



Легкоступов М.С.

К вопросу о гравитационной  
неустойчивости  
протопланетного диска  
Солнца. Часть III. Развитие  
и обоснование модели

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Легкоступов М.С. К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть III. Развитие и обоснование модели // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 36. 25 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-36>

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

**М.С. Легкоступов**

**К вопросу  
о гравитационной неустойчивости  
протопланетного диска Солнца.  
Часть III. Развитие и обоснование модели**

**Москва — 2014**

УДК 523-52:523.4-52: 523.21-54

**Легкоступов М.С.**

**К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть III. Развитие и обоснование модели**

Показано, что если вращение среды диска подчиняется закону Кеплера, то при массе диска  $M_d \geq (0.15 - 0.2) \cdot M_S$  ( $M_S$  – масса Солнца) внутренние области диска становятся гравитационно неустойчивыми. При этом гравитационная неустойчивость в первую очередь начинает проявляться для больших длин волн возмущений среды диска.

Развита модель образования планетной системы Солнца, предложенная в 2006 году А.В. Забродиным, М.С. Легкоступовым, К.В. Мануковским с соавторами. Проведено сравнение этой модели с современными моделями: с моделью твердотельной аккумуляции, предложенной в работах Шмидта О.Ю., Сафронова В.С. и его учеников; с моделью Галимова Э.М. с соавторами и с моделью Энеева-Козлова.

Показано, что модель, предложенная А.В. Забродиным, М.С. Легкоступовым, К.В. Мануковским с соавторами, наилучшим образом объясняет большую совокупность экспериментальных фактов, относящихся к образованию как планетной системы Солнца, так и планетных систем других звезд.

**Ключевые слова:** протопланетный диск, гравитационная неустойчивость, собственное гравитационное поле, численное моделирование, дисперсионное уравнение, планетная система

**Michail Semenovich Legkostupov**

**On the issue of gravitational instability of the Sun protoplanetary disk.  
Part III. The development and substantiation of the model**

It is shown that, if the rotation of the disk medium obeys the law of Kepler, then when the mass of the disk  $M_d \geq (0.15 - 0.2) \cdot M_S$  ( $M_S$  - mass of the Sun) the inner region of the disk becomes gravitationally unstable. In this situation the gravitational instability at first begins to emerge for large wavelength perturbations of the disk medium.

It was developed the model of the formation of the Sun planetary system proposed in 2006 by A.V. Zabrodin, M.S. Legkostupov, K.V. Manukovskiy et al. It was done the comparison of this model with modern models: the model of solid accumulation, developed in the works by O.Y. Schmidt, V.S. Safronov and his disciples; with the model by E.M. Galimov with co-authors and with the Eneyev-Kozlov model.

It was shown that the model proposed by A.V. Zabrodin, M.S. Legkostupov, K.V. Manukovskiy et al. gives the best explanation for a large number of experimental facts about genesis of both planetary system of the Sun and planetary systems of other stars.

**Key words:** protoplanetary disk, gravitational instability, own gravitational field, numerical simulation, dispersion equation, planetary system

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 28.

### Введение

Работа «К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца» написана в трех частях и оформлена в виде трех препринтов: «К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть I. Постановка задачи», «К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть II. Дисперсионные уравнения» и «К вопросу о гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Часть III. Развитие и обоснование модели». В препринте, часть III ссылки на номера формул и рисунков из препринта, часть I даются с дополнительным индексом одна звездочка (\*), а из препринта, часть II – с дополнительным индексом две звездочки (\*\*).

В настоящем препринте проведен анализ дисперсионного уравнения для протопланетного диска, вывод которого дан в предыдущем препринте (часть II). Полученные результаты, представленные в трех препринтах (часть I, II, III), сопоставляются с результатами исследований других авторов.

#### 1. Анализ дисперсионного уравнения для протопланетного диска

1. Полученные в предыдущем препринте (часть II) дисперсионные уравнения (4.101, 4.102) позволяют найти условия, при которых возможна гравитационная неустойчивость в протопланетном диске. Действительно, оценки показывают, что для планетной системы Солнца слагаемое  $\frac{C_n^2}{4r_o^2}$  в дисперсионном уравнении (4.102) мало по сравнению с  $C_n^2 k^2$ . В этом случае дисперсионное уравнение записывается как:

$$\omega^2 \approx C_n^2 k^2 - 4\pi G \rho_n + \chi^2. \quad (1.1)$$

Из этого уравнения следует, что гравитационная неустойчивость в какой-то области протопланетного диска по отношению к возмущениям, которые распространяются перпендикулярно оси вращения среды, наступает только при условии выполнения во всех точках этой области неравенства:

$$\frac{\chi^2(r)}{4\pi G \cdot \rho_n(r)} < 1, \quad (1.2)$$

где

$\chi^2(r)$  и  $\rho_n(r)$  относятся к экваториальной плоскости протопланетного диска.

Если вращение среды протопланетного диска подчиняется закону Кеплера, то неравенство (1.2) преобразуется в следующее:

$$\frac{\Omega_n^2(r)}{4\pi G \rho_n} \equiv \frac{\Omega_n^2(r)}{\omega_J^2(r)} < 1, \quad (1.3)$$

или

$$\frac{\Omega_n(r)}{\omega_j(r)} < 1. \quad (1.4)$$

Если же для всех точек экваториальной плоскости протопланетного диска выполнено неравенство

$$\frac{\Omega_n^2(r)}{\omega_j^2(r)} \geq 1, \quad (1.5)$$

то радиальные возмущения, распространяющиеся перпендикулярно оси вращения среды, подавляются, и среда становится гравитационно устойчивой.

Следует обратить внимание, что при однородном вращении среды числитель левой части соответствующего неравенства (4.35\*\*) больше в четыре раза числителя неравенства (1.5).

Строго говоря, дисперсионные уравнения (4.101\*\*), (4.102\*\*) и их следствия (1.2)–(1.5) получены для определенного равновесного, стационарного состояния протопланетного диска, характеристики которого нам неизвестны. В работах [1, 2] была предложена аналитическая модель протопланетного диска Солнца в приближении Роша. Покажем, что дисперсионные уравнения (4.101\*\*), (4.102\*\*) и их следствия в некотором приближении применимы к этой модели.

