



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. С. Легкоступов, К вопросу о модели образования планетных систем звезд
солнечного типа, *Матем. моделирование*, 2020, том 32, номер 3, 81–101

DOI: 10.20948/mm-2020-03-05

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и
согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.173

25 марта 2025 г., 19:36:42



К ВОПРОСУ О МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА

© 2020 г. *М.С. Легкоступов*

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва

mchl.legkostupov@gmail.com

DOI: 10.20948/mm-2020-03-05

В настоящей работе впервые в полном объеме представлена модель протопланетных колец – модель образования планетных систем звезд солнечного типа, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных газопылевых колец) в протопланетных дисках звезд. Приведены результаты сравнения основных теорий и моделей образования планетных систем звезд солнечного типа с данными астрофизических наблюдений протопланетных дисков. Показано, что данные астрофизических наблюдений подтверждают справедливость модели протопланетных колец. В модели протопланетных колец дан теоретический прогноз по астрофизическим наблюдениям эволюции структур газопылевых колец ряда протопланетных дисков звезд. Сформулированы предложения по дальнейшей разработке численных алгоритмов эволюции протопланетных дисков звезд солнечного типа, включающей все стадии эволюции, в том числе и образование протопланет.

Ключевые слова: астрофизические наблюдения, протосолнечная туманность, коллапс, протопланетный диск, гравитационная неустойчивость, протопланетное кольцо, планетная система.

ON THE ISSUE OF THE MODEL OF FORMATION OF PLANET SYSTEMS OF THE SOLAR-TYPE STARS

M.S. Legkostupov

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS

In this paper for the first time there is presented in full the model of protoplanetary rings – the model of formation of planetary systems of solar-type stars, which is based on the origin and development of large-scale gravitational instabilities (protoplanetary gas-dust rings) in protoplanetary disks of stars. The results of a comparison of the main theories and models of the formation of planetary systems of solar-type stars with the data of astrophysical observations of protoplanetary disks are presented. It is shown that the data of astrophysical observations confirm the validity of the model of protoplanetary rings. In the model of protoplanetary rings, the theoretical forecast is given for astrophysical observations of the evolution of structures of gas-dust rings of a number of protoplanetary

disks of stars. Suggestions are formulated for further development of numerical algorithms for the evolution of protoplanetary disks of solar-type stars, including all stages of evolution, as well as the formation of protoplanets.

Key words: astrophysical observations, protosolar nebula, collapse, protoplanetary disk, gravitational instability, protoplanetary ring, planetary system.

1. Введение

Данная работа посвящена проблеме образования планетных систем звезд солнечного типа. В настоящее время общепризнанно, что космогония планетных систем была научно сформулирована И. Кантом и П.С. Лапласом, опубликовавшими свои гипотезы о происхождении Солнечной системы более 200 лет назад [1,2]. За это время было предложено большое количество различных альтернативных космогонических гипотез и теорий образования как Солнечной планетной системы, так и планетных систем звезд солнечного типа. Необходимость в понимании и анализе полученных результатов привела к изданию ряда обзоров, в которых излагается как история космогонии, так и подробно анализируются предлагаемые гипотезы [3,4]. Приступая к изложению материала данной работы, представляется целесообразным остановиться, прежде всего, на основных принципах развития космогонии планетных систем, как области науки, относящейся к естественным наукам.

Как известно [5], законы естественных наук, в том числе и законы космогонии планетных систем, описываются на языке математики. Математика является замкнутой в себе наукой и развивается независимо от внешних факторов путем теоретических исследований на основе принятых аксиом. В математике истинность теоремы отождествляется с доказуемостью её из непротиворечивой системы предпосылок (аксиом). Вопрос об адекватности математических моделей реальным объектам или явлениям всегда находится за пределами математики в области естественных наук. Но, в отличие от математики, естественные науки развиваются совершенно другим образом, а именно: путем взаимосвязи экспериментальных исследований объектов или явлений природы и теоретических исследований на основе полученных результатов экспериментов (эксперимент \rightarrow теория \rightarrow теоретический прогноз \rightarrow эксперимент) [6]. Существенным обстоятельством является то, что критерием истины в естественных науках является опыт, эксперимент [6], а для космогонии планетных систем критерием истины являются результаты астрофизических наблюдений, а также результаты экспериментальных исследований с помощью космических аппаратов.

Экспериментальные исследования в области космогонии планетных систем имеют свои особенности [7]. В отличие от физики, в основе которой лежит эксперимент, связанный с произвольным изменением условий протекания явления, астрофизика основывается на наблюдениях, когда исследователь не имеет возможности влиять на ход физического процесса. При этом временной интервал, например, эволюции звезд и их планетных систем на много порядков превышает человеческую жизнь. Однако при изучении того или иного явления обычно имеется возможность наблюдать его на многих небесных объектах при различных условиях, в том числе и на разных стадиях его эволюции, так что в конечном счёте астрофизика может получать достоверные экспериментальные результаты.

Условия оптимального развития естественных наук были сформулированы нобелевским лауреатом П.Л. Капицей [6]: «Работа крупных ученых естествоиспытателей, внесших большой вклад в развитие современного естествознания, неизменно проходила в тесной связи теории и опыта. Поэтому для развития естественных наук на здоровой материалистической основе всякое теоретическое обобщение должно непременно проверяться на опыте. Гармоническое развитие теории и практики является абсолютно необходимым во всех областях естествознания». Насколько в этом плане исторически гармонично развивалась космогония планетных систем, и каковы результаты этой науки на современном этапе ее развития?

В настоящее время в научной литературе нет установившихся названий структур планетных систем звезд. Так, встречаются различные названия протопланетного газопылевого диска Солнца: например, «околосолнечный газопылевой 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 межзвездное газопылевое облако, в котором начинался коллапс и формировалась звезда. Околосолнечное газопылевое облако (околосолнечное облако) – это вращающееся газопылевое облако, которое окружает образующуюся звезду. Протопланетный газопылевой диск звезды (протопланетный диск) – это околосолнечное газопылевое облако после отделения его от звезды. Протопланетные газопылевые кольца (протопланетные кольца) – это газопылевые кольца, на которые распадается протопланетный диск в результате его гравитационной неустойчивости. Протопланета – это газопылевое сгущение (облако), которое в процессе гравитационного сжатия превращается в планету (или в планету и ее спутники).

