

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОЙ О-ЗВЕЗДЫ HD149438

Ю.В.ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 1 июля 2025

Принята к печати 10 сентября 2025

Исследованы особенности магнитного поля и других свойств звезды HD149438 (τ Sco). Показано, что эта звезда по всем признакам соответствует другим известным магнитным О-звездам. Одновременно все известные О-звезды имеют близкие свойства с SrCrEu+Si+He-w+He-г объектами, что позволяет предположить их одинаковое происхождение и эволюцию. Приводятся данные о том, что обсуждаемые в литературе гипотезы происхождения магнитных звезд из тесных двойных систем не поддерживаются наблюдениями.

Ключевые слова: *магнитное поле; магнитные звезды; происхождение; эволюция*

1. Введение. В данной работе мы пытаемся разобраться в некоторых сложных проблемах, связанных с интерпретацией свойств магнитной О- звезды HD149438 (τ Sco), а также с новой гипотезой объяснения происхождения и эволюции этой звезды, предложенной в работе [1] и основанной на предположении механизма слияния тесных двойных звезд (ТД). Аналогичные механизмы (ТД) предлагались и раньше, но с различиями в способах генерации магнитного поля и сценария эволюции. Можно указать, например, гипотезу Тутукова и Федоровой [2], в которой компоненты должны иметь мощные конвективные оболочки и заметное начальное магнитное поле. Сильное поле, затем, формируется в конвективной оболочке неизвестным механизмом. Далее будет показано, что маловероятны те условия, которые необходимы для формирования магнитной звезды из тесных двойных. Наш анализ основан на хорошо обоснованной реликтовой гипотезе происхождения магнитных звезд.

1.1. Результаты первичного исследования. Зеемановские измерения круговой поляризации массивной О-звезды HD149438 выполнены в основном с помощью спектрополяриметра ESPaDO nS, установленного на Канадо-Франко-Гавайском 3.5-м телескопе [3]. В этой работе измерен период медленного вращения звезды $P = 41.033$ сут. В HD149438 авторы отмечают наличие сложной крупномасштабной структуры магнитного поля на поверхности, отличной от дипольной, но со значительной долей мелких деталей. Сделан вывод, что, если и существует дифференциальное вращение поверх-

ности, то оно исключительно слабое. Таким образом, такое поведение является признаком твердотельного вращения HD149438 - одно из главных свойств магнитных звезд. Эти данные нисколько не противоречат свойствам других магнитных O-Вр-Ар звезд.

Топология магнитного поля в работе [3] была получена из фотосферных магнитных карт путем изучения Зееман-Допплер - эффекта (по распределению интенсивности и круговой поляризации в спектральных линиях). Авторы делают заключение, что структура магнитного поля представляет собой деформированный тор из замкнутых магнитных петель, окружающих звезду, наклоненный примерно под углом 90° к оси вращения, с дополнительными, более слабыми сетями замкнутых силовых линий. Эта топология, как считают авторы, согласуется с рентгеновскими свойствами HD149938, а также дает естественное объяснение переменности ультрафиолетовых линий, образованных ветром. Хотя авторы не могут полностью исключить возможность того, что поле создается в результате процессов динамо экзотического типа, они все же предполагают, что магнитное поле, скорее всего, является реликтовым остатком на ранних стадиях звездообразования.

2. Наше исследование.

2.1. В работе [4] показано, что звезда HD149938 имеет настолько похожие свойства на (SrCrEu, Si+, Si, He-w, He-r)-объекты, что можно предполагать их одинаковое происхождение и эволюцию. В частности, на зависимости (рис.1) заметно систематическое уменьшение магнитного поля в сторону высоких температур (и в сторону больших R и M). Этому свойству существует

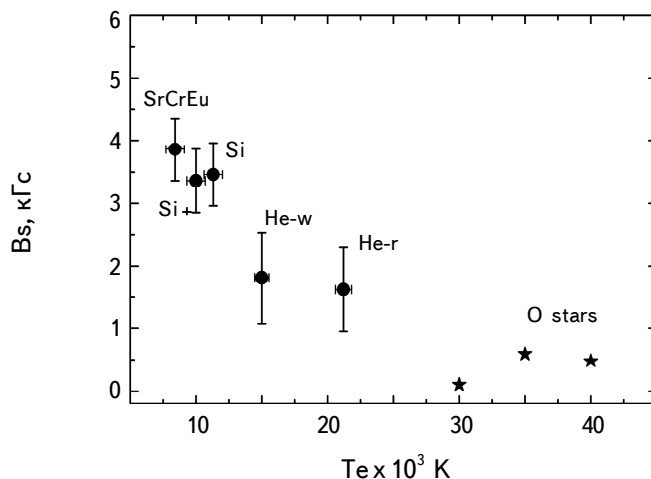


Рис.1. Средние величины среднего поверхностного магнитного поля B_s у звезд разных типов пекулярности, расположенных вдоль температурной шкалы. Круги - Вр/Ар-звезды, звездочки - O-звезды.

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ЗВЕЗД

Звезда	T_e , K	logg	R	P	M	M_b	log t	R/R_z	B_s , Гс
HD37022	40000	4.2	8.2	15 ^d .4	40	-7.6	7.4	1.3	475
HD191612	35000	4.5	5.5	537 ^d	30?	-6.6	6.8	1.0	599
HD149438	30000	4.5	5.0	41 ^d .0	15	-5.7	6.0	0.9	90:

объяснение, приведенное в (пп. 2.4, 2.5). Сравнение свойств звезды HD149438 со свойствами других двух магнитных О-звезд приведено в табл.1, взятой из [4]. Эти объекты близки между собой по температуре T , массе M и радиусу R . Периоды вращения P у всех трех звезд большие, что является необходимым условием для магнитных Вр/Ар-звезд. Медленное вращение вызывает в их объемах динамическую стабильность [5] и твердотельное вращение [6]. В результате возникают благоприятные условия диффузии химических элементов и аномальный химсостав.

Величина среднего поверхностного магнитного поля B_s в HD149938 приблизительная, потому что структура магнитного поля сложная, она описывается тремя диполями [4], в отличие от однодипольных звезд HD37022 и HD191612. На видимой стороне звезды одновременно находятся области с разным знаком магнитного поля, которые частично компенсируют друг друга. В результате этого эффекта величина магнитного поля B_s , по-видимому, занижена.

