд находятся на разных стадиях эволюции, то, в принципе, есть возможность наблюдать протопланетные диски различных звезд на разных стадиях их эволюции: на стадии зарождения протопланетных колец, на стадии сжатия протопланетных колец, на стадии фрагментации протопланетных колец и, наконец, на стадии образования протопланеты. На наш взгляд, изображения протопланетных дисков на некоторых указанных стадиях эволюции уже получены, например, в работах [14, 15, 16, 17]. Наиболее близко к модели протопланетных колец находится рассмотрение и анализ результатов исследований, проведенные в работе [17]. Следует надеяться, что в ближайшее



время ситуация должна полностью проясниться и адекватная модель образования планетных систем звезд будет подтверждена экспериментально.

В работе Кривцова А.М. и Галимова Э.М. с соавторами [68] также было высказано предположение, что наблюдаемые в работах [14, 15] кольцевые структуры протопланетных дисков могут быть связаны с образованием планет. И далее в работе [68] были проведены численные расчеты по эволюции протопланетного кольца и показано, что протопланетное кольцо при превышении пороговой концентрации частиц разбивается на кластеры, которые, взаимодействуя между собой, через несколько оборотов образуют один или два пылевых объекта. Таким образом, эволюция протопланетного кольца, рассчитанная в работе [68], идет в соответствии с моделью протопланетных колец.

### **5. Об основных физических принципах моделей образования планетных систем звезд**

Модель образования планетных систем звезд первоначально была разработана в ходе теоретических исследований по образованию Солнечной планетной системы [1–4, 7–12]. Сравнение этой модели с результатами астрофизических исследований показало, что основные положения модели протопланетных колец применимы и для протопланетных дисков других звезд. Таким образом, предложенную модель можно распространить на другие звезды и назвать моделью образования планетных систем звезд, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных газопылевых колец) в их протопланетных дисках, или в сокращенном варианте: модель протопланетных колец образования планетных систем звезд.

Модель протопланетных колец по существу является продолжением развития идей и представлений, заложенных в работах [20, 32, 55].

Сопоставление модели протопланетных колец с моделью твердотельной аккумуляции планет [34, 30] показывает, что в обеих моделях используется основополагающий принцип – принцип гравитационной неустойчивости среды протопланетного диска. Расхождение моделей при использовании этого принципа заключается только в размерах среды диска, на которых происходит гравитационная неустойчивость, что соответствует длине волны гравитационной неустойчивости. Длина волны в модели твердотельной аккумуляции составляет  $\approx 4 \cdot 10^7$  см, а в модели протопланетных колец  $\approx 6 \cdot 10^{12}$  см.

В процессе коллапса (сжатия) протопланетной туманности, произошедшего в результате ее первоначальной гравитационной неустойчивости, плотность ее среды возрастает. В этом случае по логике гравитационной неустойчивости по Джинсу критическая длина волны Джинса потенциальной гравитационной неустойчивости среды туманности уменьшается, начиная от  $\approx 1,6 \cdot 10^{17}$  см. В протопланетном диске Солнца критическая длина волны достигает размеров, сопоставимых с межпланетными

расстояниями, значительно раньше, чем начинается процесс образования планетезималей, который соответствует критической длине волны Джинса на пять порядков меньше межпланетных расстояний. Это фактически было показано в работах [7, 8, 9].

Таким образом, протопланетные кольца возникают значительно раньше, чем зарождаются планетезимали. Отсюда следует, что твердотельная аккумуляция не имеет отношения к образованию планет. Но отсюда не следует, что принципы твердотельной аккумуляции неверны (не имеют отношения к процессам происходящим в Солнечной планетной системе). Эти принципы верны, но они начинают работать только после образования протопланетных колец и протопланет.

В модели Энеева–Козлова тоже не используется крупномасштабная гравитационная неустойчивость в ее явном виде, но в численных расчетах она математически возникает в виде протопланетных колец газопылевых сгущений [59]. Анализ показывает, что модель протопланетных колец на этапе после фрагментации протопланетных колец в целом совпадает с моделью Энеева–Козлова и их идеей образования протопланет.