До середины XX века экспериментальные результаты в космогонии планетных систем в основном предоставлялись посредством астрономиче-

ских наблюдений за Солнечной планетной системой. Только в 70-х годах XX века начались детальные исследования Солнечной системы с помощью космических аппаратов [8], хотя о необходимости точных наблюдений, например, за спутниками Юпитера, писал еще П.С. Лаплас 150 лет назад до начала этих исследований [2]. В конце XX века появились достоверные сообщения об открытии первой экзопланеты («горячий Юпитер») у звезды 51 в созвездии Пегаса [9]. С конца XX века начались астрофизические наблюдения за протопланетными дисками звезд [10].

За последние десятилетия методы астрофизических наблюдений получили существенное развитие. Одним из достижений является введение в строй в 2013 году радиоастрономического комплекса ALMA в чилийской пустыне Атакама, работающего в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах радиоволн, который позволяет получать, например, изображения протопланетных дисков звезд с высокой степенью разрешения [11].

Таким образом, до середины XX века данные наблюдений за планетными системами в основном относились к Солнечной системе, сформировавшейся на момент наблюдения. Все теоретические обобщения и выводы на более ранние моменты времени эволюции Солнечной системы, которые исходили из этих результатов, не могли быть подтверждены астрономическими наблюдениями – их просто не существовало. Ситуация кардинальным образом изменилась к настоящему времени.

В данной работе нет оснований подробно рассматривать все предлагавшиеся космогонические гипотезы и теории, так как к настоящему времени определены две основные теории (модели) образования планетных систем звезд солнечного типа [4,12,13]. Теория твердотельной аккумуляции – теория образования планет путем аккумуляции твердых тел и частиц [3,4] является общепризнанной. Альтернативными моделями являются модели образования планетных систем из газопылевых сгустков путем образования протопланет [2,13-18]. В настоящей работе мы будем следовать одной из таких моделей, а именно: модели протопланетных колец – модели образования планетных систем звезд солнечного типа, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных газопылевых колец) в протопланетном диске, предложенной в работах [13,19-26]. Наиболее полное описание этой модели с обоснованием ее основных положений дано в препринтах [13,26].

2. Основные положения модели протопланетных колец – модели образования планетных систем звезд солнечного типа

1. В модели протопланетных колец предполагается, что звезда солнеч-

ного типа и ее планетная система образовались из вращающейся протозвездной газопылевой туманности в результате единого динамического процесса ее сжатия – коллапса, аналогично, как это было предсказано И. Кантом [1] и П.С. Лапласом [2]. Этот процесс можно условно разделить на две последовательные стадии: образование звезды с формирующимся околозвездным газопылевым облаком и образование протопланетного газопылевого диска с последующим образованием планет.

Рассмотрим эволюцию протозвездной газопылевой туманности на примере протосолнечной туманности.

2. Протосолнечная туманность в начальном ее состоянии представляла собой вращающееся газопылевое облако с плотностью $\sim 10^{-18} - 10^{-19}$ г/см³; температурой ~ 10 К; массой, приблизительно равной массе Солнца [27-30]. Среда протосолнечной туманности на $\sim 98\%$ по массе состояла из молекулярного водорода ($\sim 70\%$) и гелия ($\sim 28\%$). Массовая доля пыли составляла $\sim 1\%$ [27-30].

Облако протосолнечной туманности удерживалось в равновесии собственной гравитацией. Известно, что в таком состоянии изолированное облако гравитационно устойчиво [31].

Каким образом облако перешло в гравитационно неустойчивое состояние? 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. Возможны несколько явлений, которые могли привести к таким внешним возмущениям: вспышка сверхновой [32]; сжатие протосолнечной туманности при ее прохождении через спиральный рукав [33]; образование массивной звезды вблизи протосолнечной туманности [34].

Это была первая гравитационная неустойчивость среды при образовании Солнечной планетной системы.

3. Формирование Солнца как звезды произошло за промежуток времени, равный примерно 10^6 лет [35]. Солнце за этот период (первая стадия) аккумулировало около 90% своей массы. В это же время (одновременно с формированием Солнца) происходило образование околосолнечного облака, которое 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. Наиболее приемлемым механизмом, ответственным за перераспределение момента количества движения между Солнцем и протопланетным диском, является турбулентная вязкость [36,37].

4. Вторая стадия формирования Солнечной системы соответствует стадии Т Тельца до выхода Солнца на главную последовательность [29,30,35,38]. 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. Когда центробежная сила этого слоя сравнивается с силой притяжения Солнца, слой вещества диска останавливается. К моменту отделения околосолнечного облака от Солнца вокруг него может сохраниться лишь незначительная по массе прозрачная часть аккреционной оболочки. Более значительная часть околосолнечного облака в виде тора находится за пределами прозрачной части аккреционной оболочки и представляет собой протопланетный диск, окружающий звезду. На второй стадии идет более медленное формирование протопланетного диска, и эта стадия по ее продолжительности оценивается примерно в 10^6 – 10^7 лет [30,35,38].

На начальной стадии эволюции протопланетного диска, пока процессы концентрации его пылевой компоненты не привели к существенному изменению среды диска, состояние его газопылевой среды можно с достаточной точностью описывать уравнением состояния идеального газа [4,23-25].

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/см³, температура ~ 300 К [4]. 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 [23-25,39].

6. В результате коллапса протосолнечной туманности вокруг Солнца образовался протопланетный диск в состоянии гравитационной неустойчивости. Это вторая гравитационная неустойчивость среды при коллапсе про-

тосолнечной туманности. Для того чтобы в среде диска начала развиваться гравитационная неустойчивость, необходимы соответствующие возмущения среды диска [12,15,31]. Такие возмущения могут зарождаться, например, при резком уменьшении аккреционного потока из диска на Солнце. В этом случае возмущения будут иметь вид концентрических (радиальных) возмущений, и в результате гравитационной неустойчивости среды диска из них образуются протопланетные газопылевые кольца, которые и соответствуют зонам планет Солнечной системы [13].

7. Протопланетное газопылевое 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) [13,25].