2. Аналитическая модель протопланетного диска [1, 2] получена в приближении, когда собственное гравитационное поле диска мало по сравнению с гравитационным полем Солнца. В работах [3, 4, 5, 6] показано, что введение в аналитическую модель собственного гравитационного поля диска может вносить значительные возмущения в систему, и первоначальное равновесное состояние диска перестает быть равновесным.

Строгий вывод дисперсионного уравнения в случае, когда за исходное состояние протопланетного диска принято приближение Роша, должен быть произведен на фоне нестационарного процесса, т.е. аналогично, как это имело место в задаче гравитационной неустойчивости бесконечной однородной и изотропной среды [7, 8, 9] (см. замечание о парадоксе Джинса в разделе 3 препринта, часть II). Исследование эволюции протопланетного диска из состояния приближения Роша при «включении» собственного гравитационного поля диска [3 – 6] показало, что переход из равновесного состояния протопланетного диска происходит не мгновенно. На каком-то начальном интервале времени можно считать, что параметры протопланетного диска близки к приближению Роша. На этом временном интервале и можно приближенно считать допустимым рассмотрение гравитационной неустойчивости протопланетного диска в приближении Роша с помощью дисперсионного уравнения (4.102\*\*). При этом коэффициенты в дисперсионных уравнениях должны быть взяты из решения задачи в приближении Роша.

В аналитической модели [1, 2] невозмущенная плотность протопланетного диска в экваториальной плоскости в зависимости от радиуса имеет вид, показанный на рис. 4\*\*. Для данной формы кривой  $\rho_n(r)$  вид дисперсионного уравнения (4.101\*\*) изменяется в зависимости от координаты  $r$ . Так, в окрестности максимума плотности, а также при больших радиусах  $r > 0.75$  производная  $\frac{\partial \rho_n}{\partial r}$  становится малой и уравнение (4.101\*\*) упрощается:

$$\omega^2 \rho_\Delta - \chi^2 \rho_\Delta + 4\pi G \rho_n \rho_\Delta + \frac{\rho_n}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{C_\Omega^2}{\rho_n} \frac{\partial \rho_\Delta}{\partial r} \right) \approx \frac{1}{r} \frac{\partial \chi^2}{\partial r} \int_{r_0}^r x \rho_\Delta dx. \quad (1.6)$$

Как было показано (раздел 1, формула (1.2) препринта, часть II), угловая скорость вращения среды протопланетного диска в рассматриваемой модели [1, 2, 10] представляется выражением, близким к закону Кеплера:

$$\Omega_n^2 = C_\Omega \frac{GM_S}{r_\Omega^{3+\alpha}}, \quad (1.7)$$

где

$$C_\Omega = \frac{(1+\alpha)(1/r_{ex} - 1/r_{in})}{1/r_{ex}^{1+\alpha} - 1/r_{in}^{1+\alpha}}. \quad (1.8)$$

Численные значения констант, которые приняты в данной работе, приведены в разделе 1 препринта, часть II. Значения константы  $\alpha$  не превышают  $\alpha \leq 0.01$ . В этом случае значение константы  $C_\Omega$  равно:

$$C_\Omega = \frac{(1+\alpha)(1/r_{ex} - 1/r_{in})}{1/r_{ex}^{1+\alpha} - 1/r_{in}^{1+\alpha}} \leq 1.35109.$$

Тогда

$$\chi^2 = 4\Omega_n^2 + 2\Omega_n r \frac{d\Omega_n}{dr} = (1-\alpha)\Omega_n^2 \geq 0.99\Omega_n^2, \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial r} = (1-\alpha) \frac{\partial \Omega_n^2}{\partial r} = -(1-\alpha)(3+\alpha) \frac{\Omega_n^2}{r}. \quad (1.10)$$

Для того чтобы определить, при каких параметрах протопланетный диск в аналитической модели в приближении Роша является гравитационно устойчивым, построим зависимости коэффициента устойчивости  $K_{уст} = \frac{4\pi G \rho_n}{\Omega_n^2}$  от приведенного радиуса ( $R = r/r_{ex}$ ) в его экваториальной плоскости при фиксированных параметрах  $\alpha$ , которым соответствует определенная масса диска  $M_d$ . Эти зависимости показаны на рис. 1 для  $\alpha = 0.002$

( $M_d \approx 7.168 \cdot 10^{-3} M_s$ ),  $\alpha = 0.005$  ( $M_d \approx 0.096 \cdot M_s$ ),  $\alpha = 0.00563$  ( $M_d \approx 0.135 \cdot M_s$ ),  $\alpha = 0.01$  ( $M_d \approx 0.667 \cdot M_s$ ).

Участки экваториальной плоскости протопланетного диска, для которых коэффициент устойчивости  $K_{уст}$  больше 1, гравитационно неустойчивы. Из приведенного рисунка видно, что гравитационная неустойчивость возникает при массе протопланетного диска  $M_d > 0.135 \cdot M_s$  ( $\alpha > 0.00563$ ). Сравнивая эти результаты с графиками рис. 7\*\*, 8\*\*, 9\*\*, которые иллюстрируют, что гравитационная неустойчивость диска без учета его вращения проявляется при  $M_d \geq 0.01 \cdot M_s$  ( $\alpha \geq 0.002$ ), видим, что вращение диска значительно подавляет его гравитационную неустойчивость: граница гравитационной устойчивости диска по массе при учете его вращения повышается примерно на порядок. Для последующих рассмотрений проведем округление и с учетом точности расчетов примем, что гравитационная неустойчивость возникает при массе протопланетного диска  $M_d \geq (0.15 - 0.2) \cdot M_s$ .

По данным работ [11, стр. 16]; [12, стр. 65] протопланетный диск в газовой фазе становится гравитационно неустойчивым, когда он достигает массы  $M_d \approx (0.1 - 0.3) \cdot M_s$ .