#### **6. О математической модели образования планетных систем звезд**

Представленная модель образования планетных систем звезд по существу является физической моделью. Построить общую математическую модель, в рамках которой можно было бы описать все процессы эволюции протосолнечной туманности, по-видимому, невозможно. Это объясняется тем, что в процессе эволюции протосолнечной туманности вещество, содержащееся в ней, проходит различные агрегатные состояния, диапазон которых невероятно широк и изменяется от идеального газа (начальное состояние протосолнечной туманности) до состояния вещества, в котором идут термоядерные реакции (Солнце) – это с одной стороны, с другой стороны, – образуются массивные твердые тела в условиях самогравитации (планеты земной группы). В этих условиях исследователи идут путем выделения определенных стадий эволюции протосолнечной туманности, в пределах которых можно выделить и описать происходящие физические процессы в рамках определенной математической модели. Так был проведен расчет коллапса протосолнечной туманности, в основе которого лежит метод газовой динамики с учетом гравитации и излучения [24, 25]. Аппарат химической термодинамики используется при моделировании физико-химических процессов: конденсации, испарения и фракционирования вещества на ранней стадии эволюции Солнечной системы; формирования метеоритного вещества; при моделировании метаморфических, магматических и гидротермальных процессов (в области низких и умеренных давлений); при моделировании сейсмических свойств пород и фазовых равновесий в оболочках планет (в области сверхвысоких давлений и температур) [28]. При моделировании процессов, происходящих на Солнце, используется, например, математический аппарат термоядерной реакции синтеза гелия из водорода. При моделировании взаимодействия газопылевых

сгущений с учетом гравитации был разработан математический метод в приближении капельной модели протопланетного диска [56–59]. При моделировании эволюции протопланетного кольца в работе [68] использовался метод динамики частиц. Для описания эволюции аккреционного протопланетного диска с учетом турбулентности предложен, например, метод с использованием онзагеровского формализма классической неравновесной термодинамики [76].

Расчет гравитационной неустойчивости протопланетного диска в начальной стадии его эволюции был произведен с достаточной степенью точности в приближении идеального газа с учетом гравитации [1–4, 7–12].

### **Заключение**

Предложена модель образования планетных систем звезд, в основе которой лежит модель образования Солнечной планетной системы – модель протопланетных колец.

В заключение 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>.  
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.
4. 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.
5. 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.

6. 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.
7. Легкоступов М.С. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть I. Постановка задачи // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 34. 19 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-34>
8. 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>
9. 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>
10. 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>
11. 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.
12. 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. Issue 5. P. 616–628.
13. 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 // 81<sup>st</sup> annual meeting of the Meteoritical Society / Abstracts. – July 22 – 27, 2018, Moscow, Russia; Meteoritics and Planetary Science. 2018. Vol. 53. Issue S1. P. 6017.
14. 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.
15. 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.
16. Ruobing Dong, Zhaohuan Zhu, and Barbara Whitney. 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.

17. Carlos Carrasco-González, Thomas Henning, Claire J. Chandler, Hendrik Linz, Laura Pérez, Luis F. Rodríguez, Roberto Galván-Madrid, Guillem Anglada, Til Birnstiel, Roy van Boekel, Mario Flock, Hubert Klahr, Enrique Macias, Karl Menten, Mayra Osorio, Leonardo Testi, José M. Torrelles, and Zhaohuan Zhu. 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.
18. Кант И. Всеобщая естественная история и теория неба // Кант И. Сочинения в шести томах. Т. 1. М.: Мысль, 1963. 543 с.
19. Лаплас П.С. Изложение системы мира. Л.: Наука, 1982. 376 с.
20. Происхождение солнечной системы // Сборник статей под редакцией Г.Ривса. М.: Мир, 1976. 569 с.
21. 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.
22. Сурдин В.Г. Рождение звезд. М.: URSS, 2001. 264 с.
23. Reipurth B., Jewitt D., Keil K. (eds). *Protostars and planets V*. Tucson // Univ. Arisona Press, 2007. 951 p.
24. Larson R.B. The collaps of rotating cloud. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1972. Vol. 156. № 4. P. 437 - 458.
25. 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.
26. Поляченко В.Л., Фридман А.М. Равновесие и устойчивость гравитирующих систем. М.: Наука, 1976. 447 с.
27. Марочник Л.С., Мухин Л.М. Галактический «пояс жизни» // Сборник «Прошлое и будущее Вселенной». М.: Наука, 1986. С. 151-160.
28. 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.
29. Blitz L. Star forming molecular clouds towards the galactic anticentre // *Giant molecular clouds in the Galaxy / Eds. P. M. Solomon, M. G. Edmunds*. Oxford: Pergamon Press. P. 211 – 229.
30. Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
31. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. Строение протопланетного аккреционного диска вокруг Солнца на стадии Т Тельца // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 1996. Т. 30, № 6. С. 496.
32. Поляченко В. Л., Фридман А.М. О законе планетных расстояний // *Астр. ж.* 1972. Т. 49. № 1. С. 157.
33. Галимов Э.М. Проблема происхождения Луны // Сб. «Основные направления геохимии», отв. ред. Э.М. Галимов. М.: Наука, 1995. С. 8 – 43.
34. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.