8. Процесс образования планетного тела происходит внутри протопланеты путем перемещения ее среды под действием собственного гравитационного поля протопланеты в центральную ее часть, где и формируется тело планеты.

9. Газовая составляющая протопланет земной группы выносятся из них солнечным ветром, когда Солнце находится на стадии Т Тельца. По разным источникам информации продолжительность солнечного ветра несколько различается [30,33,35], 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 согласно законам теории (модели) твердотельной аккумуляции, разработанной и подробно исследованной О.Ю. Шмидтом, В.С. Сафроновым и их учениками [3,4].

Данные положения модели протопланетных колец представляют собой физическую модель образования планетных систем звезд солнечного типа, построенную на основании исследований [13,19-26], включающих также и численные расчеты на основе приближенных математических моделей начального этапа эволюции протопланетного диска [12,19-22].

Так как обоснование модели протопланетных колец дано в работах [13, 19-26], то в настоящей статье мы ограничимся только кратким описанием наиболее важных аспектов, подтверждающих достоверность этой модели.

Сопоставление модели протопланетных колец с моделью твердотельной аккумуляции планет [3,4] показывает, что в обеих моделях использует-

ся основополагающий принцип – принцип гравитационной неустойчивости среды протопланетного диска. Основное расхождение моделей при использовании этого принципа заключается только в размерах длины волны гравитационной неустойчивости среды диска. 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 модели твердотельной аккумуляции гравитационная неустойчивость на начальной стадии эволюции протопланетного диска, т.е. фактически в газовой среде, исключается [3,4].

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 потенциальной гравитационной неустойчивости среды туманности уменьшается, начиная от $\sim 1.6 \cdot 10^{17}$ см. Очевидно, что 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 [12,23-25].

Таким образом, протопланетные газопылевые кольца возникают значительно раньше, чем зарождаются планетезимали. Отсюда следует, если протопланеты образуются из протопланетных колец, то 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 значительно позднее – по-видимому, после образования протопланетных колец и протопланет.

Несомненный интерес представляет модель Энеева-Козлова [16]. В этой модели также не используется крупномасштабная гравитационная неустойчивость в ее явном виде, но в численных расчетах она математически возникает в виде протопланетных колец, состоящих из газопылевых сгущений [40]. Анализ показывает, что модель протопланетных колец на этапе после фрагментации колец имеет много общего с моделью Энеева-Козлова и их идеей образования протопланет [16,40].

Достигнутый уровень разработки модели протопланетных колец позволяет в настоящее время провести сравнение теоретических выводов модели с результатами астрофизических наблюдений, а также дать теоретический прогноз по астрофизическим наблюдениям протопланетных дисков.

3. Краткий аналитический обзор избранных работ по астрофизическим наблюдениям протопланетных дисков звезд солнечного типа

Результаты астрофизических наблюдений за молодыми звездами солнечного типа подтверждают достоверность основополагающей гипотезы о совместном образовании звезды солнечного типа и ее планетной системы из единой протозвездной (протосолнечной) газопылевой туманности, а также достоверность следующих важных гипотез [27,28,33,41,42]:

- процесс планетообразования начинался в протопланетном газопылевом диске;
- закон вращения протопланетных газопылевых дисков близок к закону Кеплера.

Астрофизические исследования последних лет привели к неожиданному открытию газопылевых колец в протопланетных дисках звезд [43-48], которые были предсказаны при разработке модели протопланетных колец [12,19,20,23-25,49-51]. Изображения протопланетных дисков при астрофизических наблюдениях были получены с высокой степенью разрешения. Таким образом, появилась реальная возможность экспериментальной проверки достоверности теоретических моделей образования планетных систем как Солнца, так и других звезд солнечного типа.

Рассмотрим результаты астрофизических исследований с точки зрения двух основных моделей образования планетных систем: модели твердотельной аккумуляции [3,4] и модели протопланетных колец [13].

Протопланетные диски на полученных изображениях представляют собой яркие кольцевые газопылевые структуры, разделенные темными промежутками, в которых плотность газопылевого вещества существенно понижена [43,46-48].

Как известно [13], в классической теории твердотельной аккумуляции [3,4] отсутствует явление, наблюдаемое в астрофизических исследованиях в виде кольцевых газопылевых структур в протопланетных дисках звезд солнечного типа.

В модели протопланетных колец [13] газопылевые кольцевые структуры в протопланетных дисках, предсказанные в работах [12,19,20,23-25,49-51], были названы протопланетными кольцами [19]. Возникают они в рамках этой модели естественно и красиво в результате гравитационной неустойчивости протопланетного диска. Более того, в работе [25] в 2014 году было высказано предположение, что такие структуры могут быть 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».

Проанализируем более детально возможную связь «ярких» колец, которые наблюдаются в протопланетных дисках звезд в астрофизических исследованиях, с протопланетными кольцами модели [13].

В работах [23-25,39] 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. Так как наблюдаемые в астрофизических исследованиях яркие кольца состоят из пылевых частиц и газа, то в рассматриваемой модели [13] естественно предположить, что эти кольца являются протопланетными газопылевыми кольцами, образовавшимися в результате гравитационной неустойчивости протопланетного диска звезды солнечного типа. В процессе гравитационной неустойчивости газопылевая среда перемещается из пространства диска, соответствующего темным промежуткам, в яркие кольца, создавая структуру ярких газопылевых колец с темными промежутками между ними. Таким образом, в этом процессе плотность газопылевой среды в ярких кольцах возрастает, а в темных промежутках между ними падает [12, 51].

Для дальнейшего сопоставления модели протопланетных колец с результатами астрофизических исследований необходимо привести более подробные данные о протопланетных газопылевых кольцах и их эволюции в рамках этой модели.