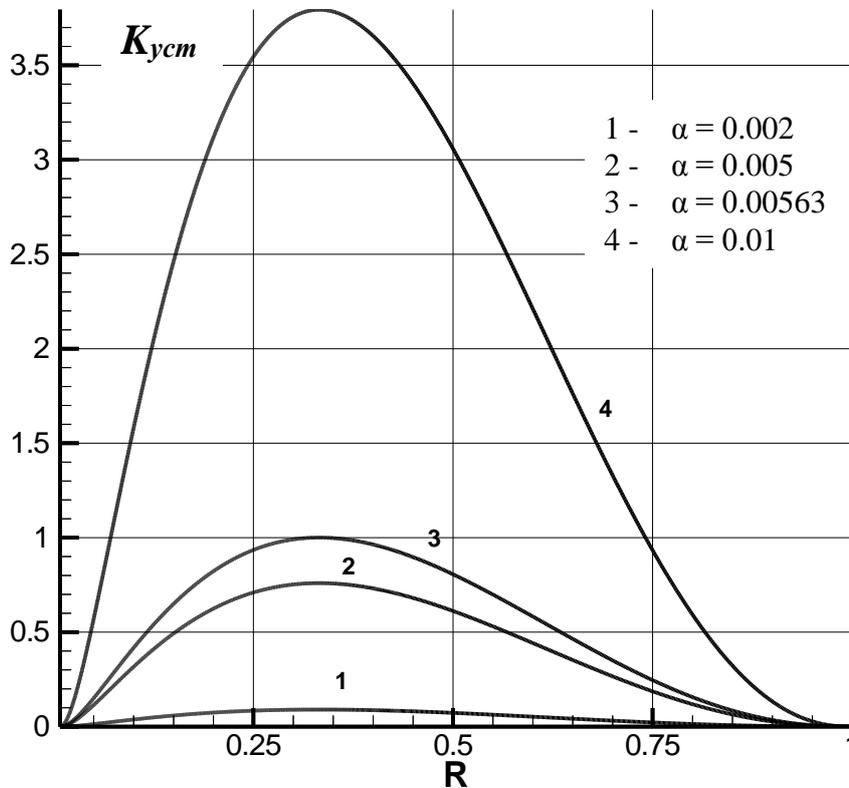


Рис. 1. Зависимости коэффициента устойчивости ( $K_{уст}$ ) от приведенного радиуса ( $R$ ) в экваториальной плоскости протопланетного диска.

Таким образом, полученные результаты о гравитационной неустойчивости протопланетного диска в зависимости от его массы находятся в согласии с данными работ этих авторов.

Относительно величины массы протопланетного диска среди исследователей нет единой точки зрения. В.С. Сафронов и его ученики считают, что масса диска не могла быть больше  $0.15 \cdot M_s$  [13, стр. 530]; [11, стр. 21]. Ф. Хойл [14] и Е. Шацман [15] поддерживают эту точку зрения, считая, что масса диска была порядка  $(0.01 - 0.1) \cdot M_s$ . А.Г. Камерон [16, 17] и Б.Ю. Левин [13, стр. 505] доказывают, что масса диска могла превышать массу Солнца. Оценки с использованием результатов работы В.Л. Поляченко и А.М. Фридмана [18] показывают, что масса протопланетного диска могла составлять примерно  $0.36 \cdot M_s$ . По нашим оценкам, масса протопланетного диска могла превышать массу, которая соответствует границе устойчивости протопланетного диска в начальной стадии его эволюции, т.е.  $M_d > (0.15-0.2) \cdot M_s$ .

3. Одна из первых работ, в которой исследуется возможность объяснения закона планетных расстояний на основе гравитационной неустойчивости протопланетного диска, была выполнена В.Л. Поляченко и А.М. Фридманом. Представляется интересным сравнить результаты, полученные в данной работе, с результатами работы [18]. В.Л. Поляченко и А.М. Фридман проводили исследование в рамках приближения бесконечно тонкого диска. В литературе есть критические замечания, например, [11, стр. 37] относительно правомерности использования этого приближения для решения данной задачи. Действительно, бесконечно тонкий диск не является стационарной (равновесной) системой. Если бесконечно тонкий диск предоставить самому себе, то через определенное время он перейдет в состояние, в котором его форма будет подобна протопланетным дискам, представленным на рис. 1\*\*, 2\*\*, 3\*\*. Строго говоря, задача о гравитационной неустойчивости протопланетного диска в приближении бесконечно тонкого диска должна была решаться, как и классическая задача Джинса, на нестационарном фоне. Но, тем не менее, выбранное авторами работы [18] приближение, с нашей точки зрения, допустимо для оценки решения рассматриваемой ими задачи.

Полученное В.Л. Поляченко и А.М. Фридманом дисперсионное уравнение (10\*) отличается от полученного уравнения (1.1) в настоящей работе. И это естественно, так как в нашем случае рассматривается реальный для выбранной модели стационарный (равновесный) диск. Если в уравнение (1.1) ввести поправочный коэффициент Сафронова, то это уравнение в предельном случае бесконечно тонкого диска переходит в уравнение В.Л. Поляченко и А.М. Фридмана (10\*).

Следуя В.Л. Поляченко и А.М. Фридману, введем приближение газопылевого диска, когда  $C_n \neq 0$ , и приближение пылевого диска с  $C_n = 0$ .

а) газопылевой диск ( $C_n \neq 0$ ).

Определим из дисперсионного уравнения (1.1) значение  $k$ , которое соответствует минимуму функции  $\omega^2 = \omega^2(k)$  (наибольшая гравитационная неустойчивость):

$$2kC_n^2 = 0. \quad (1.11)$$

Из этого равенства находим  $k$  в точке минимума:

$$k = 0. \quad (1.12)$$

Это соответствует бесконечно большим длинам волн.

Подставляя это значение  $k$  в дисперсионное уравнение (1.1), находим связь между стационарными параметрами системы на границе устойчивости ( $\omega^2 = 0$ ):

$$\begin{aligned} -4\pi G\rho_{n,z} + \chi^2 &= 0, \\ \rho_{n,z} &= \frac{\chi^2}{4\pi G}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Подставляя выражение (1.9) в выражение (1.13), получаем:

$$\rho_{n,z} = \frac{(1-\alpha)\Omega_n^2}{4\pi G} = (1-\alpha)C_\Omega \frac{M_s}{4\pi r^{3+\alpha}}, \quad (1.14)$$

где

$$C_\Omega = \frac{(1+\alpha)(1/r_{ex} - 1/r_{in})}{1/r_{ex}^{1+\alpha} - 1/r_{in}^{1+\alpha}}.$$

Таким образом, получена зависимость плотности невозмущенного газопылевого диска в его экваториальной плоскости ( $\rho_{n,z}$ ) от радиуса, которая соответствует границе гравитационной неустойчивости. При  $\rho_n > \rho_{n,z}$  диск переходит в гравитационно неустойчивое состояние. Показано, что протопланетный газопылевой диск обладает наибольшей гравитационной неустойчивостью для возмущений с максимальной длиной волны.

