

ОБЗОРЫ

ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИЯХ ЭВОЛЮЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СР-ЗВЕЗД. I

Ю.В. ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 29 ноября 2017

Принята к печати 20 июня 2018

В данной статье I критически рассмотрены важнейшие результаты исследований свойств магнитных полей химически peculiарных звезд, выполненные до 2000г. Проанализированы свойства магнитных полей с точки зрения их соответствия реликтовой гипотезе. Более поздние результаты будут обсуждены в статье II.

Ключевые слова: *магнитные звезды; эволюция звезд*

1. Введение. Приведенный обзор показывает, как по мере постепенно уточняющихся результатов исследований изменяется наше представление о природе магнитных звезд. Последние результаты позволяют построить предварительный сценарий происхождения и эволюции магнитных звезд на основе реликтовой гипотезы. В ранних работах использовались средне-квадратичные величины наблюдаемого магнитного поля $\langle B_e \rangle$, которые, вследствие зависимости их от угла наклона звезды i , приводят к большому рассеянию точек на искомым зависимостях и неуверенным результатам. В более поздних работах стало возможным использование средних поверхностных величин магнитного поля B_s 160 звезд, которые реально определяют физические условия на поверхности звезд. Ранние работы носили характер зондирования свойств магнитных звезд в разных направлениях с целью поиска каких-либо новых зависимостей, корреляций, проливающих свет на природу магнитных звезд. Недостаток ранних работ состоит также в том, что в них изучались отдельные свойства в отрыве от других, а ведь многие из них взаимосвязаны. Естественно, первые отрывочные, скудные данные не могли привести к успеху общего анализа. В материале, рассмотренном ниже, хорошо видно как менялся с течением времени интерес к разным проблемам физики магнитных звезд. В работе [1] мы сделали обзор работ, посвященных исследованиям поверхностных структур магнитных полей. В данном обзоре мы концентрируем внимание, в основном, на исследованиях физических свойств магнитных

полей. В данной работе мы пытались упорядочить полученные в течение длительного времени данные и изучить их взаимное влияние. Ниже мы пытаемся также собрать накопленные данные в единую систему, соответствующую принятой нами реликтовой гипотезе. Поэтому мы проанализировали далеко не все работы, посвященные изучению магнитных звезд. Основные результаты и утверждения в тексте распределены по годам. Результаты, принятые нами как наиболее вероятные, отмечены жирным шрифтом. В ряде случаев в тексте приводятся ссылки на обсуждения работ в этой статье, сделанных в разные годы, они заключены в круглые скобки.

2. Основные исследования свойств магнитных полей.

1945. Одним из фундаментальных принципов, заложенных в исследования магнитных звезд, является предположение Каулинга [2] о том, что вследствие высокой проводимости звездного вещества в огромных крупномасштабных магнитных структурах время омического затухания магнитного поля сравнимо с временем жизни звезды на Главной последовательности (ГП). Таким образом, магнитное поле может оказаться в магнитных звездах "реликтовым", медленно распадающимся остатком поля, существовавшего в межзвездном газе, из которого сформировалась звезда. В этом состоит основная идея формирования магнитных звезд. В течение многих лет происходила дискуссия о возможном происхождении магнитного поля звезд динамо механизмом. В работе [3] показано, что в противоположность реликтовому механизму динамо механизм не может объяснить большинство важнейших свойств магнитных звезд.

1951. Бэбкок [4] нашел реальное объяснение периодической переменности магнитного поля в звездах, вводя понятие **наклонного магнитного ротатора**, в котором ось магнитного диполя наклонена к оси вращения. Эта гипотеза подтверждена всем последующим опытом. Бэбкок высказывал также мнение, что по виду профилей спектральных линий магнитное поле не принадлежит одному пятну, как на Солнце, звезда намагничена целиком и структура поля имеет **дипольный характер**, хотя присутствие мелкомасштабной фракции возможно. Последующие наблюдения и исследования многократно подтвердили это предположение (см., обсуждение 1997).