Протопланетные кольца возникают в гравитационно неустойчивой среде протопланетного диска в результате возмущения, вызванного предположительно достаточно резким уменьшением аккреционного потока газопылевого вещества из протопланетного диска на звезду [13,25]. В начальные моменты проявления гравитационной неустойчивости в среде диска возникает радиальная стоячая волна плотности [12,23-25]. По мере развития гравитационной неустойчивости газопылевая среда диска из областей с пониженной плотностью перемещается в области с повышенной плотностью. Следует подчеркнуть, что при этом процессе перемещаются не только пылевые частицы, но и газовая компонента среды. При дальнейшем развитии гравитационной неустойчивости области диска с повышенной плотностью среды образуют газопылевые кольца, а в промежутках между ними плотность газопылевой среды продолжает уменьшаться. В процессе эволюции протопланетные кольца сжимаются, а затем в силу их гравитационной неустойчивости [25] фрагментируют (разбиваются) на газопылевые сгущения.

Таким образом, можно выделить две стадии в эволюции протопланетных колец: первая – это стадия зарождения и развития протопланетных колец, на которой протопланетные кольца имеют осевую симметрию; вторая – это стадия фрагментации протопланетных колец (распада колец на газопылевые сгущения), на которой протопланетные кольца имеют существенно неосесимметричную геометрию (knotty rings).

Протопланетные кольца в заключительной фазе первой стадии своей эволюции (перед фрагментацией на газопылевые сгущения) представляют собой осесимметричные тороидальные газопылевые кольца, плотность среды в которых возрастает от поверхности кольца к его центральной линии [19-22,49]. В промежутках между кольцами плотность газопылевой среды может достигать предельно низких значений.

На второй стадии эволюции протопланетное кольцо может состоять из отдельных газопылевых сгущений, которые взаимодействуя между собой, сталкиваясь и объединяясь, и приводят к образованию протопланеты и ее спутников (спутника).

Таким образом, в модели протопланетных колец протопланеты формируются из протопланетных колец. Поэтому на первой стадии эволюции протопланетных колец (перед фрагментацией на газопылевые сгущения) между ними не может быть никаких протопланет (планет).

Так как наблюдаемые околозвездные 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 формирования протопланеты.

Для проверки достоверности модели протопланетных колец [13] при проведении астрофизических наблюдений требуется получение достаточно подробных данных о фрагментации протопланетных колец на газопылевые сгущения и дальнейшем образовании из них протопланет. Это объясняется тем, что не очевиден факт образования протопланеты после распада протопланетного кольца на газопылевые сгущения. Вероятно, первыми работами, в которых теоретически был получен результат образования протопланеты из кольца газопылевых сгущений, являются работы Т.М. Энеева и Н.Н. Козлова [16,40,52,53]. В работе А.М. Кривцова и Е.М. Галимова с соавторами [54] также было показано, что протопланетное кольцо при превышении пороговой концентрации частиц распадается на фрагменты (кластеры) с последующим образованием одного или двух пылевых объектов.

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. Показателен пример из Солнечной планетной системы. Известно, что между орбитами Марса и Юпитера расположен пояс астероидов. С точки зрения модели протопланетных колец пояс астероидов – это протопланетное кольцо, из которого не смогла образоваться протопланета. Одна из возможных причин такой эволюции кольца – влияние Юпитера. Таким образом, вероятно, не существует строгой определенности (или очередности) при образовании протопланет из протопланетных колец: все определяется сложным гравитационным взаимодействием в системе (структуре) протопланетных колец.

Перейдем к рассмотрению результатов астрофизических исследований протопланетных дисков звезд.

Основные результаты астрофизических наблюдений, представленные в работах [43,46-48], в общем виде могут быть сведены к следующим:

- все исследованные протопланетные диски имели структуру ярких колец с темными промежутками между ними;
- в ярких кольцах плотность пылевой компоненты повышена, в темных промежутках плотность пылевой компоненты снижена, а в отдельных случаях практически отсутствует;
- ширина ярких колец и темных промежутков между ними различается у разных дисков и изменяется в широком диапазоне от единиц а.е. до десятков а.е.;
- структура ярких колец протопланетных дисков меняется от осесимметричных до фрагментированных на отдельные газопылевые сгущения;
- в [46] целенаправленный поиск массивных протопланет во внешних промежутках между яркими кольцами дал отрицательный результат;
- в [43] обнаружен компактный источник излучения в середине второго промежутка (кольцевого зазора), который идентифицируется с находением в этом месте протопланеты с массой, равной 0.6 массы Юпитера.

В рассмотренных работах высказывается точка зрения, что наблюдаемые структуры в виде ярких газопылевых колец с темными промежутками между ними являются закономерными явлениями в эволюции протопланетных дисков звезд.

Результаты исследований, как правило, анализируются в представлениях теории твердотельной аккумуляции [3,4]. Так как наблюдаемые явления в рамках этой теории объяснить не представляется возможным, то пред-

лагаются различные дополнительные гипотезы (механизмы) для объяснения этих результатов, но при этом авторы остаются в рамках представлений теории твердотельной аккумуляции. Предпринимаются попытки объяснить наблюдаемые структуры, используя не полную модель твердотельной аккумуляции, а лишь отдельные ее положения. Следует отметить, что модель твердотельной аккумуляции создавалась многими учеными в рамках определенных предпосылок и является хорошо аргументированной при сделанных предположениях. В случаях, когда используется только одна из предпосылок этой модели для объяснения наблюдаемых явлений, то, как правило, это только запутывает общую картину явления. Так, например, темные промежутки между кольцами интерпретируют как пространство, которое образовавшаяся протопланета «очистила» от пыли в процессе своего формирования. В данном случае сразу возникает один из вопросов: в силу каких законов пространство протопланетного диска так резко оказалось разделенным на зоны, в одних из которых протопланеты уже образовались, а в соседних процесс образования находится только в самой начальной стадии эволюции протопланетного диска? Ответ не известен.

В основе же модели протопланетных колец лежит фундаментальный принцип гравитационной неустойчивости (в работах [12,19,20,23-25,49-51] этот принцип используется в форме Джинса [55]). В результате действия этого принципа, с одной стороны, на начальном этапе эволюции протосолнечной туманности происходит ее коллапс (сжатие) с образованием звезды, а, с другой стороны, на этапе эволюции протопланетного диска наблюдается в некотором смысле противоположное явление – распад протопланетного диска на протопланетные кольца, из которых в дальнейшем образуются протопланеты.