35. Beckwith S. V. W., Sargent A. I., Chini R. S., Gusten R. A survey for circumstellar disks around young stellar object // *Astron. J.* 1990. V. 99. P. 924 – 945.
36. Calvet N., D'Alessio P., Hartmann L. et al. Evidence for a Developing Gap in a 10 Myr Old Protoplanetary Disk // *Astrophys. J.* 2002. V. 568. P. 1008–1016.
37. Jeans J. H. *Astronomy and cosmogony.* Cambridge, 1929.
38. Гринберг М. *Межзвездная пыль.* М.: Мир, 1979.
39. Alan P. Boss and Sandra A. Keiser. Who Pulled the trigger: A supernova or An Asymptotic Giant Branch Star? // *Astrophys. Journ. Let.* 2010. 717. L1 – L5.
40. Martin Bizzarro, David Uflbeck, Ann Tringuier, Kristine Thrane, James N. Connelly, Bradley S. Meyer. Evidence for a Late Supernova Injection of  $^{60}\text{Fe}$  into the Protoplanetary Disk // *Science.* 2007. Vol. 316. Issue 5828. P. 1178 – 1181.
41. Eisner J. A., Hillenbrand L. A., Carpenter J. M., Wolf S. Constraining the Evolutionary Stage of Class I Protostars: Multiwavelength Observations and Modeling // *Astrophys. J.* 2005. V. 635. Issue 1. P. 396–421.
42. Hueso R., Guillot T. Evolution of protoplanetary disks: constraints from DM Tauri and GM Aurigae // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 442. P. 703–725.
43. Шакура Н.И. Дискковая модель аккреции газа релятивистской звездой в тесной двойной системе // *Астрон. ж.* 1972. Т. 49. С. 921–929.
44. Shakura N.I., Sunyaev R.A. Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astron. Astrophys.* 1973. V. 24. P. 337–353.
45. Колесниченко А.В. Термодинамическая модель сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности космической плазмы // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.* 2014. № 66. 48 с.  
А. В. Колесниченко, М. Я. Маров. Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред. Бином. Лаборатория знаний, 2014. С. 648.
46. Hoyle F. // *Highlights of Astronomy.* 1971. V. 2. P. 195.
47. Schatzman E. // *Highlights of Astronomy.* 1971. V. 2. P. 197.
48. Cameron A.G.W. // *Icarus.* 1962. V. 1. P. 13.
49. Cameron A.G.W. Accumulation processes in primitive Solar nebular // *Icarus.* 1973. V. 18. P. 407.
50. Eisner J. A., Carpenter J. M. Massive Protoplanetary Disks in the Trapezum Region // *Astrophys. J.* 2006. V. 641. Issue 2. P. 1162–1171.
51. White R. J., Greene T. P., Doppmann G.W. et al. Stellar properties of embedded protostars // *Protostars and Planets V / Eds B. Reipurth, D. Jewitt, K.Keil.* Tucson: Univ. of Arizona Press. 2007. 951 p. P. 117–132.
52. Thommes E.W., Lissauer J.J. Planet migration // *Astrophysics of life, 16.* Edited by Mario Livio, Neill Reid and William Sparks. Cambridge University Press, 2005. P.50.
53. Sekiya M., Takeda H. Were planetesimals formed by dust accretion in the solar nebula? // *Earth Planets Space.* 2003. V. 55. P. 263–269.
54. Chiang E.I. Dust in Protoplanetary Disks // *Astrophysics of Dust.* ASP Conference Series. 2004. V. 309. Proceed. Conf. 26–30 May.