б) пылевой диск или предельный случай «холодной» газопылевой среды ( $C_n = 0$ ).

В этом случае дисперсионное уравнение принимает вид:

$$\omega^2 \approx -4\pi G\rho_n + \chi^2. \quad (1.15)$$

Как нетрудно видеть, в этом случае выражение для плотности невозмущенного пылевого диска в его экваториальной плоскости от радиуса, соответствующее границе гравитационной неустойчивости, полностью совпадает с выражением (1.14).

В приближении бесконечно тонкого диска, как показано в работе [18], выражение для плотности стационарного состояния газопылевого диска,

соответствующее границе гравитационной неустойчивости, в два раза превосходит аналогичное выражение для пылевого диска. Это обстоятельство связано с особенностью дисперсионного уравнения в приближении бесконечно тонкого диска.

Следует обратить внимание на различие дисперсионных уравнений для газопылевого диска (1.1) и пылевого диска (1.15). В случае газопылевого диска в области его гравитационной неустойчивости вблизи границы неустойчивости могут возникать только длинноволновые возмущения. Для пылевого диска во всей его области неустойчивости могут возникать возмущения любой длины волны. Это весьма важное обстоятельство для понимания возникновения процессов гравитационных неустойчивостей в протопланетном диске. Дело в том, что оба рассматриваемых предельных случая, которые описываются дисперсионными уравнениями (1.1) и (1.15), возможны в ходе эволюции протопланетного диска. В начальной стадии эволюции работает дисперсионное уравнение (1.1). На стадии, когда произошла концентрация пылевых частиц в экваториальной плоскости диска (такой сценарий возможен при любой модели эволюции протопланетного диска), может оказаться справедливым дисперсионное уравнение (1.15). В этом случае могут возникнуть гравитационные возмущения любой длины волны, в том числе и размеров планетезималей – все зависит от природы возмущений, которые возникают в протопланетном диске. Между этими предельными состояниями среда диска вблизи его экваториальной плоскости находится в промежуточном состоянии, где существенны как газовая компонента среды, так и пылевая, и которое можно приближенно описать следующим дисперсионным уравнением:

$$\omega^2 \approx C_n^2 k^2 - 4\pi G \rho_{n,cp} + \chi^2, \quad (1.16)$$

где

$\rho_{n,cp}$  – средняя плотность среды диска, состоящей из двух фаз: газовой и пылевой.

4. Чтобы в протопланетном диске реализовалась гравитационная неустойчивость, необходимо воздействие возмущений на среду диска. Какими должны быть эти возмущения, чтобы в протопланетном диске образовались протопланеты? В.Л. Поляченко и А.М. Фридман, [18] предложили взять возмущенную (поверхностную) плотность диска в виде:

$$\sigma_1(r) = \sigma_{o,1}(r) \exp\left(ia \ln \frac{r-r_m}{c}\right), \quad (1.17)$$

где

$\sigma_{o,1}(r)$  – медленно меняющаяся с радиусом амплитуда возмущенной (поверхностной) плотности;

$$\begin{aligned} a &= 2\pi/\ln 2, \\ r_m &= 0.4 \text{ а.е.}, \\ c &= 0.3 \text{ а.е.} \end{aligned} \quad (1.18)$$

В приближении бесконечно тонкого диска в работе [18] была вычислена амплитуда возмущенной (поверхностной) плотности в виде:

$$\sigma_{o,1}(r) = -\frac{a\eta_o}{2\pi G r^{1/2}(r-r_m)^{3/2}}, \quad (1.19)$$

где

$\eta_o$  – константа интегрирования.

Найдем частное решение в виде волны, подобной волне Поляченко-Фридмана, для протопланетного диска в нашем случае. Для этого используем уравнение (4.94\*\*). Допустим, что частное решение для возмущения имеет вид:

$$\rho_\Delta = f(r)e^{i\omega t}, \quad (1.20)$$

где

$\omega$  – константа.

Подставляя это решение в уравнение (4.94\*\*), получаем:

$$(\omega^2 - \chi(r_o)^2 + 4\pi G \rho_n(r_o))f(r) + \frac{C_n^2(r_o)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial(f(r))}{\partial r} \right) = 0, \quad (1.21)$$

Возьмем возмущение плотности в виде волны, подобной волне по Поляченко-Фридману:

$$f(r) = \rho_{\Delta,o} r^{-\frac{1}{2}} (r-r_m)^\beta e^{i a \ln \frac{r-r_m}{c}}, \quad (1.22)$$

где

$$\begin{aligned} a &= \frac{2\pi}{\ln 2}, \\ r_m &= 0.4 \text{ а.е.}, \\ c &= 0.3 \text{ а.е.} \end{aligned}$$

Дополнительно введена константа  $\beta$  для исключения комплексного выражения в дисперсионном уравнении. Можно показать, что в этом случае  $\beta = \frac{1}{2}$ .

Подставляя выражение (1.22) в уравнение (1.21), находим следующее дисперсионное уравнение:

$$\omega^2 = \chi(r_o)^2 - 4\pi G \rho_n(r_o) + C_n^2(r_o) \frac{a^2}{(r-r_m)^2} + C_n^2(r_o) \left( \frac{1}{4(r_o-r_m)^2} - \frac{1}{4r_o^2} \right). \quad (1.23)$$

Можно показать, что для данного типа возмущения  $\frac{a}{r - r_m}$  есть волновое число

[18]. В этом случае дисперсионное уравнение имеет вид, аналогичный другим типам возмущений за исключением четвертого члена в его правой части, который имеет характерные особенности именно для этого типа возмущения. Коэффициент перед экспонентой в выражении (1.22) отличается от соответствующего коэффициента (1.19), полученного в работе [18], в силу отличия рассматриваемых моделей. Анализ показывает, что возмущение в виде волны Поляченко-Фридмана (1,17), (1.19) соответствует закону Тициуса-Бода для всех межпланетных расстояний, кроме промежутка Меркурий-Венера. Это видно и из дисперсионного уравнения (1.23): в точке, соответствующей расположению Меркурия, волновое число и одно из слагаемых четвертого члена уравнения (1.23) обращаются в бесконечность. Чтобы устранить этот недостаток, проще всего взять длину волны возмущений, которая соответствует истинным межпланетным расстояниям, например, из работы [19, стр. 13], и работать с этой зависимостью.