В плане анализа результатов астрофизических наблюдений на предмет проверки достоверности моделей (гипотез) образования планетных систем звезд солнечного типа обращает на себя внимание работа Carlos Carrasco-González и др. [46]. В этой работе авторы выдвинули предположение, что темные промежутки между газопылевыми кольцами возникают не в результате образования в пространстве между кольцами протопланет, как это обычно предполагают, а существуют альтернативные механизмы образования «темных и светлых концентрических колец» в протопланетных дисках звезд. Авторы не указывают, какие именно альтернативные механизмы они имеют в виду (вероятно, работы [19,20,23-25,49,] им были не известны). Далее по предлагаемому авторами сценарию происходит образование протопланет непосредственно из «ярких плотных колец» диска звезды. При этом сценарии результаты астрофизических наблюдений протопланетного диска

звезды HL Тау интерпретируются авторами, как начальная фаза образования протопланет из «ярких плотных колец». Как нетрудно видеть, предлагаемый авторами работы [46] сценарий образования планетных систем звезд солнечного типа в своих основных чертах совпадает с эволюцией протопланетного диска в рамках модели протопланетных колец.

Результаты сравнения астрофизических наблюдений [43,46-48] и теоретических работ [12,13,19,20,23-25,49-51] дают основания полагать, что наблюдаемая структура протопланетных дисков в виде ярких колец с темными промежутками между ними подтверждает основные положения модели протопланетных колец [13].

В рамках этой модели результаты астрофизических наблюдений, представленные в работах [43,46-48], можно классифицировать в следующей последовательности по отношению к эволюции структуры протопланетных колец:

– структура протопланетных колец диска звезды TW Нуа в астрофизических наблюдениях работы [47] соответствует первой стадии эволюции протопланетных колец (это стадия эволюции перед фрагментацией протопланетных колец); в этом случае в темных промежутках между кольцами не следует ожидать присутствия протопланет;

– структура протопланетных колец диска звезды HL Тау в астрофизических наблюдениях работы [46] соответствует начальной фазе второй стадии эволюции протопланетных колец: зафиксирован разрыв первого протопланетного кольца с образованием одного газопылевого сгущения; в этом случае в темных промежутках между кольцами также не следует ожидать присутствия протопланет;

– структура протопланетных колец диска звезды HD 169142 в астрофизических наблюдениях работы [43] соответствует второй стадии эволюции протопланетных колец (стадии фрагментации протопланетных колец): зафиксирована фрагментация яркого газопылевого протопланетного кольца на два газопылевых сгущения; в этом случае следует ожидать, что в темных промежутках между яркими кольцами будут обнаружены протопланеты, которые образовались из ранее находившихся в этих местах протопланетных колец [26];

– структура протопланетных колец диска AS 209 звезды Ophiuchus в астрофизических наблюдениях работы [48], вероятно, соответствует более раннему периоду второй стадии эволюции, по сравнению со структурой, наблюдаемой в [43]; в этом случае, по-видимому, следует ожидать обнаружения асимметрии в некоторых газопылевых кольцах диска AS 209 при более детальном исследовании и, возможно, открытия протопланет в темных промежутках.

При сравнении результатов работ [46] и [47] обращает на себя внимание, что протопланетный диск TW Нуа на порядок старше диска HL Тау. Отсюда следовало ожидать, что наблюдаемая структура ярких колец с темными промежутками между ними в диске TW Нуа будет находиться на более поздней стадии эволюции, чем в диске HL Тау. В действительности наблюдается противоположная картина: структура ярких колец с темными промежутками между ними в диске TW Нуа соответствует более ранней стадии эволюции, чем в диске HL Тау. Протопланетные кольца в диске TW Нуа, вероятно, начинают только зарождаться, поэтому контраст между яркими и темными кольцами выражен незначительно. Так как плотность среды диска TW Нуа возрастает с уменьшением радиуса, то гравитационная неустойчивость во внутренних кольцах наступает раньше, и они формируются с опережением по времени. Более глубокий первый промежуток перед первым ярким кольцом диска TW Нуа в модели протопланетных колец, вероятно, обусловлен именно этим обстоятельством. Вопрос: почему гравитационная неустойчивость в диске TW Нуа реализовалась значительно позднее, чем в диске HL Тау, на данный момент остается открытым.

В [25] было высказано предположение, что гравитационная неустойчивость протопланетного диска и образование протопланетных колец могут возникнуть и на стадии активного аккреционного процесса. Астрофизические наблюдения протопланетных дисков звезд [46] подтверждают справедливость этого предположения.

4. Математическое моделирование эволюции протопланетного диска звезд солнечного типа в модели протопланетных колец

Следует остановиться на вопросе о проведении математического моделирования физических процессов в рамках модели протопланетных колец. С позиций этой модели проводить математическое моделирование взаимодействия планета-диск, как это было сделано, например, в [48], не имеет смысла: в модели протопланетных колец известен механизм образования газопылевых колец – это гравитационная неустойчивость протопланетного диска [13]. В модели протопланетных колец целесообразно проводить математическое моделирование образования структуры гравитационно неустойчивых протопланетных колец и дальнейшей их эволюции (фрагментации протопланетных колец, образования протопланет), включая и математическое моделирование взаимодействий протопланета (протопланеты)-система гравитационно неустойчивых протопланетных колец.

Так, например, в [19-22] было проведено исследование протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции. Для этой цели была разработана численная модель [19] на основе метода численного решения

двумерных газодинамических течений в областях сложной формы с подвижными границами, разработанного С.К. Годуновым и А.В. Забродиным с соавторами. Уравнение состояния среды диска в этих расчетах представляло собой уравнение идеального газа, в котором пылевая компонента учитывалась только в виде изменения молекулярного веса газа, что допустимо на этом этапе эволюции диска.

Для проведения численного моделирования эволюции протопланетного диска, включающей как начальную стадию зарождения гравитационной неустойчивости в протопланетном диске, так и возникновение протопланетных колец, их развитие, фрагментацию колец и образование протопланет, необходима численная трехмерная модель эволюции протопланетного диска с двухфазным уравнением состояния, адекватно описывающим пылевую компоненту среды диска.

Начальные разработки такой модели представлены, например, в работах [56-58].