1963. Глаголевский [5] исследовал непрерывные спектры магнитных звезд. Обнаружено, что в непрерывном спектре существует депрессия на $\lambda 5200 \text{ \AA}$, распределение энергии в непрерывном спектре, в том числе величина бальмеровского скачка, **авомальны**, и они изменяются с периодом вращения [6-8]. Обнаружено также несоответствие спектральной классификации температурной шкале. Вначале предполагалось, что обнаруженные особенности происходят вследствие подавления микротурбуленции магнитным полем, в результате

чего нарушается структура атмосферы. Это в свою очередь приводит к уменьшению величины бальмеровского скачка и изменению распределения энергии. Аномальность величины бальмеровского скачка подтверждена в [9].

При дальнейших исследованиях оказалось, что аномальное распределение энергии в непрерывном спектре магнитных звезд на самом деле происходит вследствие аномалий химсостава. В частности, эта проблема рассмотрена в [10], где показано, что распределение энергии в непрерывном спектре искажается вследствие увеличенного содержания металлов в верхних слоях атмосферы. Соответственно уменьшается роль основного поглощающего элемента - водорода, а также происходит блокировка излучения усиливающимися линиями поглощения, особенно в ультрафиолетовом участке спектра. Это приводит к изменению модели атмосферы и, соответственно, к изменению распределения энергии. Депрессия на $\lambda 5200 \text{ \AA}$, очевидно, происходит вследствие переналожения большого числа спектральных линий. Аномальность распределения энергии в непрерывном спектре магнитных звезд создает большие проблемы при определении фотометрических температур.

1965. Абт [11] исследовал спектрально-двойные системы среди Am-звезд. Обращается внимание на то, что экваториальные скорости вращения нормальных A-звезд неизменно велики (50-250 км/с), тогда как у Am-звезд они существенно меньше (0-100 км/с). Сделано заключение, что приливное взаимодействие в тесных парах, к которым относятся Am-звезды, приводит к малым вращательным скоростям. В то же время одиночные звезды или члены широких двойных имеют большие вращательные скорости. Первейшая проблема состоит в том, чтобы объяснить, почему быстро вращающиеся звезды имеют спектры, характеризующие нормальный химсостав, тогда как медленно вращающиеся звезды имеют аномальный химсостав. Абт делает заключение, что именно медленное вращение является критическим свойством, позволяющим появляться химическим аномалиям в Am-звездах.

В настоящее время достаточно твердо установлено, что медленное вращение магнитных и немагнитных химически пекулярных (CP) звезд создает условия, при которых нормальные и CP-звезды разделяются [3,12,13]. Предполагается, что при скорости вращения больше критической, возникает дифференциальное вращение (и другие нестабильности) родительских протозвездных облаков, закручивающее силовые линии в "невидимую" тороидальную форму. В медленных протозвездных ротаторах и звездах дифференциальное вращение не возникает. Наблюдаемое поле имеет полярный характер [4,14], которое описывается дипольной моделью с точностью, соответствующей точности измерений. Мультиполя высокого порядка тоже могут дать небольшой интегральный эффект [4,15], но преобладающий компонент - дипольный. Эти важнейшие заключения Бэбкока и Престона являются основой для создания

нашей методики моделирования магнитных полей СР-звезд [16].

1967. Престон [17,18] обнаружил преимущественный наклон β осей магнитного диполя к оси вращения среди магнитных звезд.

Это свойство имеет важнейшее теоретическое значение, потому что оно связано, как оказалось, с другим фундаментальным свойством магнитных звезд - процессом потери момента вращения родительских протозвездных магнитных облаков [3,19,20] (см., обсуждение 1970). Последние исследования распределения углов наклона были выполнены в работах [3,21] (~160 звезд). Из рис. 1а, б видно, что имеется избыток звезд, имеющих угол $\alpha \sim 0-20^\circ$ ($\alpha = 90^\circ - \beta$). Он объясняется тем, что эффективность торможения протозвездных намагниченных облаков больше тогда, когда угол наклона магнитного поля α к плоскости экватора маленький [19] (см., 1979). Углы α определены по моделям магнитных звезд. Первый график построен для маломассивных звезд (Si+SrCrEu)-группы (средняя масса $M = 2.6 M_\odot$), а второй для массивных