55. Ebert R. Habilitationsschrift. Un. f. Frankfurt-am-Main. 1964.
56. Козлов Н.Н., Энеев Т.М. Численное моделирование процесса образования планет из протопланетного диска // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 1977. № 134.
57. Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем // Астр. вест. 1981. Т. XV. № 2. С. 80–94.
58. Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем. // Астр. вест. 1981. Т. XV. № 3. С. 131–140.
59. Энеев Т.М. Кольцевое сжатие вещества в капельной модели протопланетного облака // Астр. вест. 1993. Т. XXVII. № 5. С. 3–25.
60. 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.
61. Галимов Э.М. Образование Земли и Луны из общего супрапланетного газопылевого сгущения // Геохимия. 2011. № 6. С. 563–580.
62. 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 / Ред. Э.М. Галимов. М.: Красанд, 2013. С. 47–59.
63. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Численное моделирование физических процессов при образовании Солнечной планетной системы. Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 22(1). М. 2017.
64. Метод 2D численного расчета газодинамических потоков в подвижных сетках. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 1989.
65. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.М., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
66. Снытников В.Н., Пармон В.Н., Вшивков В.А., Дудникова Г.И., Никитин С.А., Снытников А.В. Численное моделирование гравитационных систем многих тел с газом // Вычислительные технологии. 2002. Т. 7. № 3. С.72.
67. Snytnikov V.N., Dudnikova G.I., Gleaves J.T., Nikitin S.A., Parmon V.N., Stoyanovsky V.O., Vshivkov V.A., Yablonsky G.S., Zakharenko V.S. Space chemical reactor of protoplanetary disk // Adv. Space Res. 2002. Vol. 30. No. 6. P. 1461- 1467.
68. Murachev A.S., Tsvetkov D.V., Galimov E.M., Krivtsov A.M. Numerical Simulation of Circumsolar Ring Evolution. Advances in Mechanics of Microstructured Media and Structures. 2018. Vol. 87. P. 251–262.
69. Hartmann W.K., Davis D.R. Satellite-sized planet-esimals and lunar Origin // Icarus. 1975. V. 24. P. 504 – 515.
70. Gold T. Problems requiring solution // Origin of solar system. R. Jastrow, A. Cameron. (Eds.). N. Y.; London: Acad. Press., 1963. P. 171.
71. Ларин В.Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. М.: Недра, 1980. 216 с.

72. Haisch K. E., Lada E. A., Lada C. J. Disk frequencies and lifetimes in young clusters // *Astrophys. J.* 2001. V. 553. P. L153–L156.
73. 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.
74. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Численное моделирование эволюции протопланетного диска Солнца. Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 24 «Происхождение биосферы и эволюция геобиологических систем», подпрограмма № 1. М. 2010.
75. Брушлинский К.В., Плинер Л.А., Забродина Е.А., Меньшов И.С., Жуков В.Т., Долголева Г.В., Легкоступов М.С. К вопросу неустойчивости протопланетного диска // XIX Всероссийская конференция «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов для решения задач математической физики», посвященная памяти К.И. Бабенко. 10-16 сентября 2012 г. п. Абрау-Дюрсо (г. Новороссийск). Россия.
76. Колесниченко А.В. Некоторые проблемы конструирования космических сплошных сред. Моделирование аккреционных протопланетных дисков. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2017. 372 с.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Основные положения модели образования Солнечной планетной системы, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных газопылевых колец) в протопланетном диске .....	3
2. Анализ данных, относящихся к образованию Солнечной планетной системы, и обоснование модели протопланетных колец .....	6
3. Сравнительная характеристика моделей образования Солнечной планетной системы .....	19
4. Астрофизические исследования протопланетных дисков как экспериментальные исследования, дающие возможность проверки достоверности теоретических моделей образования планетных систем звезд .....	22
5. Об основных физических принципах моделей образования планетных систем звезд .....	24
6. О математической модели образования планетных систем звезд .....	25
Заключение .....	26
Библиографический список .....	26