5. Заключение

Как ранее было отмечено в данной работе, со времен И. Канта [1] и П.С. Лапласа [2] было предложено большое количество гипотез и теорий образования планетных систем солнечного типа. Однако, следует признать, что 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 на тот момент гипотеза была не в состоянии объяснить распределение массы и момента количества движения между Солнцем и планетами. В связи с представленными результатами исследований имеет смысл восстановить в памяти, 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 [2]. Лаплас в своей гипотезе не использовал принцип гравитационной неустойчивости протопланетного диска. Он предполагал, что работает только закон сохранения момента количества движения слоев газопылевого вещества протопланетного диска в сочетании с центробежной силой и притяжением звезды, которые и обеспечивают расслоение протопланетного диска на кольца. Как показывает анализ, этих предположений недостаточно, и с этой стороны гипотеза Лапласа также подвергалась многочисленной критике [7]. Основные стадии дальнейшей эволюции

колец Лапласа с образованием протопланет подтверждаются в модели протопланетных колец [13].

В данной работе представлены:

– основные положения модели образования планетных систем звезд – модели протопланетных колец, в основе которой лежит зарождение и развитие крупномасштабных гравитационных неустойчивостей (протопланетных газопылевых колец) в протопланетном диске;

– результаты сравнения данных астрофизических наблюдений [43,46-48] и модели протопланетных колец (теоретических работ [12,13,19,20,23-25, 49-51]), которые дают основания полагать, что наблюдаемые структуры протопланетных дисков в виде ярких колец с темными промежутками между ними подтверждают основные положения модели протопланетных колец [13];

– теоретический прогноз по астрофизическим наблюдениям эволюции структур газопылевых колец ряда протопланетных дисков звезд в модели протопланетных колец;

– предложения по дальнейшей разработке численных алгоритмов эволюции протопланетных дисков звезд солнечного типа, включающей все стадии эволюции, в том числе и образование протопланет.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *И. Кант*. Всеобщая естественная история и теория неба. Сочинения в шести томах. – М.: Мысль, 1963, т.1, 543 с.;
I. Kant. Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels. – Königsberg: Peterson, 1755.
2. *П.С. Лаплас*. Изложение системы мира. – Л.: Наука, 1982, 376 с.
P.S. Laplace. Exposition du Systeme du Monde. – Paris: V. Courcier, 1796.
3. *В.С. Сафронов*. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. – М.: Наука, 1969, 244 с.;
V.S. Safronov. Evoliutsiia doplanetnogo oblaka i obrazovanie Zemli i planet. – М.: Nauka, 1969, 244 s.
4. *А.В. Витязев, Г.В. Печерникова, В.С. Сафронов*. Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. – М.: Наука, 1990, 296 с.;
A.V. Vitiazev, G.V. Pechernikova, V.S. Safronov. Planety zemnoi gruppy: Proiskhozhdenie i ranniaia evoliutsiia. – М.: Nauka, 1990, 296 s.
5. *Ю.И. Янов*. Математика, метаматематика и истина. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2006, препринт № 77, 32 с.;
Y.I. Yanov. Matematika, metamatematika i istina. – М.: IPM im. M.V. Keldysha RAN,

- 2006, preprint № 77, 32 s.
6. П.Л. Капица. Эксперимент. Теория. Практика. – М.: Наука, 1974, 288 с.;
P.L. Kapitsa. Eksperiment. Teoriia. Praktika. – M.: Nauka, 1974, 288 s.
 7. О.В. Струве, В. Зебергс. Астрономия 20 века. – М.: Мир, 1968, 551 с.;
O.V. Struve, V. Zebergs. Astronomy of the 20th Century. – N-Y: Macmillan, 1962, 544 p.
 8. Д. Джевит, Я. Клейна, С. Шеннард. Самые странные спутники в Солнечной системе // В мире науки, 2006, №11, с.23-29;
D. Dzhevit, Ia. Kleina, S. Sheppard. Samye strannye sputnik v Solnechoi sisteme // V mire nauki, 2006, № 11, s. 23–29.
 9. J.H.C. Martins et al. Evidence for a spectroscopic direct detection of reflected light from 51 Peg b // Astronomy & Astrophysics, 2015, v. 576, A134.
 10. F. Roques, H. Scholl, B. Sicardy, B.A. Smith. Is there a planet around β Pictoris? Perturbations of a planet on a circumstellar dust disk: 1. The numerical model // Icarus, 1994, v.108, №1, p.37-58.
 11. A. Wooten, A.R.R. Tompson. The Atakama Large Millimeter/Submillimeter Array // Proceedings of the IEEE, 2009, v.97, №8, p.1463-1471.
 12. Г.В. Долголева, М.С. Легкоступов, Л.А. Плинер. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца // Матем. мод., 2018, т.30, №2, с.130-148;
G.V. Dolgoleva, M.S. Legkostupov, L.A. Pliner. On the Issue of the Gravitational Instability of the Solar Protoplanetary Disk // MM&CS, 2018, v.10, №5, p.616-628.
 13. М.С. Легкоступов. К вопросу о модели образования планетных систем звезд. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2018, препринт № 229, 31 с.;
M.S. Legkostupov. K voprosu o modeli obrazovaniia planetnykh system zvezd. – M.: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2018, preprint № 229, 31 s.
 14. R. Ebert. Habilitationsschrift. Un. f. Frankfurt-am-Main, 1964.
 15. В.Л. Поляченко, А.М. Фридман. О законе планетных расстояний // Астр. ж., 1972, т.49, №1, с.157-164;
V.L. Poliachenko, A.M. Fridman. O zakone planetnykh rasstoianii // Astr. zh., 1972, t.49, №1, s.157-164.
 16. Т.М. Энеев, Н.Н. Козлов. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем // Астр. вест., 1981, т.XV, №3, с.131-140;
T.M. Eneev, N.N. Kozlov. Model akumulatsionnogo protsessa formirovaniia planetnykh sistem // Astr. vest., 1981, t.XV, №3, s.131-140.
 17. Э.М. Галимов, А.М. Кривцов, А.В. Забродин, М.С. Легкоступов и др. Динамическая модель образования системы Земля-Луна // Геохимия, 2005, №11, с.1139-1150;
E.M. Galimov, A.M. Krivtsov, A.V. Zabrodin, M.S. Legkostupov i dr. Dinamicheskaia model obrazovaniia sistemy Zemlia-Luna // Geokhimiia, 2005, №11, s.1139-1150.
 18. Э.М. Галимов. Образование Земли и Луны из общего супрапланетного газопылевого сгущения // Геохимия, 2011, №6, с.563-580;
E.M. Galimov. Obrazovanie Zemli i Luny iz obshchego supraplanetnogo gazopylevogo sgushcheniia // Geokhimiia, 2011, №6, s.563-580.
 19. А.В. Забродин, Е.А. Забродина, М.С. Легкоступов, К.В. Мануковский, Л.А. Плинер. Некоторые модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2006, препринт № 70, 44 с.;
A.V. Zabrodin, E.A. Zabrodina, M.S. Legkostupov, K.V. Manukovskii, L.A. Pliner. Nekotorye modeli opisaniia protoplanetnogo diska Solntsa na nachalnou stadii ego evoliutsii. –