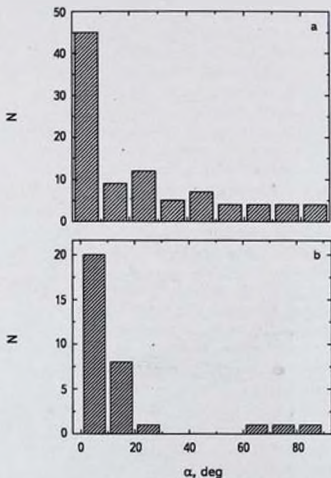


Рис.1. Распределение звезд по углам α . а) Si+SrCrEu-звезды, б) He-r+He-w-звезды.

объектов (He-r-He-w)-группы (средняя масса $M = 5.4 M_{\odot}$). Принципиально эти зависимости не отличаются от тех, которые получил Престон. Сравнение рисунков свидетельствует о едином механизме формирования рассматриваемых зависимостей у массивных и маломассивных звезд, хотя некоторые авторы ошибочно подозревают действие разных механизмов [22]. Небольшая разница в количестве звезд с большими углами α на рис. 1а и b может возникнуть из-за малого числа данных для звезд (He-r+He-w)-группы. Не исключена физическая причина небольшого различия, которая заключается в том, что в нестационарной фазе Хаяши у звезд (He-r+He-w)-группы (средний возраст $t = 4 \cdot 10^7$ лет) меньше искажаются глобальные магнитные структуры вследствие на порядок более короткого времени эволюции (средний возраст маломассивных звезд $t = 3 \cdot 10^8$ лет), (см., 1981).

1970. Ландстрит [23] исследовал структуры магнитного поля звезд при предположении наклонного к оси вращения на угол β центрального диполя и смещенного диполя. Получены данные, подтверждающие результат Престона [14] о преимущественной ориентации магнитных полей. Работа относится к пионерским, тогда еще примитивным подходам к исследованиям структур магнитных полей.

Более подробно разные структуры с разной ориентацией магнитных осей описаны в более поздних работах [1,24], посвященных результатам моделирования структур магнитных полей. Изучение ориентации магнитных структур имеет большое значение для объяснения начальных стадий эволюции. Оказалось, что процесс потери момента вращения магнитных протозвезд, отделения магнитных звезд от нормальных, а также объяснение 10% доли магнитных звезд вызваны единым механизмом, предложенным в [19] (см., 1967 и 1979). Исследование смещенных из центра диполей, исследованных Ландстритом, также как и исследование сложных структур с помощью моделирования, интересно для решения проблемы происхождения магнитных звезд. Они формируются из неравномерно намагниченных протозвездных облаков, в которых центр гравитации в облаке не связан с первоначальными структурами магнитного поля.

1971. Престон [14] на основании работы Стиббса [25] разработал простейший вариант модели наклонного ротора с диполем, находящимся в центре звезды. На ранних этапах разными авторами успешно было выполнено много работ с применением этой модели.

Более поздние работы показали, что магнитное поле центрального диполя наблюдается только у ~20% звезд, в остальных случаях структура поля описывается смещенным диполем или она является многодипольной. В работе [1] показано, что на основании результатов моделирования наблюдаемые магнитные структуры делятся на 4 типа: 1) магнитный диполь расположен в центре

звезды; 2) диполь смещен из центра вдоль оси диполя; 3) диполь смещен из центра поперек силовых линий и 4) сложные структуры, описываемые двумя или тремя диполями. В настоящее время мы пытаемся объяснить это многообразие сложной структурой протозвездных намагниченных родительских облаков. Нет признаков того, что сложные структуры магнитного поля могли формироваться в более поздние стадии эволюции (подробности далее).