2.2. На рис.2 приведено распределение числа звезд N/N_{max} по массам. Кружками обозначены наиболее массивные магнитные звезды He-r+He-w типов пекулярности. Звездочками обозначены магнитные О-звезды. Этот график приводит к предположению, что О-звезды продолжают последовательность магнитных звезд в сторону больших масс (радиусов, температур). Изучаемая HD149938 отмечена буквой "а". Кстати, в работе [7] найдено, что в О-звезде HD37022 гелий находится в избытке, как и у соседних по массам He-r объектов, что еще раз указывает на "родственность" всех рассматриваемых звезд. Наиболее вероятное объяснение уменьшения числа звезд состоит в том, что с увеличением массы протозвезды уменьшается вероятность ее формирования. Чем массивнее звезда, тем больше необходима энергия на "магнитное" торможение. Свойство медленного вращения (период вращения $P > 1$ сут), а от него динамическая стабильность внутренних объемов - одно из критических свойств, приводящих к формированию магнитных звезд [8]. Потеря момента вращения магнитных протозвезд происходит путем передачи момента вращения окружающим облакам через силовые линии, в соответствии с механизмом

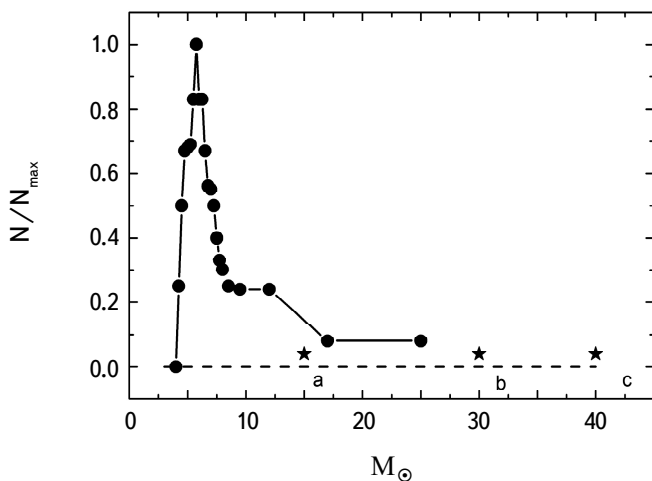


Рис.2. Распределение по массам массивных магнитных звезд He-r+He-w типов (кружки), и O-звезд (звездочки).

Моушовиаса и Палеологу [9]. Действие этого механизма наиболее эффективно в самых ранних фазах эволюции, но не в поздних. В отличие от этого результата гипотеза ТД предсказывает потерю момента вращения на Главной последовательности (ГП) [1], хотя нет признаков формирования магнитных звезд ТД механизмом в этот период эволюции (пп. 2.3, 2.5 и рис.5).

2.3. Положение O-звезд на эволюционном треке изучено в работе [4] и показано на рис.3 и в табл.1. Все они находятся вблизи ZAMS, демонстрируя одинаковое с маломассивными звездами свойство, означающее, что магнитное

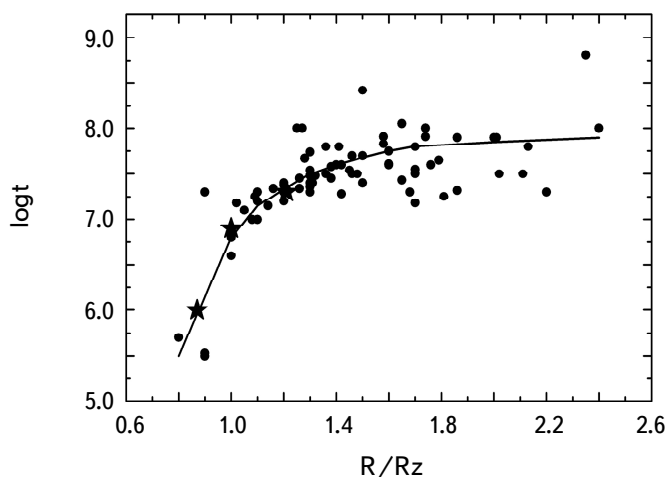


Рис.3. Положение магнитных O-звезд на эволюционном треке в координатах возраст $\log t$ - относительный радиус R/R_z (где R_z - радиус звезды на ZAMS).

поле формируется на ранних стадиях эволюции и проявляется вблизи ZAMS после прекращения аккреции и горения дейтерия. Не замечены какие-либо особенности формирования массивных магнитных звезд. К сожалению, пока не найдены магнитные О-звезды в более поздних стадиях эволюции. Положение О-звезд на ZAMS - факт, важный для решения нашей задачи, потому что он указывает на формирование магнитных звезд в стадии эволюции, предшествующей ГП. С точки зрения существующей теории эволюции [10] массивные звезды выходят на ZAMS и в них загорается водород еще до того, как они освобождаются от окружающего их газо-пылевого облака. Очевидно влияние этого облака на спектроскопические свойства звезд. В О-звездах отмечается сильный ветер, особенно на магнитных полюсах. Ввиду сложности магнитной структуры в звезде HD149438 переменность спектроскопических особенностей в ней скрадывается, затушевывается. В данной работе мы не обсуждаем спектроскопию.

2.4. Как видно из рис.1 звезды с большими радиусами (температурами) имеют более слабое поверхностное магнитное поле. Зависимость $B_s(\log R)$ на рис.4 построена по данным [11], линейная регрессия которой имеет вид

$$B_s = (5.96 \pm 0.67) - (6.57 \pm 1.13) \log R. \quad (1)$$

Каждая точка зависимости представляет собой среднюю величину B_s и $\log R$ у звезд разного типа пекулярности. Если допустить, что звезды всех типов формируются из облаков с примерно одинаковыми величинами средней плотности и средней величиной магнитного поля, то эта зависимость показывает, что средняя величина магнитного поля звезд зависит только от радиуса. Величина поля B_s обратно пропорциональна величине радиуса (массы

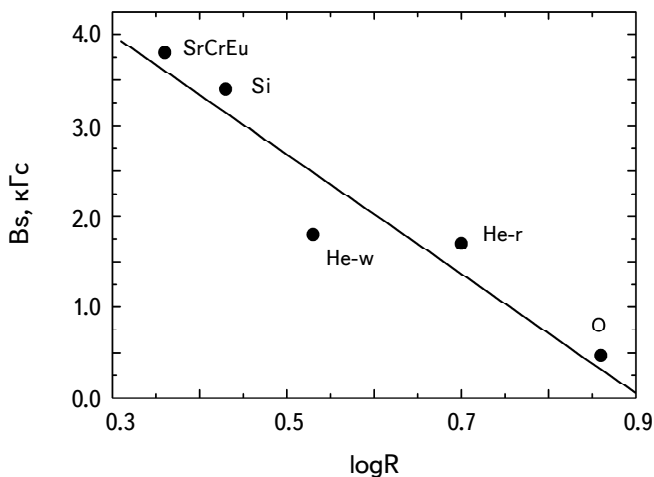


Рис.4. Средние величины среднего поверхностного магнитного поля B_s у звезд разных типов пекулярности и их средние радиусы.