- М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2006, preprint № 70, 44 с.
20. *А.В. Забродин, Е.А. Забродина, М.С. Легкоступов и др.* Некоторые модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции. Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Ред. Э.М. Галимов. – М.: Либроком, 2008, с.297-316;
A.V. Zabrodin, E.A. Zabrodina, M.S. Legkostupov i dr. Nekotorye modeli opisaniia protoplanetnogo diska Solntsa na nachalnou stadii ego evoliutsii. Problemy zarozhdeniia i evoliutsii biosfery / Red. E.M. Galimov. – М.: Librokov, 2008, s.297-316.
 21. *К.В. Брушлинский, Л.А. Плинер, Е.А. Забродина, И.С. Меншов et al.* 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.
 22. *К.В. Брушлинский, Г.В. Долголева, В.Т. Жуков, Е.А. Забродина, М.С. Легкоступов и др.* К вопросу об эволюции протопланетного диска Солнца // Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Ред. Э.М. Галимов. – М.: Красанд, 2013, с.33-46;
K.V. Brushlinskii, G.V. Dolgoleva, V.T. Zhukov, E.A. Zabrodina, M.S. Legkostupov i dr. K voprosu ob evoliutsii protoplanetnogo diska Solntsa // Problemy zarozhdeniia i evoliutsii biosfery / Red. E.M. Galimov. – М.: Krasand, 2013, s.33-46.
 23. *М.С. Легкоступов.* К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Ч. I. Постановка задачи. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2014, препринт №34, 19 с.;
M.S. Legkostupov. K voprosu o gravitatsiinnoi neustoichivosti protoplanetnogo diska Solntsa. Ch. I. Postanovka zadachi. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2014, preprint №34, 19 s.
 24. *М.С. Легкоступов.* К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Ч. II. Дисперсионные уравнения. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2014, препринт №35, 33 с.;
M.S. Legkostupov. K voprosu o gravitatsiinnoi neustoichivosti protoplanetnogo diska Solntsa. Ch. II. Dispersionnye uravneniia. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2014, preprint №35, 33 s.
 25. *М.С. Легкоступов.* К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Ч. III. К развитию и обоснованию модели. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2014, препринт №36, 24 с.;
M.S. Legkostupov. K voprosu o gravitatsiinnoi neustoichivosti protoplanetnogo diska Solntsa. Ch. III. K razvitiuu i obosnovaniuu modeli. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2014, preprint №36, 24 s.
 26. *М.С. Легкоступов.* К вопросу об астрофизических исследованиях протопланетных дисков звезд. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2019, препринт №6, 19 с.;
M.S. Legkostupov. K voprosu ob astrofizicheskikh issledovaniiax protoplanetnykh diskov zvezd. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2019, preprint №6, 19 s.
 27. *В.Г. Сурдин.* Рождение звезд. – М.: URSS, 2001, 264 с.;
V.G. Surdin. Rozhdenie zvezd. – М.: URSS, 2001, 264 s.
 28. *B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil (eds).* Protostars and planets V. – Tucson: Univ. Arisona Press, 2007, 951 p.
 29. *R.B. Larson.* The collaps of rotating cloud // Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1972, v.156, №4, p.437-458.
 30. *R.B. Larson.* The evolution of spherical protostars with masses 0.25 M_{\odot} to M_{\odot} // Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1972, v.157, №2, p.121-145.
 31. *В.Л. Поляченко, А.М. Фридман.* Равновесие и устойчивость гравитирующих систем. – М.: Наука, 1976, 447 с.;