1973. В работе Абта [26] исследована частота тесных двойных среди Ар-звезд. Оказалось, что среди Ам- и HgMn-звезд частота нормальная - 40%, но для Si- и SrCrEu-звезд очень низкая - 20%. Следовательно, у последних медленное вращение не может возникнуть вследствие приливных взаимодействий. Вследствие приливных взаимодействий теряют момент вращения не магнитные Ам- и HgMn-звезды. Это важный вывод, который показывает, что существуют, по крайней мере, два способа потери момента вращения прото-

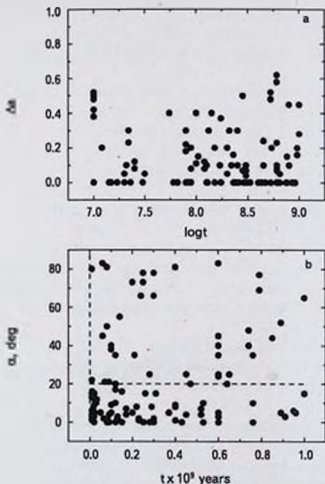


Рис.2. Распределения величин а) - ΔB и б) - α по возрастам.

звездных облаков: путь "магнитного" торможения [19,27] и путь приливных взаимодействий для не магнитных звезд [26].

1974. Мосс [28] рассматривает возможность возникновения меридиональной циркуляции Eddington-Sweet в магнитных звездах. Вследствие вмороженности магнитного поля в звездное вещество циркуляция неизбежно должна приводить к вековым искажениям первоначальных структур магнитных полей. Этот важнейший вывод необходимо учитывать при исследовании магнитных звезд.

В настоящее время ситуация в этом отношении несколько прояснилась. Из рис.1, рис.2 и табл.1 [3,29] можно сделать определенный вывод о неизменности структур магнитного поля в течение всего времени жизни звезд на ГП. На рис.2 величина Δa это среднее расстояние магнитного диполя от центра звезды в

Таблица 1

Структура	Возраст $\log t$ (min)	Возраст $\log t$ (max)
Центральный диполь	7.0	8.9
Смещенный диполь	7.0	9.0
Два диполя	7.0	8.9
Три диполя	6.0	8.4

единицах радиуса (для центрального диполя $\Delta a = 0$), α - угол между осью диполя и плоскостью экватора. Оба параметра характеризуют степень отклонения структуры поля от структуры идеального центрального магнитного диполя. Данные для обоих рисунков определены методом моделирования (см., 1997). Рис.1 построен для двух групп звезд, различных по массе и, главное, по возрасту [3], который различается между ними более чем на порядок. Тем

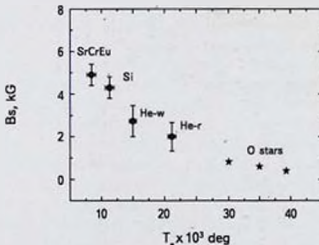


Рис.3. Средние величины магнитного поля B_s у звезд разных типов полярности. Звездочки - объекты типа O.

не менее, принципиальной разницы между ними нет. Из рис.2 и табл.1 также видно, что типичные структуры магнитного поля не меняются со временем, причем $\log t = 9.0$ является предельным возрастом магнитных звезд. Эти рисунки и данные таблицы показывают, что магнитные звезды имеют структуры магнитного поля, не изменяющиеся со временем, т.е. звезды вращаются твердотельно. Это свойство обычно предполагалось во всех работах, посвященных исследованиям магнитных ротаторов. Этот результат показывает, что внутри магнитных звезд нет крупномасштабных движений вещества (кроме конвективного ядра), которые вследствие вмерзновенности магнитного поля, неминуемо исказили бы первоначальные структуры. Например, меридиональная циркуляция, возникающая при быстром вращении звезды, может загонять магнитное поле вглубь [30], после чего оно может стать "невидимым".

1975. Ландстрит и др. [31] пришли к выводу, что: 1) быстрые магнитные ротаторы обладают меньшим полем, чем медленные, 2) Найдена обратная корреляция между скоростью вращения и величиной поля.