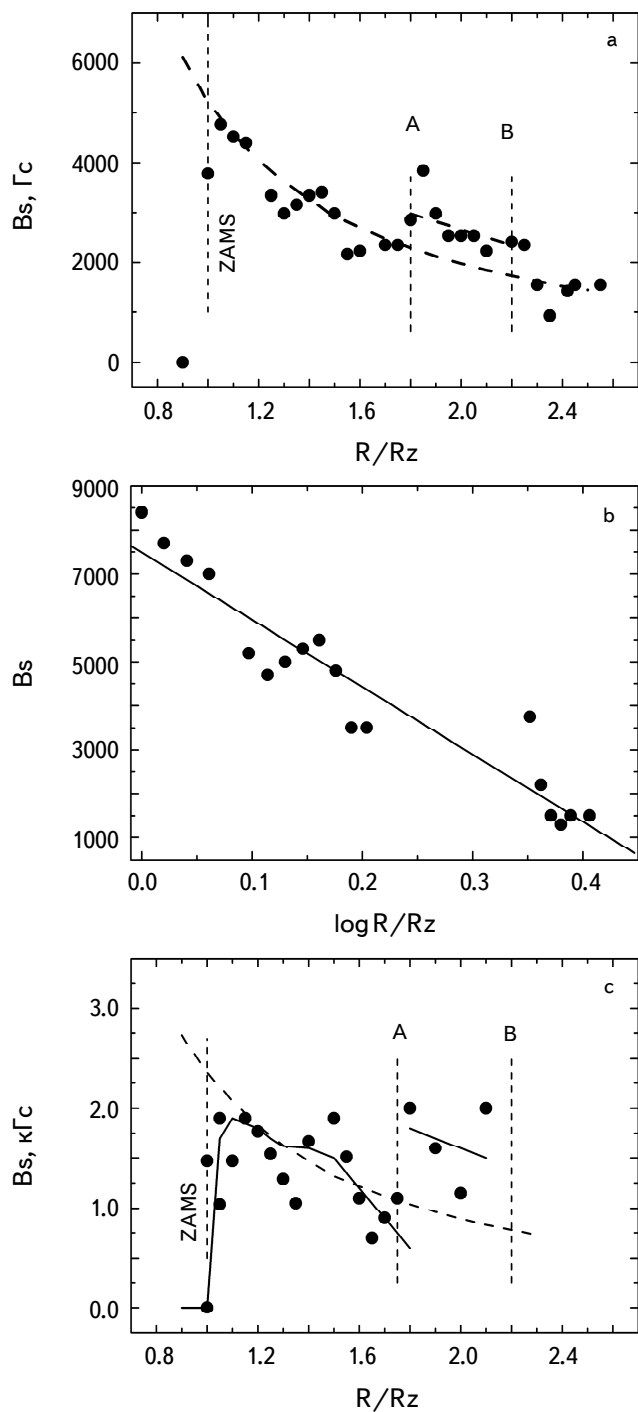


Рис.5. Изменение среднего поверхностного магнитного поля B_s при эволюционном увеличении радиуса. а) Si+SrCrEu звезды, б) зависимость $B_s(\log R/R_z)$, в) He-r+He-w звезды.

и температуры). В процессе раннего коллапса уменьшается радиус протозвезды, масса остается в первом приближении без изменения. Следовательно, и средняя величина B_s -звезд данной группы будет зависеть только от радиуса. Таким образом, приходим к выводу, что зависимость (1) отражает ход формирования и эволюции магнитных звезд в период раннего коллапса в пределах реликтовой гипотезы.

2.5. Из рис.5а видно, что величина магнитного поля звезд при эволюционном увеличении радиуса - $B_s(R/R_z)$ уменьшается. Здесь параметр R/R_z показывает величину радиуса звезды по отношению к ее величине на ZAMS. Обе зависимости построены по данным [11]. Второй важный вывод состоит в том, что магнитные звезды распределяются поперек полосы ГП равномерно и нет никаких признаков искажения зависимости от радиуса. На рис.5б показана зависимость от радиуса в координатах $B_s(\log R/R_z)$. Прямая - это линейная регрессия, которая имеет вид

$$B_s = (7487 \pm 308) - (15312 \pm 1275) \log(R/R_z). \quad (2)$$

Итак, по мере эволюционного роста радиуса звезды происходит изменение среднего поверхностного поля. Фактически (1) и (2) это одинаковые зависимости, построенные на основании разных параметров - радиусов R и относительных радиусов R/R_z . На рис.5с показана зависимость $B_s(R/R_z)$, но для массивных звезд He-r+He-w. Данных мало, поэтому наблюдается большой разброс точек. Хорошо видно, что общая конфигурация похожа на рис.4а. Вывод состоит в том, что среднее поверхностное магнитное поле B_s в каждой группе звезд зависит только от среднего радиуса звезд. Разброс величин магнитного поля внутри каждой группы зависит от локальной начальной величины магнитного поля облака. Эта ситуация естественно объясняется в рамках гипотезы реликтового магнитного поля [12,13]. Если зависимости $B_s(R)$ и $B_s(R/R_z)$ представить как степенные, то в случае рис.4 показатель степени $\kappa = -1.70 \pm 0.07$, на рис.5а $\kappa = -1.44 \pm 0.45$, величины одного порядка, одного происхождения. Для нашего обсуждения важно то, что зависимости не отражают никаких других процессов в течение эволюции, кроме изменения радиуса. В рамках гипотезы ТД величина B_s зависит от множества промежуточных процессов и не может отражать влияние только R .

Попутно, имеет смысл объяснить искажение зависимости $B_s(R/R_z)$ в пределах $R/R_z = 1.8 - 2.2$. Это тот момент, когда происходит внутренняя перестройка звезд с уменьшением радиуса. В результате магнитное поле B_s увеличивается вплоть до момента прекращения изменения R из-за перестройки.