- V.L. Poliachenko, A.M. Fridman.* Ravnovesie i ustoichivost gravitiruiushchikh sistem. – М.: Nauka, 1976, 447 s.
32. *Л.С. Марочник, Л.М. Мухин.* Галактический «пояс жизни» // Прошлое и будущее Вселенной. – М.: Наука, 1986, с.151-160;
L.S. Marochnik, L.M. Mukhin. Galakticheskii “poias zhizni” // Proshloe i budushchee Vselennoi. – М.: Nauka, 1986, s.152-160.
33. *О.Л. Кусков, В.А. Дорофеев, В.А. Кронрод, А.Б. Макалкин.* Системы Юпитера и Сатурна: формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. – М.: ЛКИ, 2009, 576 с.;
O.L. Kuskov, V.A. Dorofeev, V.A. Kronrod, A.B. Makalkin. Sistemy Iupitera i Saturna: formirovanie, sostav i vnutrennee stroenie krupnykh sputnikov. – М.: LKI, 2009, 576 s.
34. *L.Blitz.* Star forming molecular clouds towards the galactic anticentre // Giant molecular clouds in the Galaxy / Eds. P.M. Solomon, M.G. Edmunds. – Oxford: Pergamon Press, 1980, p.211-229.
35. *А.Б. Макалкин, В.А. Дорофеева.* Строение протопланетного аккреционного диска вокруг Солнца на стадии Т Тельца // Астр. вест. Исследования Солнечной системы, 1995, т.29, №2, с.99-122;
A.B. Makalkin, V.A. Dorofeeva. Stroenie protoplanetnogo akkretsiionnogo diska vokrug Solntsa na stadii T Teltsa // Astr. vest. Issledovaniia Solnechnoi sistemy, 1995, t.29, №2, s.99-122.
36. *Н.И. Шакура.* Дискковая модель аккреции газа релятивистской звездой в тесной двойной системе // Астрон. ж., 1972, т.49, с.921-929;
N.I. Shakura. Diskovaiia model akkretsii gaza relativistckoi zvezdoi v tesnoi dvoinoi sisteme // Astron. zh., 1972, t.49, s.921-929.
37. *N.I. Shakura, R.A. Sunyaev.* Black holes in binary systems. Observational appearance // Astron. Astrophys., 1973, v.24, p.337-353.
38. Происхождение Солнечной системы // Ред. Г. Ривс. – М.: Мир, 1976, 569 с.;
Proiskhozhdenie Solnechnoi sistemy // Red. G. Rivs. – М.: Mir, 1976, 569 s.
39. *I.S. Menšov, V.T. Zhukov, M.S. Legkostupov, L.A. Pliner, G.V. Dolgoleva, E.A. Zbrodina.* 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, v.53, issue S1, p.6017.
40. *Т.М. Энеев.* Кольцевое сжатие вещества в капельной модели протопланетного облака // Астр. вест., 1993, т. XXVII, №5, с.3-25;
T.M. Eneev. Koltsevoe szhatie veshchestva v kapelnoi modeli protoplanetnogo oblaka // Astr. vest., 1993, t. XXVII, №5, s.3-25.
41. *S.V.W. Beckwith, A.I. Sargent, R.S. Chini, R. Gusten.* A survey for circumstellar disks around young stellar object // Astron. J., 1990, v.99, p.924-945.
42. *N. Calvet, P.D’Alessio, L. Hartmann et al.* Evidence for a Developing Gap in a 10 Myr Old Protoplanetary Disk // Astrophys. J., 2002, v.568, p.1008-1016.
43. *M. Osorio, G. Anglada, C. Carrasco-Gonzalez et al.* Imaging the inner and outer gaps of the pre-transitional disk of HD 169142 at 7 mm // Astrophys. J. Lett., 2014, v.791, L36.
44. *C.L. Brogan et al.* The 2014 ALMA long baseline campaign: first results from high angular resolution observations toward the HL Tau region // Astrophys. J. Lett., 2015, v.808, L3.
45. *R. Dong, Z. Zhu, and B. Whitney.* Observational signatures of planets in protoplanetary disks. I. Gaps opened by single and multiple young planets in disks // Astrophys. J. Lett., 2015, v. 809, №1.
46. *C. Carrasco-González, T. Henning, C.J. Chandler et al.* The VLA view of the HL TAU

- disk: disk mass, grain evolution, and early planet Formation // *Astrophys. J. Lett.*, 2016, v.821, №1, L16.
47. *S.M. Andrews, D.J. Wilner, Z. Zhu et al.* Ringed substructure and a gap at 1 au in the nearest protoplanetary disk // *Astrophys. J. Lett.*, 2016, v.820, L40.
48. *D. Fedele, M. Tazzari, R. Booth et al.* ALMA continuum observations of the protoplanetary disk AS 209 // *A&A*, 2018, v.610, A24.
49. *A.V. Zbrodin, E.A. Zbrodina, M.S. Legkostupov et al.* Some Models for the Protoplanetary Disk of the Sun at the Initial Stage of its Evolution // *Problems of Biosphere Origin and Evolution*, v.1 / Editor E.M. Galimov. – N-Y: Nova Science Publishers, Inc., 2013, p.405.
50. *Г.В. Долголева, М.С. Легкоступов, Л.А. Плинер.* Численное моделирование гравитационной неустойчивости протопланетного диска в одномерном приближении. Ч.I. Однородная изотропная среда. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2016, препр. №49, 44 с.; *G.V. Dolgoleva, M.S. Legkostupov, L.A. Pliner.* Chislennoe modelirovanie gravitatsionno-neustoichivosti protoplanetnogo diska v odnomernom priblizhenii. Ch.I. Odnorodnaia izotropnaia sreda. – М.: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2016, prepr. №49, 44 s.
51. *G.V. Dolgoleva, M.S. Legkostupov, L.A. Pliner.* On the issue of the Solar protoplanetary disk // *MM&CS*, 2018, v.10, №5, p. 616-628.
52. *Н.Н. Козлов, Т.М. Энеев.* Численное моделирование процесса образования планет из протопланетного диска. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 1977, препринт №134; *N.N. Kozlov, T.M. Eneev.* Chislennoe modelirovanie protsesssa obrazovaniia planet iz protoplanetnogo diska. – М.: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 1977, preprint №134.
53. *Т.М. Энеев, Н.Н. Козлов.* Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем // *Астр. вест.*, 1981, т.XV, №2, с.80-94; *T.M. Eneev, N.N. Kozlov.* Model akkumulatsionnogo protsesssa formirovaniia planetnykh sistem // *Astr. vest.*, 1981, t. XV, №2, s.80-94.
54. *A.S. Murachev, D.V. Tsvetkov, E.M. Galimov, A.M. Krivtsov.* Numerical Simulation of Circumsolar Ring Evolution // *Advances in Mechanics of Microstructured Media and Structures*, 2018, v.87, p.251-262.
55. *J.H. Jeans.* *Astronomy and cosmogony.* – Cambridge, 1929.
56. *Л.Г. Страховская.* Модель эволюции самогравитирующего газового диска. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2012, препринт №80, 24 с.; *L.G. Strakhovskaya.* Model evoliutsii samogravitiruiushchego gazovogo diska. – М.: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2012, preprint №80, 24 s.
57. *Л.Г. Страховская.* Роль гравитации в формировании околозвездного газового диска. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2013, препринт №82, 24 с.; *L.G. Strakhovskaya.* Rol gravitatsii v formirovanii okolozvezdnogo gazovogo diska. – М.: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2013, preprint №82, 24 s.
58. *Л.Г. Страховская.* О стационарных состояниях гравитирующего газового диска // *Математическое моделирование*, 2017, т.29, №6, с.48-60. *L.G. Strakhovskaya.* On the Steady States of a Gravitating Gas Disk // *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2018, v.10, №1, p.15-25.

Поступила в редакцию 09.09.2019

После доработки 09.09.2019

Принята к публикации 21.10.2019