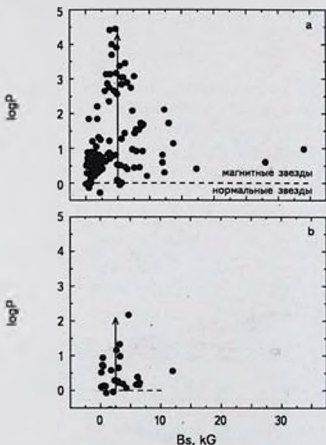


Рис.4. Распределение периодов вращения $\log P$ с разными величинами среднего поверхностного магнитного поля B_s . а) Si+SrCrEu-объекты, б) He-r+He-w-объекты.

Этот важный для теории магнитных звезд результат (см., 1981a) не раз будет обсуждаться далее. Первая зависимость хорошо видна на рис.3 и рис.4 [21], из которой видно, что медленные ротаторы (Si+SrCrEu)-группы имеют кивое больше поле, чем быстрые ротаторы (He-r+He-w)-группы (некоторые авторы, напр., [32] высказывают противоположную точку зрения). Более слабое поле у быстрых ротаторов объясняется их большим радиусом и малым возрастом (см., 1988a).

В работе [21] показано, что массивные быстро вращающиеся звезды (He-r+He-w)-типа имеют в среднем магнитное поле $B_s = 2.5 \text{ кГ}$, а маломассивные медленные ротаторы (Si+SrCrEu)-типа имеют поле $B_s = 5 \text{ кГ}$ (см., рис.4). Средний период вращения $P = 2$ дня у (He-r+He-w)-звезд и 16 дней у (SrCrEu)-звезд. В работе [21] мы предположили, что различие периодов вращения P в этих двух группах происходит под действием следующих факторов: 1) родительские протозвездные облака Si- и SrCrEu-звезд тормозятся сильнее вследствие меньшей массы (рис.5a, b, c); 2) торможение маломассивных облаков происходит сильнее вследствие, в среднем, более сильного магнитного поля; 3) степень торможения зависит от длительности периода торможения, которая у маломассивных протозвезд на порядок больше. Таким образом, зависимость включает в себя несколько факторов. Массивные звезды имеют более слабое поле, вероятно, вследствие в основном их большего радиуса и более короткого времени жизни, за которое релаксация запутанного в фазе Хаяши поля, произошла в меньшей степени (см., 1988). Относительно второй зависимости необходимо сделать следующее замечание. Следует обратить внимание на то, что пропорциональность $\log P(B_s)$, предполагаемая этими авторами, внутри группы маломассивных звезд (рис.4a, b) существует только до $B_s = 5 \text{ кГ}$, после чего она нарушается, а для массивных звезд пропорциональность доходит до $B_s = 2.5 \text{ кГ}$. При величинах поля, превышающих эти максимумы, степень потери момента вращения протозвездных облаков уменьшается. Создается впечатление, что в случае полей, превышающих максимум эффективности, процесс торможения протозвездного облака становится слабее. Вероятно расчет потери момента вращения протозвездных магнитных облаков, сделанный в [19], требует усовершенствования.

1977a. Хартут [33] использовал 25 звезд в разных скоплениях с целью поиска потери момента вращения на ГП. Вследствие большого разброса точек на исследуемой зависимости, можно было сделать только предварительный вывод - потеря момента вращения магнитных звезд произошла до ГП. Впоследствии этот вывод подтвердился [34,35]. Это был важный результат, потому что ряд исследователей пытались найти признаки потери момента вращения именно на ГП, хотя условий для этого там нет.

1977b. Местел и Мосс [30] теоретически исследовали стационарные модели

осесимметричных однородно вращающихся звезд с полоидальным магнитным полем и устойчивой самосогласованной термически движимой циркуляцией.