2.6. На рис.6 показано изменение продольного магнитного поля с фазой вращения $Be(\Phi)$ звезды HD149938, на рис.7 схема распределения магнитного

поля внутри звезды, на рис.8 распределение магнитного поля по поверхности, взятые из работы [4]. Из этих данных видно, что магнитное поле описывается одним сильным диполем и двумя более слабыми. Физические свойства звезды связаны в основном с сильным диполем. Все три диполя смещены из центра звезды поперек их оси на значительную величину, в пределах от $0.2R_*$ до $0.5R_*$. Наклон оси основного диполя к плоскости экватора вращения небольшой $\alpha = 5^\circ$, фактически они все лежат в плоскости экватора вращения, что типично для магнитных звезд. Таким образом, диполи окружают центр звезды, поэтому формируется структура магнитного поля, похожая на торои-

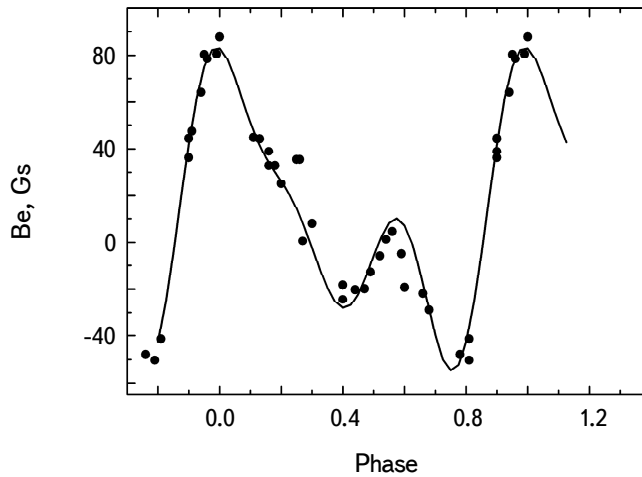


Рис.6. Изменение продольной величины магнитного пол B_e с фазой вращения звезды HD149438. Кружки - наблюдения, сплошная линия - модельная зависимость.

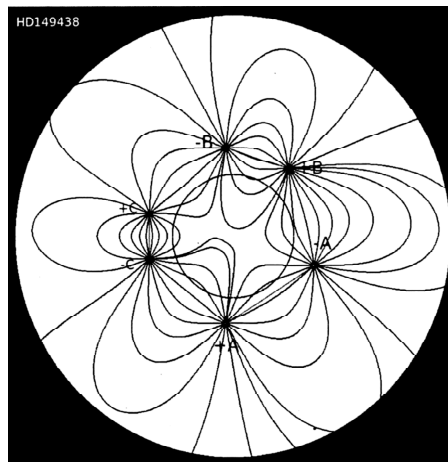


Рис.7. Схема внутренней структуры магнитного поля звезды HD149438. Круг в центре - область конвективного ядра.

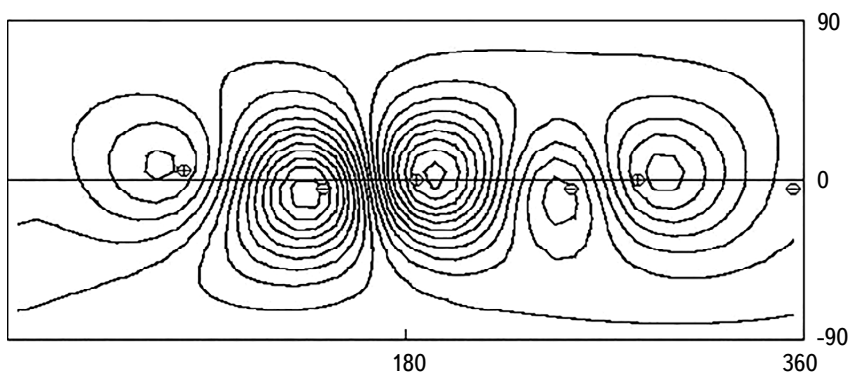


Рис.8. Меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности HD149438.

дальнюю. Именно такое поле предполагается в работе [3], но которое мы строим из других данных (фазовых изменений B_s). Наш значительный опыт построения моделей показывает, что магнитные звезды формируются из одной, двух или трех протозвездных фракций, намагниченных с разной силой и в разных направлениях. Таким образом, в нашем приближении поле звезды HD149938 не тороидальное, а формируется в результате сложения полей трех магнитных фрагментов [14]. Гипотеза ТД не может объяснить многодипольные конфигурации.

2.7. Детальное исследование трех известных магнитных О-звезд [4] показывает, что они формируются и эволюционируют практически одинаковым образом и не отличаются от основной массы менее массивных магнитных звезд. Наличие магнитных полей в звездах большой массы регулярно критически обсуждалось в литературе. Их наличие также постулировалось при объяснении многих загадочных явлений, включая особенные профили рентгеновских линий и высокие рентгеновские температуры (например, [14-17]). Следует обратить внимание на то, что три звезды находятся в такой фазе эволюции, когда они еще не освободились полностью от окружающего их газо-пылевого облака [4]. В результате возникают сложные спектроскопические особенности звезд. Не заметны какие-либо особенности свойств магнитных О-звезд, которые указывали бы на другое происхождение.

Ввиду сильной ионизации звездного вещества и высокой проводимости омическое затухание магнитного поля теоретически продолжается в течение порядка $\sim 10^{10}$ лет. Поскольку возраст изучаемых звезд много меньше, то это значит, что полный магнитный поток и крупные магнитные фрагменты в трех рассматриваемых звездах (как и звезд других типов пекулярности) в течение всего времени их жизни, от момента рождения до момента ухода с ГП практически не изменяются, звезды вращаются твердотельно.

2.8. Зависимость $\log P(\log B_s)$ важнейшая и сложнейшая в физике магнитных звезд. Она носит признаки действия механизма "магнитного" торможения магнитных протозвезд, разработанного в [9]. Для более четкого представления о свойствах этой зависимости приводятся рисунки, соответствующие мало массивным звездам Si+SrCrEu типа и массивным He-r+He-w объектам (рис.9а и рис.9б). Левая часть зависимости (оггибающая штриховая линия) не противоречит предположению, что чем сильнее магнитное поле, тем активнее происходит потеря момента вращения. Обращает особое внимание то, что диапазон периодов вращения на рис.8а чрезвычайно велик - от 1 сут до 30000 сут, что свидетельствует о значительной роли механизма потери момента вращения. Следует отметить также, что указанная зависимость действует только до $B_s \approx 10000 - 12000$ Гс и имеет максимум на $B_s \approx 5600$ Гс. Это свойство показывает, что в случае больших, чем $B_s \approx 5600$ Гс, величин