Таким образом, показано, что если плотность среды в области экваториальной плоскости протопланетного диска превышает плотность невозмущенного газопылевого диска на границе его гравитационной устойчивости (формула (1.14)), то эта область диска переходит в гравитационно неустойчивое состояние. Если возмущение плотности среды диска возникает в виде волны, подобной волне Фридмана-Поляченко, то в гравитационно неустойчивом диске образуются протопланетные кольца, которые соответствуют зонам планет (ранее протопланетные кольца были описаны в работах [1, 2, 10]). Причем этот процесс происходит вне зависимости от состава среды диска: диск может находиться на начальной стадии эволюции – тогда среда диска близка к газовой среде, или на промежуточной стадии – газопылевой диск или среда диска состоит практически из пылевой компоненты.

Допустим, масса диска на начальной стадии его эволюции меньше критической ( $M_d < (0.15 - 0.2) \cdot M_s$ ). Тогда протопланетный диск гравитационно устойчив. В ходе эволюции вследствие концентрации пыли в экваториальной плоскости средняя плотность среды в ней будет нарастать. После превышения критической плотности диск, согласно уравнению (1.16), перейдет в гравитационно неустойчивое состояние. Так как наибольшей гравитационной неустойчивости диск подвержен при возмущениях с максимальной длиной волны, то далее ситуация будет развиваться аналогично случаю, когда протопланетный диск был гравитационно неустойчивым на начальной стадии его эволюции. Если возмущение плотности среды диска происходит в виде волны, подобной волне Фридмана-Поляченко, то в гравитационно неустойчивом диске будут образовываться протопланетные кольца, соответствующие зонам планет.

5. Весьма сложный вопрос связан с природой волны возмущения Фридмана-Поляченко. Эта волна возмущения охватывает весь протопланетный диск. Один из наиболее реальных сценариев возникновения этой волны связан с переходом аккреционного диска в состояние с резким уменьшением аккреционного потока на Солнце. По всей вероятности, смена режима аккреционного потока вещества на Солнце ведет к возмущениям, которые в этом случае, естественно, захватывают весь протопланетный диск. В аналитической модели протопланетного диска [1, 2, 10] рассматривается стационарное состояние диска. Переход же аккреционного диска в состояние с резким уменьшением аккреционного потока явно не стационарен и может наряду с порождением волны возмущения привести к существенным изменениям зависимости плотности от расстояния, а также к возмущениям другого характера, например, ударным волнам.

Наряду с волной возмущения Фридмана-Поляченко не исключено возникновение и одиночного возмущения в гравитационно неустойчивом диске, природа которого может быть самой разнообразной. В этом случае возможно возникновение одного протопланетного кольца.

## 2. Развитие и обоснование модели

1. Альтернативная модель образования планетной системы Солнца была предложена в работах [1, 2, 10]. Полученные в данной работе результаты, а также результаты современных исследований планетных систем других звезд позволяют уточнить и развить предложенную модель, а также более строго обосновать ее.

В основе модели лежит гипотеза о совместном образовании Солнца и его планетной системы из единой протосолнечной туманности, впервые предложенная Кантом и Лапласом [20, 52].

Современные экспериментальные наблюдения молодых звезд солнечного типа и их газопылевых дисков подтвердили эту гипотезу, в том числе и предположение о том, что планеты образуются из газопылевого диска [21 – 27, 12]. Высокая разрешающая способность современных экспериментальных методов наблюдений за звездами позволила установить закон вращения некоторых газопылевых дисков, который оказался близким к кеплеровскому [12, стр. 61]; [12, стр. 182].

По современным представлениям при формировании звезды околозвездное облако является аккреционным диском, поток вещества из которого на звезду в максимуме может достигать величин  $\dot{M}_d \sim 10^{-5} - 10^{-6} \cdot M_s / \text{год}$  [28]. После того как звезда практически сформировалась (стадия Т Тельца), аккреция вещества на звезду резко уменьшается до  $\dot{M}_d \sim 10^{-8} - 10^{-9} \cdot M_s / \text{год}$  [25]. Эта остаточная аккреция обусловлена вязкостью диска и его дифференциальным вращением [12]. Наше исследование относится именно к этой стадии околозвездного газопылевого облака, которое и было названо протопланетным диском. В приближении, которое было выбрано в данном исследовании, были сохранены

только основные физические процессы, которые ответственны за гравитационную устойчивость диска: вязкость и турбулентность среды не учитывались, хотя величина  $C_n$  может рассматриваться и как средняя скорость турбулентных движений среды диска.

Как было показано (раздел 1), гравитационная неустойчивость протопланетного диска Солнца наступает при  $M_d \geq (0.15-0.2) \cdot M_s$ . Астрономические наблюдения газопылевых околозвездных дисков для звезд с массой порядка Солнца на стадии Т Тельца обычно приводят к оценке массы диска, составляющей  $M_d = \sim (0.01-0.2) \cdot M_s$ , где  $M_s$  – масса Солнца [29], хотя максимальная масса аккреционного диска может достигать  $M_d = \sim (0.1-0.5) \cdot M_s$  [30]. 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 [31]. Следует также обратить внимание, что в процессе эволюции околозвездный диск достигает максимального значения и, переходя в стадию Т Тельца, постепенно теряет свою массу [25]. Не исключено, что крупномасштабная гравитационная неустойчивость может проявляться на более ранней стадии аккреционного диска, когда его масса значительно выше, чем на поздней стадии Т Тельца, а основные аккреционные процессы в диске уже закончились. Последнее имеет место в районе резкого спада темпа аккреции диска [25, fig. 8].

Суммируя эти результаты с данными о возможных массах протопланетного диска Солнца, опубликованными в работах [13, 16, 17], можно сделать заключение, что протопланетный диск Солнца, весьма вероятно, был гравитационно неустойчивым уже на начальной стадии его эволюции, когда пылевая составляющая еще была равномерно распределена по его объему.

