Отзыв официального оппонента Гринина Владимира Павловича на диссертационную работу Максимовой Ломары Аслановны «Влияние конвективной неустойчивости и поверхностных тепловых волн на структуру и эволюцию протопланетного диска», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация Л.А. Максимовой посвящена изучению тепловой структуры и тепловых возмущений в протопланетных дисках и их роли в развитии конвективной неустойчивости. Решение этих задач напрямую связано с изучением термодинамического состояния дисков на ранних стадиях их эволюции и природы нестационарных процессов, приводящих к большим флуктуациям темпа аккреции на молодые звезды. Другой класс задач, обсуждаемых диссертантом, связан с изучением влияния тепловых волн на структуру поверхностных неоднородностей, наблюдаемых на изображениях дисков с помощью современных интерферометров. Перечисленные выше задачи находятся на переднем крае физики молодых звезд и окружающих их околозвездных дисков. Поэтому тема диссертационной работы Л.А. Максимовой представляется весьма актуальной.

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения.

Во Введении дан краткий обзор современных проблем физики протопланетных дисков и путей их решения. Описаны цели и задачи диссертации и приведена информация о ее структуре; изложены результаты, выносимые на защиту, отмечены их новизна и научная значимость, указан также личный вклад автора в совместные работы.

Первая глава диссертации посвящена изучению роли конвекции в создании конвективно-неустойчивых областей в протопланетных дисках на ранних стадиях эволюции. На этих стадиях околозвездный диск уже существует, но на него еще продолжается интенсивная аккреция вещества из остатков протозвездного облака (оболочки). В зависимости от массы звезды и параметров оболочки этот процесс может продолжаться от нескольких сотен до примерно 1 млн. лет. В этом временном интервале для описания эволюции поверхностной плотности геометрически тонкого кеплеровского диска часто используется уравнение Прингла.

В этом уравнении эволюция поверхностной плотности зависит от темпа притока вещества из оболочки и кинематической вязкости в диске. При этом предполагается, что удельный момент импульса оседающего на диск вещества совпадает с таковым в диске. Это означает, что в приближении Прингла падающий из оболочки газ только добавляет вещество в диск, но не греет его. С учетом этого далее в диссертации рассматриваются только два источника нагрева диска — излучением звезды и конвективной вязкостью.
Фотосферная светимость звезды предполагается равной солнечной, аккреционная светимость зависит от темпа аккреции вещества на звезду. При расчетах оба источника излучения аппроксимируются функцией Планка при температуре 6000 К. \

Здесь следует напомнить , что при такой температуре на долю ультрафиолетового (УФ) изучения приходится лишь очень малая часть полной светимости. По этой причине говорить о нагреве газа УФ излучением звезды, как это делается в диссертации, не вполне уместно. С другой стороны температура аккреционных областей на поверхности звезд типа Т Тельца достигает 10000 К. Учитывая зависимость Планковского среднего коэффициента поглощения от температуры, вклад аккреционной светимости в тепловой баланс протопланетных дисков может оказаться больше вклада звезды (особенно при высоких темпах аккреции). Это обстоятельство нужно иметь в виду при дальнейшей разработке рассматриваемой модели.

Решение уравнения Прингла получено в предположении о постоянстве притока массы из оболочки на область диска, ограниченную радиусами 10 и 20 а.е. Размер этой зоны выбран с учетом параметров молодого протозвездного ядра L1544. Считается, что вязкость в диске обусловлена конвекцией и, так называемой, фоновой вязкостью, обусловленной сверхзвуковой турбулентностью, магнитным полем или волнами плотности. Это позволяет получить распределение поверхностной плотности в диске, которое затем используется при решении уравнения переноса излучения в стационарном режиме. Для этой цели используются приближение Эддингтона и усредненные по частоте Планковский и Росселандовский коэффициенты поглощения. Для обоснования выбора стационарного режима диффузии излучения используется тот факт, что характерное время температурной релаксации для большей части диска много меньше газодинамического времени. Полученное в рамках сделанных упрощений решение позволяет определить размеры зоны неустойчивой турбулентности и ее влияние на темп аккреции.