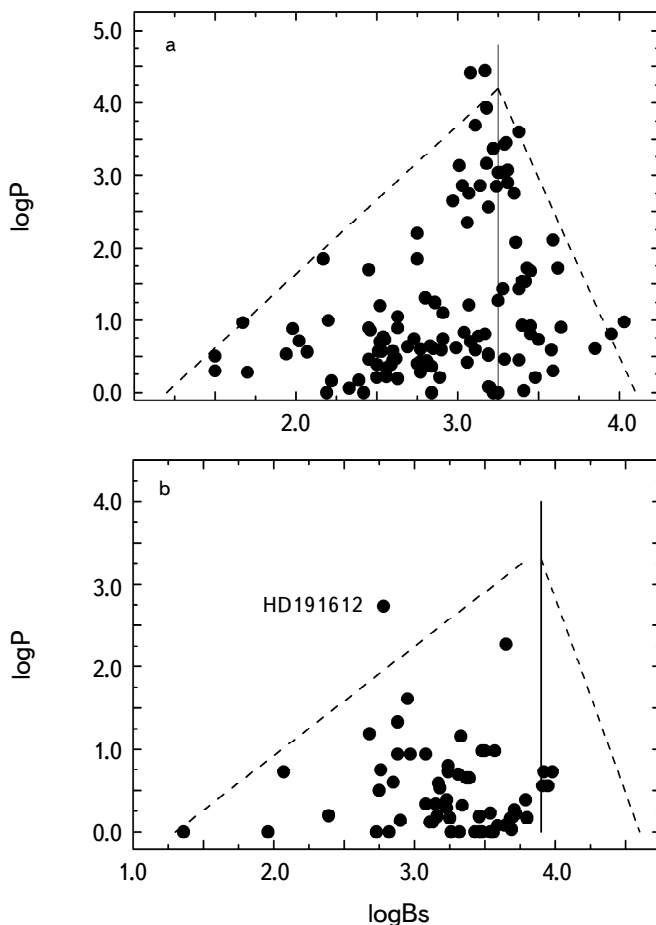


Рис.9. Зависимость периодов вращения звезд от магнитного поля. а) маломассивные звезды Si+SrCrEu-типа, б) массивные звезды He-r+He-w типов.

магнитного поля, эффективность "магнитного" торможения резко падает. Наше предположение [18] состоит в том, что при больших величинах магнитного поля начинают вращаться все более далекие, более массивные области, окружающие протозвезду, на которых теряется значительная доля энергии. Следующее важное замечание состоит в том, что на рис.9b (He-r+He-w) максимальная величина $P_{max} \approx 300 - 400$ сут, что на 2 прыжка (!) меньше, чем на рис.9a. Заметим также, что зависимость $\log P(\log B_s)$, по-видимому, тоже логарифмическая, что важно для будущих исследований. Общий вывод состоит в том, что эффективность "магнитного" торможения обратно пропорциональна массе (и радиусу). Мы акцентируем слово масса, потому что более массивную протозвезду труднее затормозить.

Наличие "не вращающихся" магнитных звезд ($P_{max} \approx 30000$ сут) естественно возникает в результате "магнитного" торможения самых медленно вращающихся протозвездных облаков из начального распределения. Рассмотренные в данном разделе свойства магнитных звезд логично вписываются в предсказания реликтовой гипотезы и гипотезы "магнитной" потери момента вращения. Что касается гипотезы тесных двойных, то показанные зависимости в ее рамках не понятны. Но в случае ТД потеря момента вращения перечисленными в (п. 3.2) способами возможна, кроме получения "не вращающихся" объектов.

2.9. Вековая динамическая стабильность во все периоды эволюции магнитных Вр/Ар звезд обеспечивает сохранение магнитного поля. Возможность такого состояния хорошо видна из разработанного в настоящее время сценария [20,12,19]. Динамическая стабильность магнитной звезды в рамках гипотезы ТД возможна только после потери момента вращения.

2.10. Множество наблюдаемых магнитных структур хорошо объясняется таким же множеством структур "родительских" протозвездных облаков [13]. Реликтовое магнитное поле протозвезд всех масс сжимается вместе с газово-пылевым облаком без нарушения структуры вследствие вмороженности. Неоднородности магнитного поля сохраняются. Реликтовый механизм предполагает отсутствие крупных динамических возмущений в объеме магнитной протозвезды и затем звезды. Мелкие неоднородности магнитного поля исчезают со временем в результате омической диссипации, остаются крупномасштабные полоидальные реликтовые структуры, сравнимые по размерам со звездой. Механизм ТД не предполагает это свойство.

2.11. Важнейшее свойство магнитных звезд, которое поддерживает реликтовую гипотезу и противоречит гипотезе ТД, это преимущественное направление $\alpha = 0 - 20^\circ$ магнитных силовых линий (направления оси диполя) по отношению к экватору вращения. Это свойство является прямым результатом работы "магнитного" механизма [9], действие которого наиболее эффективно

в указанных пределах α .

3. Происхождение и эволюция звезды HD149938.

3.1. *Предварительный сценарий* формирования и эволюции магнитных звезд, выработанный на основе реликтовой гипотезы и анализа многочисленных наблюдательных данных, подробно описан в работах [12,19,20]. Свойства магнитных звезд, представленные выше, хорошо согласуются между собой и позволяют построить достаточно убедительную схему эволюционных процессов, происходящих последовательно, и объясняющих основные свойства магнитных звезд.

В работе [4] показано, что сценарий происхождения и эволюции магнитных О-звезд вероятно не отличается от звезд Не-г типа. Намагниченное прото-звездное облако коллапсирует вместе с магнитным полем вследствие вмороженности силовых линий. Наблюдаемая степень ионизации вещества, содержащего магнитное поле, достаточна для этого. Начальные неоднородности магнитного поля остаются в объеме звезды в течение всего времени эволюции вплоть до выхода ее на ГП. На ранних фазах эволюции и в более поздний период, если и были мелкие неоднородности магнитного поля, то они в результате омической диссипации разрушаются и остается только долго живущая крупномасштабная составляющая, близкая по структуре к дипольной. Структуры, сравнимые с размерами самой звезды, не успевают диссипировать, в результате чего создаются крупномасштабные неоднородности (табл.2). Предполагавшиеся ранее катастрофические изменения и частичные разрушения первоначальных структур, вследствие действия неустойчивой фазы, мы считаем неверными. В процессе сжатия, как только вокруг центральной области возникает температура $T > 2000$ К, там возникает неустойчивость вследствие ионизации водорода, гелия и других легких элементов. Следует предположить, что вокруг этой области, где $T < 2000$ К, объем протозвезды остается стабильным. Вероятно, только при таких условиях можно сохранить реликтовое магнитное поле и его структуру в течение неустойчивой фазы. Молодые звезды с лучистым переносом энергии в стадии НАеВе тоже достаточно стабильны,

Таблица 2

ДОЛЯ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД С РАЗНЫМИ СТРУКТУРАМИ

Структура	Доля звезд, %
Центральный диполь	17
Смещенный диполь вдоль оси	32
Смещенный диполь поперек оси	9
Двух-трех дипольная структура	20
Структура, близкая центральному диполю	20

в них сохраняется магнитное поле. Наблюдательные данные показывают, что в фазе HАеВе и вблизи ZAMS происходит окончательное формирование наблюдаемых структур. Более подробную информацию можно получить в цитированных работах. Медленное вращение необходимо для динамической стабилизации магнитных звезд, в условиях которой возникает наблюдаемая диффузия химических элементов. Изученные свойства магнитных звезд не противоречат гипотезе потери момента вращения путем передачи его окружающим облакам через силовые линии [9]. Период эволюции от начала коллапса до выхода звезды на ZAMS оказывается достаточным для формирования крупномасштабного полоидального магнитного поля, наблюдаемого у звезд ГП.