Но, тем не менее, допустим, что диск на начальной стадии его эволюции все-таки был гравитационно устойчив, тогда при достижении критической плотности вследствие концентрации пылевой компоненты в экваториальной плоскости диск переходит в гравитационно неустойчивое состояние. При этом, как было показано в разделе 1, возникают в первую очередь крупномасштабные неустойчивости. При возбуждении в протопланетном диске, находящемся в состоянии гравитационной неустойчивости, волны возмущений типа Фридмана-Поляченко в нем зарождаются протопланетные кольца, и этот сценарий относится к гравитационной неустойчивости, возникающей как в начальной стадии эволюции диска, так и в стадии концентрации пылевой составляющей в экваториальной плоскости.

Но если это имело место, то образовавшиеся в результате гравитационной неустойчивости протопланеты должны были иметь состав, во всяком случае, в начальной фазе своего образования, близкий к солнечному составу. Действительно, одна из планет солнечной системы – Юпитер, сохранила до настоящего времени состав, близкий к солнечному: обогащение Юпитера

тяжелым компонентом (льды и горные породы) по отношению к протосолнечному содержанию составляет 1,7 – 8 [32]. Сатурн имеет более значительное обогащение тяжелым компонентом, а именно: 9 – 19 [32]. Уран и Нептун на 5 – 15 % состоят из водорода и гелия, в то время как оболочки Юпитера и Сатурна состоят из водорода (по числу атомов) на 85% [12, стр. 123, 131].

Эти факты, с одной стороны, свидетельствуют в пользу гипотезы о крупномасштабной гравитационной неустойчивости и об образовании протопланет в протопланетном диске. С другой стороны, возникает вопрос: почему Уран и Нептун потеряли основную часть газовой компоненты, а планеты земной группы практически потеряли ее полностью?

В модели твердотельной аккумуляции [33, 11] предполагается существование двух стадий образования планет внешней солнечной системы. Опишем ее в общих чертах на примере Юпитера. На первой стадии формируется твердотельный зародыш (ядро) Юпитера массой около 10 масс Земли путем твердотельной аккумуляции (к настоящему времени еще нет единой точки зрения о величине массы ядра Юпитера [12, стр. 132]; некоторые исследователи полагают, что ядро вообще отсутствует). На второй стадии происходит аккреция газовой компоненты на образовавшийся твердотельный зародыш. Проанализируем этот сценарий образования Юпитера с несколько другой стороны. В основе предложенного механизма лежит гравитационное взаимодействие. Как известно, гравитационное взаимодействие является дальнедействующим взаимодействием, и если в результате предложенного сценария получена крупномасштабная неоднородность в виде Юпитера, то изначально в зоне Юпитера должна была существовать крупномасштабная гравитационная неустойчивость, связанная с массами пылевой и газовой компонент. В этом случае, казалось бы, более естественным является сценарий с одновременным вовлечением в процесс гравитирующих масс пылевой и газовой компонент. Не является ли сценарий образования Юпитера из двух стадий несколько искусственным приемом? Дисперсионные уравнения (4.101\*\*), (1.1), (1.16), полученные в настоящем исследовании, как раз и описывают возникновение крупномасштабных неоднородностей с одновременным вовлечением в процесс масс пылевой и газовой компонент среды диска.

Современные методы исследований позволяют наблюдать планеты у других звезд (экзопланеты) и измерять некоторые их характеристики. Первые экзопланеты были обнаружены в конце 1980-х годов [12, стр. 19, 64]. Как показывают исследования, среди планетных систем других звезд достаточно часто наблюдаются планеты типа Юпитера и «горячих юпитеров». «Горячий юпитер» – это класс планет, относящихся 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, 2, 10], 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 [11, 26, 12], что в результате коллапса протосолнечной туманности при ее определенной массе и моменте количества движения может образоваться двойная звезда. Представим себе, что масса и момент количества движения протосолнечной туманности 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 протосолнечной туманности путем крупномасштабной гравитационной неустойчивости, просто не существует – слишком высокие температуры для твердотельной аккумуляции.

Итак, в результате гравитационной неустойчивости в протопланетном диске образовались протопланетные кольца. Как показано в работах [1, 2, 10], в аналитической модели протопланетного диска в приближении Роша существуют аналитические решения протопланетных колец в двумерном (осесимметричном) приближении. В этом приближении протопланетные кольца могут быть устойчивы. В трехмерном приближении ситуация изменяется.

2. Протопланетное кольцо, возникшее в результате гравитационной неустойчивости, 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 распадается на фрагменты. Данное описание поведения газопылевого кольца в протопланетном диске не является новым. Так, при рассмотрении возникновения планетезималей В.С. Сафронов также обращается к гравитационной неустойчивости протопланетного диска, приводящей к образованию кольцевой структуры, которая в дальнейшем распадается на локальные пылевые сгущения [33, стр. 76]; [11, стр. 39]. В.Н. Снытников с соавторами в работах по численному моделированию процессов, возникающих

в протопланетном диске [34, 35], также наблюдали образование кольцевых структур, в последующем распадающихся на фрагменты.

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 [36, 37, 38, 39], предложенной в 1977 году.

В модели Энеева-Козлова так же, как и в модели твердотельной аккумуляции, предполагается существование гравитационной неустойчивости в протопланетном диске по отношению к возмущениям достаточно малой длины волны, которая приводит, согласно К. Эджварту [40], Л.Э. Гуревичу и А.И. Лебединскому [41], 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», вещество которых занимает объем сферы Хилла. Таким образом, протопланетный диск представлен в виде совокупности газопылевых сгущений, соответствующих по составу протопланетному диску. Газопылевые сгущения движутся почти по круговым орбитам и, сталкиваясь между собой по закону абсолютно неупругого удара, объединяются, образуя новое сгущение. Такой процесс приводит к образованию протопланет.

В этой модели нам представляется весьма интересным следующий полученный результат: кольцевое сжатие вещества протопланетного диска, масса которого «пренебрежимо мала по сравнению с массой центрального тела (Солнца)» [37, 38, 39]. 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. Этот результат согласуется с результатами исследований, излагаемыми в данной работе.