Итогом этой большой по объему вычислительной работы является вывод о возможности реализации сильно нестабильного режима аккреции, при котором периоды относительно спокойной жизни звезды чередуются со вспышками интенсивной аккреции. Необходимым условием его существования является аккреция вещества на диск из остатков протозвездного облака. Амплитуда и энергетика вспышек аккреции газа на звезду зависят от темпа аккреции на диск: они тем больше, чем выше последний. Этот результат является новым и представляет большой интерес для физики молодых звезд, поскольку открывает новые возможности для интерпретации вспышек фуоров и родственным им объектов. Ряд упрощений, сделанных в процессе его получения, позволяют рассматривать этот результат как качественный, что отмечено автором диссертации в конце второй главы.

Вторая глава посвящена исследованию очень интересного радиационного эффекта, обнаруженного около 20-ти лет назад в работах ряда теоретиков. Он связан с образованием поверхностных неоднородностей в атмосфере диска и неодинаковым освещением звездой передней и задней частей этих неоднородностей. Появляющийся в результате этого градиент давления приводит к образованию поверхностных тепловых волн, распространяющихся по направлению к звезде. В диссертации для моделирования этого процесса используется одномерное уравнение диффузии теплового излучения. Функция нагрева излучением звезды рассчитывается с учетом градиента плотности в диске в радиальном направлении. Благодаря этому удалось получить более точное представление о динамике распространения тепловых волн по диску по сравнению с предыдущими исследованиями. Впервые показано, что тепловые волны распространяются преимущественно в поверхностных слоях диска.

К этой главе есть два замечания: 1) Судя по тексту, для решения задачи о распространении тепловых возмущений в диске используется линеаризованное уравнение диффузии излучения. Было бы уместно привести его в явном виде.

2) Необходимо пояснить, как при начальном значении поверхностной плотности в диске 100 г/см^2 его внутренняя область может быть оптически тонкой для излучения звезды (как это утверждается на стр. 74).

Мелкое замечание: в формуле (2.6) потеряна удельная теплопроводность при постоянном давлении.

В третьей главе продолжено исследование процесса распространения тепловых волн в дисках. Вместо использованного в предыдущей главе приближения гидростатического равновесия диска рассматривается гидродинамическое моделирование. Расчет диффузии излучения выполнен в более точном, двумерном приближении. Совместный учет этих двух факторов приводит к существенному изменению динамики распространения тепловых

волн, в результате чего они быстро затухают. Этот вывод очень важен, поскольку демонстрирует необходимость более строгого подхода к решению задач радиационной и газовой динамики протопланетных дисков.

Оценивая в целом значимость полученных в диссертации результатов, необходимо иметь в виду, что протопланетные диски представляют собой чрезвычайно сложные объекты в плане моделирования их термодинамического состояния и газовой динамики. Поэтому решенные диссертантом задачи и полученные на их основе результаты имеют важное значение для понимания природы нестационарных процессов в протопланетных дисках на ранних стадиях их эволюции. Их достоверность подтверждается использованием хорошо известных численных методов решения уравнений переноса излучения и газодинамики. Полученные результаты апробированы на многих российских и международных конференциях и опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК. Сделанные в отзыве замечания не влияют на высокую оценку результатов, вынесенных на защиту.

Заключение. Диссертация Ломары Аслановны Максимовой удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Владимир Павлович Гринин
Д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник ГАО РАН,
СПБ, Пулковское шоссе, 65/1, 196140.
Тел. 812 3637345
grinin@gaoran.ru vgcrao@mail.ru

Подпись В.П.Гринина заверяю:

Ученый секретарь ГАО РАН /О.Ю. Барсунова/
к.ф.-м.н.

29.11.2023 г.