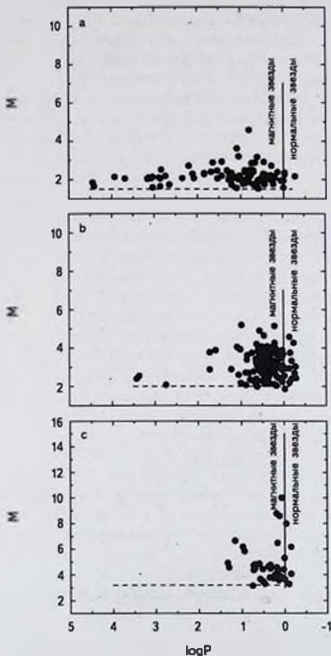


Рис.5. Зависимость периодов вращения $\log P$ от массы звезды. а)- SrCrEu-звезды, б) Si-звезды, в) He-g+He-w-звезды. Сплошная линия отделяет магнитные звезды от нормальных, штриховая линия - нижняя граница по массе.

Обсудим их выводы:

1) Утверждение о том, что внутри магнитных звезд существует крупномасштабная циркуляция неверно [3], как мы уже видели раньше при обсуждении статьи [28] (см., 1974). Мы показали, что магнитные звезды вращаются твердотельно (кроме конвективного ядра).

2) Авторы предлагают возможное объяснение тому, почему быстро вращающиеся нормальные А-звезды не обладают заметными магнитными полями. Оно заключается в том, что меридиональная циркуляция, возникающая при быстром вращении звезды, загоняет магнитное поле вглубь. Эта гипотеза является альтернативой обсуждаемому нами в настоящей работе предположению, заключающемуся в том, что при быстром вращении протозвездных облаков, в них возникает дифференциальное вращение, запутывающее магнитное поле в невидимую торондальную форму [3,12,13]. Это тот механизм, который разделяет нормальные и магнитные звезды на границе $P=1^d$ (рис.5) [21]. Совокупность наших последних результатов (см., статью II) показывает, что разделение нормальных и магнитных звезд, скорее всего, происходит еще до нестационарной фазы эволюции Хаяши, где о меридиональной циркуляции речи не может быть [3,24].

3) Авторы пытались решить, являются ли магнитные поля А-звезд реликтовыми, или формируемыми динамо. Приводятся доводы в пользу гипотезы реликтового поля. Современные данные о свойствах магнитных звезд однозначно соответствуют реликтовому механизму [3].

1977г. В теоретическом исследовании Мосс [36] рассмотрел возможности формирования меридиональной циркуляции в магнитных звездах, у которых $\alpha = 0^\circ$.

Замечания, сделанные к работам Местеля и Мосса (см., 1974, 1977b), показывают, что нет оснований исследовать возможности возникновения меридиональной циркуляции в магнитных звездах, которые вращаются твердотельно в течение всей жизни на ГП, как это видно из рис.1, 2 и табл.1. В работе [3] показано, что типичные сложные структуры с $\alpha = 0^\circ$ наблюдаются как у молодых, так и старых звезд (рис.2), различающихся по возрасту на два порядка, т.е. крупномасштабные магнитные структуры не меняются со временем, что доказывает отсутствие движений вещества внутри магнитных звезд.

1979. В работе [19] показано, что магнитное торможение протозвездных облаков в случае $j \perp B$ может изменить угловой момент протозвездного облака, по крайней мере, на несколько порядков величины за время меньше чем 10^4 лет. Это время уменьшается, если сжатие продолжается. Эффективность магнитного торможения много выше в случае $j \perp B$, чем когда $j \parallel B$. Протозвездные облака до фазы Хаяши имеют плотность меньше, чем 10^4 , при таких условиях торможение эффективнее, чем в условиях молодых звезд.

Следовательно, если звезды формируются при коллапсе и фрагментации межзвездных облаков, то должен существовать механизм, который может унести угловой момент эффективно из коллапсирующего фрагмента вещества в сторону окружающего вещества [37]. Таким образом, замороженное магнитное поле может затормозить вращение протозвездного облака переносом углового момента наружу и закручиванием силовых линий.