В предлагаемой нами модели [1, 2, 10] протопланетные кольца, в отличие от модели Энеева-Козлова, зарождаются непосредственно из среды диска вследствие его гравитационной крупномасштабной неустойчивости. Фрагментируя, протопланетные кольца образуют газопылевые сгущения, характерные размеры которых на несколько порядков превосходят характерные размеры планетезималей. В модели Энеева-Козлова нет ограничений на исходные размеры газопылевых сгущений. Поэтому дальнейшее рассмотрение эволюции крупномасштабной газопылевых сгущений возможно в рамках модели Энеева-Козлова. Основным результатом такого рассмотрения известен – это образование протопланет.

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 [42], среднее время жизни изученных газопылевых дисков составляло 3–6 млн лет. Тогда как в стандартном варианте по Сафронову: «...Земля росла в течение  $\sim 10^8$  лет...» [33, стр. 176]. В работе [33] на стр. 177 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, 2, 10] 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 В.П. Мясникова и В.И. Титаренко [43]. 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.

3. Образовавшаяся протопланета под действием своего гравитационного поля начинает сжиматься, а пылевые частицы двигаться к ее центру и, концентрируясь там, образуют для планет земной группы их тела, а для планет внешней солнечной системы – их ядра.

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 Т Тельца [13, 18]. При образовании протопланет земной группы их газовая оболочка разрушается интенсивным солнечным излучением и выносится за пределы планет земной группы [13]. Юпитеру практически полностью удалось удержать газовую компоненту, Сатурну – в меньшей степени, а Уран и Нептун большую часть своей газовой компоненты потеряли.

4. В процессе образования протопланет из протопланетных колец возможно образование и спутников планет (на это указывалось в работах [1]; [2, стр. 41]; [10, стр. 314]). Следует отменить, 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 его спутник. Эта схема в своих общих чертах соответствует идее Э.М. Галимова об образовании Земли и Луны из единого протопланетного облака.

5. 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 [33, 11]. 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 В.С. Сафронов [33]. Тогда начинает работать дисперсионное уравнение (1.15), полученное в разделе 1. Согласно этому уравнению 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 метеориты, метеоры, болиды, астероиды, а последние «грозят» уничтожить жизнь на планете Земля.

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.

### **Заключение**

Настоящая работа посвящена актуальной проблеме гравитационной неустойчивости протопланетного диска Солнца. Внимание исследователей приковано к этой проблеме еще со времен Канта и Лапласа. И это естественно, так как от решения этой проблемы зависит наше понимание реального пути образования планетной системы Солнца.

В настоящее время общепринятой теорией образования планетной системы Солнца является теория твердотельной аккумуляции [33, 11, 44, 45]. Основопологающим постулатом этой теории является мелкомасштабная гравитационная неустойчивость в тонком пылевом слое (субдиске) [33, 11]. Автор настоящей работы также придерживается идеи гравитационной неустойчивости, но считает, что в ходе эволюции протопланетного диска должна учитываться не только мелкомасштабная гравитационная неустойчивость, но и крупномасштабные ее виды, которые могут реализоваться по мере увеличения плотности диска в его экваториальной плоскости. Логика зарождения гравитационной неустойчивости определяется критерием Джинса. Изначальная крупномасштабная гравитационная неустойчивость привела к образованию протосолнечной туманности, с которой начался коллапс этой

части межзвездного вещества. По-моему, не было попыток объяснить коллапс протосолнечной туманности возникновением более мелких гравитационных возмущений, которые в своем развитии и привели к коллапсу, как это делается в исследованиях эволюции протопланетного диска. По мере формирования протопланетного диска его плотность увеличивалась. И по логике зарождения гравитационных неустойчивостей в первую очередь должны были возникнуть в диске крупномасштабные гравитационные неустойчивости. По мере дальнейшего увеличения плотности в диске возникают гравитационные неустойчивости и более мелкого масштаба.

Исследования, проведенные в рамках этой работы, позволили получить приближенные дисперсионные уравнения для протопланетного диска, которые в предельных своих приближения совпадают с результатами работ Джинса [46], Чандрасакхара [4], Бела и Шацмана [48], Сафронова [49, 50], Фридмана и Поляченко [18, 51]. Из полученных дисперсионных уравнений ( $4.101^{**}$ ), (1.1), (1.16) следует:

1. 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.

2. Если диск в начальной стадии его эволюции был гравитационно устойчив, то за счет концентрации пылевой компоненты в экваториальной плоскости и при достижении в ней определенной плотности диск перейдет в гравитационно неустойчивое состояние. При этом дисперсионное уравнение (1.16) в этом состоянии будет подобно уравнению для начальной стадии эволюции диска (1.1).

3. Для обоих случаев, приведенных выше, показано, что в этих состояниях протопланетных дисков могут возникать гравитационные неустойчивости с длиной волны порядка расстояния между планетами, которые приводят к образованию протопланетных колец, а затем протопланет и, вероятно, протоспутников планет.

4. Когда плотность вещества диска, находящегося вне протопланетных колец, а в дальнейшем и вне протопланет, достигает состояния, в котором плотность пылевой компоненты много больше плотности газовой компоненты, то начинает работать дисперсионное уравнение (1.15) (раздел 1). В соответствии с этим уравнением гравитационная неустойчивость пылевой компоненты может проявляться в широком диапазоне длин волн. Таким образом, в образовавшемся остаточном пылевом слое продолжает работать теория твердотельной аккумуляции.

В работе также показано, что после фрагментирования протопланетного кольца описание взаимодействий и поведение газопылевых крупномасштабных сгущений возможно проводить с помощью модели формирования планетных систем Энеева-Козлова [37, 38].

В работе приведены многочисленные факты, которые подтверждают достоверность предлагаемой модели [1, 2, 10].

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

### Библиографический список

1. Забродин А.В., Легкоступов М.С., Плинер Л.А., Забродина Е.В., Мануковский К.В. Численное моделирование эволюции протопланетного диска Солнца на начальной ее стадии [Текст]: Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (итоговый). Программа № 25 фундаментальных исследований Президиума РАН. М., 2006. 47 с. Инв. № 8-3-06.
2. 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 РАН. 2006. № 70. 44 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2006-70>
3. Жуков В.Т., Брушлинский К.В., Меньшов И.С., Легкоступов М.С., Плинер Л.А., Забродина Е.А. Численное моделирование эволюции протопланетного диска Солнца [Текст]: Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (итоговый). Программа № 24 фундаментальных исследований Президиума РАН М., 2010. 19 с. Инв. № 8-2-10.
4. 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.
5. 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.
6. 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. Тезисы докладов. п. Абрау-Дюрсо. Россия. 10-16 сентября. 2012. С. 14–15.
7. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Релятивистская астрофизика. М.: «Наука». 1967.
8. Лифшиц Е.М. О гравитационной устойчивости изотропного мира // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 587.
9. Bonnor W.B. Jeans formula for gravitational instability // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1957. V. 117. P. 104.
10. 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.
11. Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: «Наука». 1990.