3.2. Авторы работы [1] предложили идеализированную схему усиления магнитного поля в звезде HD149938 в случае обмена массой тесной двойной системы. Проведено трехмерное магнитогидродинамическое моделирование слияния тесной двойной системы, состоящей из компонент $9 M_{\odot}$ и $8 M_{\odot}$ и горящего водорода. Масса переносится от массивной звезды. Фактически выполнен расчет модели, объясняющей свойства конкретно HD149438, тем не менее, авторы предполагают, что таким механизмом можно объяснить происхождение всех наблюдаемых магнитных O-Вр-Ар объектов. В данной работе нас интересует, в первую очередь, именно это предположение. Рассмотрим возможности применения предложенного механизма в таком случае. Авторы ожидают, что слияние не магнитных звезд ГП, имеющих меньшие массы, чем у HD149438, со звездами, находящимися на других эволюционных фазах (например, со звездами, не являющимися членами ГП), приведет к образованию объектов с сильными магнитными полями. Это означает, что родительская звезда перед разделением на компоненты прошла все стадии эволюции, соответствующие всем звездам. Это коллапс вдоль вертикального трека эволюции, нестационарная фаза, фаза HАеВе и, наконец, ГП. Магнитное поле протозвездных облаков не сохранилось, звезда выходит на ZAMS и на ГП эволюционирует без магнитного поля. Среди них некоторая часть делится на близкие компоненты, которые в результате слияния превращаются в магнитные звезды, причем их сейчас насчитывается 10%.

Рассматривается серия магнитогидродинамических процессов в аккрецирующей среде, которые усиливают затравочное магнитное поле в несколько этапов. Необходимость последовательного действия серии разных способов усиления магнитного поля кажется слишком искусственным и нереальным. В аккреционном потоке взаимодействующих ТД "затравочное" магнитное поле усиливается (механизм не обсуждается, примеры аналогичных процессов в других астрофизических объектах не приводятся) и достигает 10^8 Гс, что соответствует усилению в 10^8 раз. При насыщении магнитная энергия оказы-

вается такого же порядка, как турбулентная энергия, которая является источником усиления магнитного поля. Какова структура полученного магнитного поля, неясно, по всей видимости это вихревая структура. В таком случае авторы все же вынуждены предположить, что в какой-то степени реликтовое магнитное поле все же должно было сохраниться. Следовало бы объяснить также, как оно было потеряно в ранних стадиях эволюции. В теории эволюции звезд стоит проблема того, как избавиться от сильного реликтового магнитного поля [21] при сжатии протозвездных облаков. Для объяснения этой проблемы используется механизм амбиполярной диффузии. Представляется, что невозможно обойти это важнейшее свойство.

После окончательного слияния компонентов усиленное магнитное поле распространяется по всему объему, вплоть до центра звезды. Возникает проблема диффузии магнитного поля. Каковы условия диффузии? Тем более, расчет показывает, что когда ядра двух звезд сливаются, на границе их образуются вихри, способствующие дополнительному усилению магнитного поля. К сожалению, и в данном случае возникают неясности со структурой, очевидно, что она вихревая. Но как в вихревом поле происходит диффузия магнитных силовых линий? Как возникают наблюдаемые структуры центрального диполя?

Расчет показывает, что в дифференциально вращающемся аккреционном потоке возникает турбулентность, которая тоже способствует экспоненциальному усилению магнитного поля неизвестной структуры, очевидно тоже вихревой. Но турбулентность может приводить как к усилению, так и к ослаблению магнитного поля. Следует применять определенные типы (условия) турбулентности для усиления поля. Возникают ли подходящие условия в данной ситуации, неясно. Расчет показывает, что из-за большого углового момента образуется тор, окружающий центральное сферически симметричное ядро, которое находится в состоянии твердотельного вращения. Одновременно, поддерживаемый центробежными силами тор вращается с субкеплеровскими скоростями. Большая часть тора аккрецирует на центральную часть и формирует обширную оболочку, при этом $0.1M$ окажется в диске. В результате предыдущих процессов, напряженность магнитного поля оказывается равной 9 кГс , но какова структура возникшего в результате нескольких этапов усиления магнитного поля и сложения промежуточных структур, снова непонятно. В своих дальнейших рассуждениях авторы поступают просто, они делают безосновательное предположение, что структура магнитного поля в конце концов соответствует структуре магнитного диполя! Но это важнейший процесс в эволюции магнитных звезд! Турбулизованная структура магнитного поля слившихся компонент должна сформироваться каким-то образом в полоидальную, наблюдаемую в магнитных звездах ГП. Тем более, что в звезде

HD149438 найдено [3], что структура магнитного поля не дипольная, а тороидальная! Таковы основные замечания. Попутно обращаем внимание на то, что в случае реликтовой гипотезы структуры магнитного поля являются следствием структур магнитных протозвезд [20] (п. 2.6).

Далее, авторам работы [1] необходимо было погасить скорость вращения звезды HD149438, потому что период вращения очень большой $P=41$ сут. Предполагается, что происходит внутренний перенос углового момента, плюс потеря момента через намагниченный звездный ветер, плюс за счет внутренней перестройки звезды тоже происходит дополнительная потеря момента вращения. Таким сложным способом HD149438, очевидно, и другие магнитные звезды, в конце концов, приобретают малую скорость вращения. Указанные способы потери углового момента вряд ли возможны, кроме намагниченного звездного ветра. Таковы (коротко) некоторые трудности механизма формирования магнитной звезды в результате слияния двух тесных компонент двойных систем. Все эти многочисленные процессы необходимо как-то согласовать с наблюдаемыми свойствами, которые к настоящему времени накопились в достаточном количестве, как мы видели выше. Первое, что настораживает, это формирование значительного ряда чрезвычайно сложных и запутанных событий в процессе генерации магнитного поля и других свойств. Существуют и другие сложности, с которыми приходится сталкиваться при интерпретации наблюдений с точки зрения ТД механизма, обсуждаемых далее.