Рассматриваемая работа [19] является одной из основ теории происхождения и эволюции магнитных звезд, развиваемой нами в [20]. Этот механизм естественно объясняет: 1) малые скорости вращения магнитных звезд, 2) преимущественную ориентацию магнитных силовых линий и 3) малую долю (10%) магнитных звезд среди нормальных объектов. Что касается немагнитных звезд типа Am , HgMn , λ Boo и др., то их малые скорости вращения могут возникать при взаимодействии с тесным компонентом [26], либо они изначально имели малые скорости вращения. Эффективность торможения сложным образом зависит от величины магнитного поля (см., 1975). Она пропорциональна величине поля до некоторого момента, после которого она начинает уменьшаться (рис. 4а, б). Рассеяние точек несколько увеличивается за счет влияния зависимости $B_s(R/R_z)$, показанной на рис. 6а, б [12,38] (R - это радиус звезды, а R_z - ее радиус на ZAMS). Наблюдения показывают также, что степень торможения обратно пропорциональна массе звезды (рис. 5а, б, с), соответственно и протозвездного облака, и пропорциональна длительности его эволюции (рис. 7 [3]), которую мы принимаем пропорциональной возрасту звезды.

1981а. Попытки найти признаки затухания магнитного поля на ГП были сделаны в [32] и [37]. Затухание магнитного поля может возникнуть путем омической диссипации, а также в случае наличия крупномасштабных движений вещества внутри меридиональной циркуляции, дифференциального вращения и других неустойчивостей. К сожалению, использовано слишком малое число звезд с известными $\langle Be \rangle$ (всего 13) из разных скоплений и ассоциаций. Сделан вывод о возможном распаде реликтового поля со временем, но очевидно, что результаты, полученные с таким бедным материалом, нельзя считать надежными. Вывод сделан на основании того, что молодые массивные звезды имеют в 3 раза более сильное поле, чем маломассивные старые.

На самом деле массивные звезды имеют поле вдвое слабее, чем маломассивные (рис. 3 и 4), это мы уже обсуждали выше (см., 1975). В настоящее время твердо установлено, что вблизи ZAMS (Zero Age Main Sequence) после фазы HAcBe (AcBe Хербига) происходит быстрое увеличение среднего поверхностного магнитного поля B_s (рис. 6а, б, 160 звезд), и только потом поле уменьшается после достижения максимальной величины в результате, в основном, эволюционного роста радиуса [12,38] (см., 1988, 1998б). Наблюдательные факты, представленные выше (см., 1974), показывают признаки

отсутствия крупномасштабных движений вещества в магнитных звездах, которые могли бы разрушать магнитное поле за период жизни на ГП. Для массивных звезд зависимость отличается от зависимости для маломассивных звезд вследствие вдвое меньшей величины поля (рис.6) [12,38]. Для учета этого свойства рис.6, построенный по данным всех типов пекулярности, величины магнитного поля звезд (He-g+He-w)-типов увеличены в два раза.

1981b. В работе Вольф [39] исследуются возможности потери момента вращения магнитных звезд магнитного поля на ГП с участием магнитного поля, что является чрезвычайно важной проблемой в теории магнитных звезд. Торможение рассматривалось либо через аккреционный механизм, либо посредством потери массы в присутствии магнитного поля. Взаимодействие

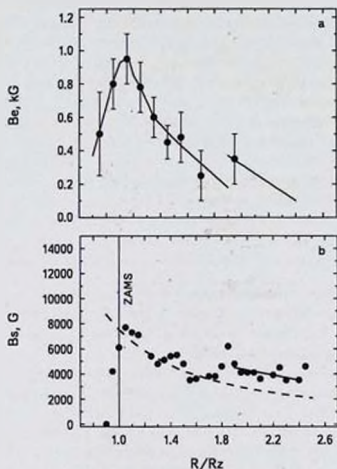


Рис.6. Изменение магнитного поля при эволюционном движении магнитных звезд поперек полосы ГП. а) Среднеквадратические величины магнитного поля B_e , б) средние поверхностные величины магнитного поля B_s , в) изменение среднего поверхностного магнитного поля B_z без влияния увеличения радиуса, д) изменение параметра Z_0 , чувствительного к степени химических аномалий.