12. Кусков О.Л., Дорофеева В.А., Кронрод В.А., Макалкин А.Б. Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. ЛКИ. 2009.
13. Происхождение солнечной системы // Сборник статей под редакцией Г. Ривса. М.: «Мир». 1976.
14. Hoyle F. On the Origin of Solar Nebula // Highlights of Astronomy. 1971. V. 2. P. 195.
15. Schatzman E. Origin of the Solar System // Physics of the Solar System. Ed S.I. Rasool. Goddard Space Flight Center. Greenbelt. Md., 1971.
16. Cameron A.G.W. The formation of the Sun and planets // Icarus. 1962. V. 1. P. 13.
17. Cameron A.G.W. Accumulation processes in primitive Solar nebular // Icarus. 1973. V. 18. P. 407.
18. Поляченко В.Л., Фридман А.М. О законе планетных расстояний // Астр. ж. 1972. Т. 49. № 1. С. 157.
19. Жуков В.Т., Брушлинский К.В., Легкоступов М.С., Плинер Л.А., Забродина Е.А. Численное моделирование эволюции протопланетного диска Солнца [Текст]: Отчет ИПИМ им. М.В. Келдыша РАН (итоговый). Программа № 15 фундаментальных исследований Президиума РАН. М., 2009. Инв. № 8-1-09.
20. Кант И. Всеобщая естественная история и теория неба. // Кант И. Сочинения в шести томах. Т.1. М.: «Мысль». 1963. 543 с.
21. Motoyama K., Yoshida T. High accretion rate during class 0 phase due to external trigger // MN Roy. Astron. Soc. 2003. V. 344. P. 461–467.
22. Belloche A., Hennebelle P., Andre P. Strongly induced collapse in the Class 0 protostar NGC 1333 IRAS 4A // Astronomy and Astrophysics. 2006. V. 453. Issue 1. P. 145–154.
23. Beckwith S.V.W., Sargent A.I. Circumstellar disks and the search for Neighbouring planetary systems // Nature. 1996. V. 383. P. 139–144.
24. Cieza L.A., Kessler-Silacci J.E., Jaffe D.T. et al. Evidence for J- and H-Band Excess in Classical T Tauri Stars and the Implications for Disk Structure and Estimated Ages // Astrophys. J. 2005. V. 635. Issue 1. P. 422–441.
25. Hueso R., Guillot T. Evolution of protoplanetary disks: constraints from DM Tauri and GM Aurigae // Astron. Astrophys. 2005. V. 442. P. 703–725.
26. Сурдин В.Г. Рождение звезд. М.: «URSS». 2001. 264 с.
27. Дорофеева В.А., Макалкин А.Б. Эволюция ранней Солнечной системы. Космохимические и физические аспекты. М.: УРСС. 2004.
28. 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.
29. Eisner J.A., Carpenter J.M. Massive Protoplanetary Disks in the Trapezum Region // Astrophys. J. 2006. V. 641. Issue 2. P. 1162–1171.

30. 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.
31. 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.
32. Lodders K. Solar system abundances and condensation temperatures of Elements // *Astrophys. J.* 2003. V. 591. P. 1220-1247.
33. Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: «Наука». 1969.
34. 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.
35. 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.
36. Козлов Н.Н., Энеев Т.М. Численное моделирование процесса образования планет из протопланетного диска // *Препринты Института прикладной математики АН СССР*. 1977. № 134.
37. Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем // *Астр. вест.* 1981. Т. XV. № 2. С. 80-94.
38. Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем. // *Астр. вест.* 1981. Т. XV. № 3. С. 131-140.
39. Энеев Т.М. Кольцевое сжатие вещества в капельной модели протопланетного облака // *Астр. вест.* 1993. Т. XXVII. № 5. С. 3-25.
40. Edgeworth K.E. The origin and evolution of the Solar system // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1949. V. 109. P. 600-609.
41. Гуревич Л.Э., Лебединский А.И. Об образовании планет // *Изв. АН СССР. Сер. физич.* 1950. Т. 14. С. 765-775.
42. Naisch K.E., Lada E.A., Lada C.J. Disk frequencies and lifetimes in young clusters // *Astrophys. J.* 2001. V. 553. P. L153 – L156.
43. 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.
44. Wetherill G.W. Formation of the terrestrial planet // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1980. V. 18. P. 77 – 113.
45. Chambers J.E. Planetary accretion in the inner Solar system // *Earth Planet. ci. Lett.* 2004. V. 223. P. 241-252.
46. Jeans J.H. *Astronomy and cosmogony*. Cambridge. 1929.

47. Chandrasekhar S. The gravitational instability of an infinite homogeneous medium when Coriolis acceleration is acting // *Vistas in Astronomy*. 1958. V. 1. P. 344.
48. Bel N., Schatzman E. On the gravitational instability of a medium in nonuniform rotation// *Rev. Mod. Phys.* 1958. V. 30. P. 1015 – 1023.
49. Сафронов В.С. О гравитационной неустойчивости в плоских вращающихся системах с осевой симметрией // *ДАН СССР*. 1960. Т. 130. № 1. С. 53 – 56.
50. Генкин И.Л., Сафронов В.С. Неустойчивость вращающихся гравитирующих систем с радиальными возмущениями // *Астр. ж.* 1975. Т. 52. Вып. 2. С. 306 – 315.
51. Поляченко В.Л., Фридман А.М. Равновесие и устойчивость гравитирующих систем. М.: «Наука». 1976.
52. Лаплас П.С. Изложение системы мира. Л.: «Наука». 1982. 376 с.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Анализ дисперсионного уравнения для протопланетного диска .....	3
2. Развитие и обоснование модели .....	12
Заключение.....	18
Библиографический список.....	21