3.3. В рамках гипотезы ТД совершенно непонятно, почему магнитные звезды имеют преимущественную ориентацию $\alpha = 0 - 20^\circ$ магнитных силовых линий (осей диполя) по отношению к экватору вращения. С точки зрения реликтовой гипотезы и механизма потери момента вращения протозвезды [10] такое свойство обязательно.

3.4. Итак, в [1] исследуются результаты слияния тесных двойных звезд ГП (не прото-звезд и не звезд НАеВе). На рис.4а [12] показано изменение величины магнитного поля магнитных звезд Si+SrCrEu-типа пекулярности, а на рис.4б массивных магнитных звезд He-г+He-w типов вдоль эволюционного трека. Особое замечание состоит в том, что магнитные Вр/Ар-звезды уже в момент выхода на ZAMS обладают дипольным магнитным полем. Сейчас уже очевидно, что предшественники магнитных звезд, находящиеся в стадии НАеВе, тоже обладают сильными магнитными полями, но которые у них не обнаруживаются вследствие аккреционной неустойчивости верхнего слоя атмосфер и горения дейтерия [22]. Это как раз тот случай, когда магнитное поле не усиливается, а разрушается турбулентией. После прекращения аккреции и горения дейтерия поверхность звезд динамически стабилизируется и внутреннее дипольное магнитное поле появляется на

поверхности, возникает диффузия химических элементов, приводящая к химическим аномалиям. Дальнейшее поведение (после ZAMS) магнитного поля О-Вр-Ар объектов связано только с эволюционным ростом (изменением) радиуса. Это видно на рис.4ab. Таким образом, нет признаков формирования магнитной звезды методом тесных двойных систем ни в период НАеВе, ни в период эволюции на ГП.

3.5. Гипотеза тесных двойных систем не объясняет наблюдаемые структуры магнитного поля О-Вр-Ар звезд, которые перечислены в табл.2 [23]. С точки зрения реликтовой гипотезы это свойство является естественным следствием сохранения начальной магнитной структуры протозвездного облака вследствие вмороженности магнитного поля. Кроме того, чисто тороидальная конфигурация, предполагаемая в звезде HD149438, не может быть устойчивой. Паркер [24] считает, что именно дипольная конфигурация наиболее устойчива вследствие минимальной энергетики. Работа по моделированию [13] показывает, что структура магнитного поля, похожая на тор, наблюдается только у трех звезд из 150 и легко объясняется начальной структурой материнского магнитного облака.

3.6. Зависимость $\log P(\log Bs)$ является следствием действия "магнитного" торможения протозвезд (п. 3.8). В случае ТД происхождение такой зависимости непонятно.

3.7. Зависимость $Bs(R)$ (п. 3.4) понятна в пределах гипотезы о реликтовом поле. При статистически средней величине магнитного поля в протозвездных облаках средняя величина магнитного поля звезд будет зависеть только от ее радиуса. В случае ТД такая зависимость непонятна.

3.8. Факт твердотельного вращения магнитных протозвезд и звезд свидетельствует об отсутствии каких-либо динамических неустойчивостей в их объеме (кроме конвективного ядра в О-Вр-Ар объектах). Это свойство отлично сохраняет реликтовое магнитное поле в течение всего периода эволюции звезд, но оно не совместимо с механизмом ТД, где процесс усиления магнитного поля вызван нестабильными явлениями.

3.9. Зависимость $N/N_{max}(v \sin i)$, приведенная на рис.10, построена по данным работы [8]. Левая зависимость относится к Ар+Ам звездам, правая относится к нормальным звездам. Зависимость Ар+Ам возникает в результате "магнитного торможения нормальных протозвезд (при предположении, что их распределение сохраняется). Оказывается, что протозвезды с максимальными $v \sin i$ теряют момент вращения "магнитным" механизмом в меньшей степени, чем те, которые обладают минимальными $v \sin i$, в соответствии с коэффициентом

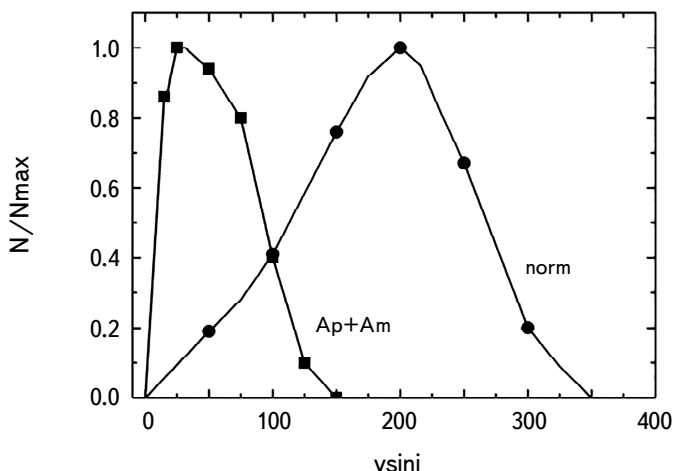


Рис.10. Распределение химически пекулярных звезд Ap+Am типов и нормальных звезд вдоль шкалы $v \sin i$.

$$k = (25.01 \pm 1.24) - (8.94 \pm 0.56) \log(v \sin i). \quad (3)$$

Зависимость коэффициента k от $v \sin i$ магнитных звезд свидетельствует о более эффективном торможении магнитных "медленных" протозвезд. Этот эффект объясняет значительное количество предельно медленных магнитных ротаторов вплоть до "не вращающихся" звезд. В случае ТД такая зависимость невозможна.

3.10. Реликтовый механизм просто объясняет дефицит тесных двойных магнитных Ap-звезд и нормальное количество их в широких парах. В результате приливных взаимодействий магнитное поле в тесных двойных системах разрушается, как у Am-звезд. В случае ТД близкие компоненты исчезают для того, чтобы снова заменить их, но уже в качестве магнитных звезд! Дефицит не получается.

3.11. Наблюдения показывают [27], что в скоплениях и ассоциациях находится иногда значительное количество магнитных звезд. Например, в ассоциации Орион OB1 находится около ~65 магнитных звезд примерно одинакового возраста, т.е. около 10% общего количества. Авторы [1] не указывают механизм, который мог бы создавать такое количество достаточно тесных двойных систем одинакового возраста одновременно в одном пространстве. Причем требование к "близости" компонент должно быть довольно жестким. Надо помнить, что большое количество Am-звезд (около 10%) формируется именно из тесных двойных систем [13,25,26]. Возникает проблема, в чем различие? В каких случаях ТД становятся магнитными, а в каких случаях Am-звездами? Таким образом, гипотеза ТД сталкивается с новой значительной трудностью. В то же время

имеющиеся в настоящее время данные показывают, что формирование магнитных звезд с точки зрения реликтовой гипотезы трудности не испытывает. Для этого необходимо только достаточно медленное вращение, медленнее, чем критическая величина $V < V_c$. Оно формируется путем "магнитного" торможения. Ам-звезда формируется в случае $V > V_c < V_{max}$ [14] в результате приливных взаимодействий между тесными компонентами. В случае $V > V_{max}$ приливные взаимодействия уже недостаточны для торможения Ам-звезды. Где в этой схеме место для гипотезы ТД, непонятно. В турбулентной протозвездной среде, обладающей широким диапазоном моментов вращения, механизм "магнитного" торможения уверенно обеспечивает 10% долю медленных магнитных ротаторов.

3.12. Если считать, что предлагаемый механизм ТД объясняет происхождение всех магнитных звезд, то надо разобраться в следующем частном случае, но касающемся большого количества звезд - как формируются самые мало-массивные магнитные звезды с $M \sim 2M_{\odot}$. В таком случае каждый из компонент имеет $M \approx 1M_{\odot}$. Такие объекты имеют совершенно другие свойства, по сравнению с теми, у которых $M > 2M_{\odot}$: они полностью конвективные (а если соотношение другое?). Возникает неясность: каковы условия деления и вновь соединения конвективных звезд. Необходима разработка сценария.

4. *Заключение.* Приведенный выше анализ свойств магнитной О-звезды HD149438 показывает, что они совпадают со свойствами других магнитных О- звезд и магнитных звезд других типов пекулярности. Приводимые выше основные зависимости полностью подтверждают такое предположение. Таким образом, скромное до сих пор семейство магнитных О-звезд дополняется еще одним объектом. Не вызывает сомнения, что они объединены общим происхождением и особенностями эволюции. Различия вызваны только влиянием масс. Тем не менее, звезда HD149438 отличается от других магнитных О-звезд сложной структурой магнитного поля, которое формируется тремя диполями. Такие структуры наблюдаются только у трех объектов: HD18078 (SrCrEu), HD37776 (He-r) и HD149438 (O), относящихся к другим типам пекулярности. Очевидно, что сложность структур не зависит от типа пекулярности, а только от начальных условий. По современным данным структуры магнитных звезд всех масс от $M \approx 2M_{\odot}$ до $M \approx 20 - 40M_{\odot}$ на ZAMS уже полностью сформированы. В фазе НАеВе детали эволюции достаточно хорошо изучены. С точки зрения реликтового механизма сложное распределение магнитного поля по поверхности звезды HD149438, как в двух других примерах, отражают начальную структуру молодых протозвезд [20]. Наблюдаемый набор (табл.2) поверхностных структур не может быть объяснен ТД механизмом.

Итак, механизм ТД предполагает действие ряда последовательных событий при слиянии ТД, которые усиливают затравочное магнитное поле до нужной

величины. Расчет не показывает, какая структура магнитного поля формируется в результате каждого события и, затем, каков результат сложения различных структур в конце процесса генерации. Поэтому авторы просто предполагают, что в конце концов, возникает наблюдаемая дипольная структура, такая же, как у звезд О-Вр-Ар. На наш взгляд для такого основополагающего предположения необходимо хоть какое-то основание. Кроме того, структура в случае HD149438 не дипольная, а тороидальная (!) [3], тем самым задача усложняется. На приводимых выше зависимостях, относящихся к магнитным звездам всех типов пекулярности, магнитные ТД звезды никак не вписываются.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Россия, e-mail: glagol@sao.ru

FEATURES OF THE MAGNETIC O-STAR HD149438

Yu.V.GLAGOLEVSKIY

Investigated features of the magnetic field and other properties of the star HD149438. It is shown that this star corresponds to other known magnetic O-stars in all respects. At the same time, all known O-stars have the same properties as SrCrEu+Si+He-w+He-r objects, which allows us to assume their same origin and evolution. There are data on the fact that the hypotheses of the origin of magnetic stars from close binary systems discussed in the literature are not supported by observations.

Keywords: *magnetic field: magnetic stars: origin: evolution*

ЛИТЕРАТУРА

1. *F.R.N.Schneider et al.*, Nature, **574**, 211, 2019.
2. *А.В.Тутуков, Ф.В.Федерова*, Астрон. ж., **87**(2), 2010.
3. *J.F.Donati et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **370**, 629, 2006.
4. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **79**(2), 260, 2024.
5. *I.D.Howard, R.K.Prinja*, Astrophys. J. Suppl., **69**, 527, 1989.
6. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophysics, **59**(3), 321, 2016.

7. *Yu.V.Glagolevskij*, *Astrophys. Bull.*, **70**(2), 260, 2024.
8. *H.A.Abt*, *N.Morrell*, *Astrophys. J. Suppl.*, **99**, 125, 1979.
9. *T.Ch.Mouschovias*, *E.Paleologou*, *Astrophys. J.*, **230**, 204, 1979.
10. *F.Palla*, *S.W.Stahler*, *Astrophys. J.*, **360**, L47, 1990.
11. *Yu.V.Glagolevskij*, *Astrophys. Bull.*, **74**(1), 66, 2019.
12. *Yu.V.Glagolevskij*, *Astrophys. Bull.*, **76**(3), 66, 2021.
13. *Yu.V.Glagolevskij*, *A.F.Nazarenko*, *Astrophys. Bull.*, **72**(1), 450, 2017.
14. *D.Cohen et al.*, *Astrophys. J.*, **488**, 397, 1997.
15. *P.A.Robinson et al.*, *Astrophys. J.*, **575**, 435, 2002.
16. *D.Cohen et al.*, *Astrophys. J.*, **586**, 495, 2003.
17. *M.Smith et al.*, *Astrophys. J.*, **600**, 972, 2004.
18. *Yu.V.Glagolevskij*, *Astron. Lett.*, **50**(2), 148, 2024.
19. *Yu.V.Glagolevskij*, *Astrophys. Bull.*, **77**(2), 166, 2022.
20. *Yu.V.Glagolevskij*, *Astrophysics*, **57**(3), 315, 2014.
21. *N.S.Schulz*, *From Dust to Stars*, Chichester, 2004, Chapter 5.4.
22. *F.Palla*, *S.W.Stahler*, *ASP Conf. Ser.*, 62, 1994, p.391.
23. *Yu.V.Glagolevskij*, *Astrophys. Bull.*, **66**(2), 144, 2011.
24. *Е.Паркер*, *Космические магнитные поля*, Москва, Мир, 1982.
25. *H.A.Abt*, *Astron. J.*, **70**, 277, 1961.
26. *H.A.Abt*, *Astrophys. J. Suppl.*, **11**, 429, 1965.
27. *I.I.Romanyuk et al.*, *Astrophys. Bull.*, **68**(3), 318, 2013.