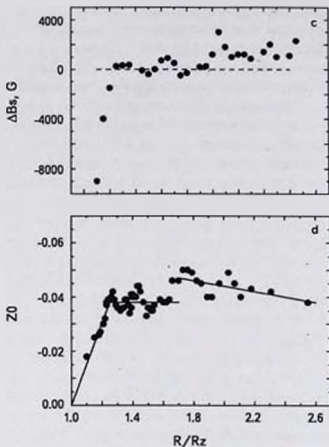


Рис.6. Окончание.

магнитного поля с межзвездным веществом должно изменять скорость вращения на фактор $\sim 1/e$ на ГП. Путем исследования 38 звезд было найдено, что среди SrCrEu (14 звезд) и Si-звезд (24 звезд) последние следуют этому закону, но корреляция в случае SrCrEu-звезд слаба.

Опыт дальнейших исследований показал, что использование столь малого числа данных не позволяет относиться к этому результату серьезно. Обратимся к последним данным. В [13] найдено, что наклон зависимости $\log P(R/R_z)$ для SrCrEu-звезд оказывается незначительным, т.е. на ГП потеря момента вращения не происходит (угловой коэффициент равен 0.9σ $R=0.1$). Магнитные звезды имеют малые скорости вращения уже на ZAMS, а не в конце жизни на ГП. В [33-35,40] тоже приводятся данные о том, что торможение происходит в период эволюции до ГП. В исследованиях, проведенных в [13,41] приводятся доводы о том, что в период эволюции молодых HAcBe звезд торможение тоже не могло возникнуть, потому что у них нет достаточно сильных магнитных

полей (см., 1987b). Следовательно, потеря момента вращения могла произойти только в фазе гравитационного коллапса (см., 1979, 1987b). Кроме того, в [19,42,43] отмечается тот факт, что в фазе эволюции молодых лучистых звезд концентрация частиц $>10^4$, поэтому их магнитное торможение становится не эффективным по сравнению со стадией гравитационного коллапса (см., 1979). Это важный вывод, потому что существует ряд работ, в которых рассматривается возможность потери момента вращения в более поздних фазах эволюции. Например, в [35] рассматриваются другие возможные механизмы потери момента вращения звезд, но все они требуют наличия сильного поля и достаточно плотной окружающей оболочки, условия, не достаточно выполнимые. Приведенные результаты не подтверждают предположения Вольф [39] о потере момента вращения магнитными звездами на ГП.

Внутри каждой группы пекулярности средняя величина периода вращения равна $P = 2^d$ для (He-r+He-w)-звезд, $2^{d.14}$ для (Si)-звезд, $5^{d.13}$ для (Si+)-звезд и $P = 16^{d.2}$ для (SrCrEu)-звезд. Зависимость $\log(\log P)$ резко растет (рис.7) со средним возрастом (использованы данные для 290 звезд). Эта зависимость показывает, что степень потери момента вращения протозвездного облака пропорциональна времени торможения (которое мы предполагаем пропорциональному возрасту звезды) и обратно пропорциональна массе звезд (рис.5a, b, c). В дополнение к этому в [3] показано, что степень потери момента вращения протозвездного облака пропорциональна величине поля сложным образом (рис.4a, b). Как сказано выше, рассеяние точек на рис.4a, b несколько увеличивается вследствие зависимости $B_s(R/R_z)$, показанной на рис.6a, b [12,38] (R - это радиус звезды, а R_z - ее радиус на ZAMS). Сказанное не противоречит гипотезе потери момента вращения магнитного протозвездного

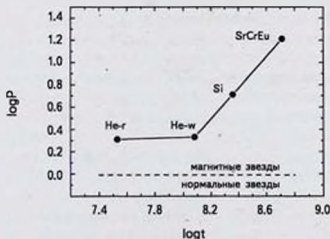


Рис.7. Зависимость средних величин периода вращения магнитных звезд разного типа пекулярности от их среднего возраста.

облака в фазе гравитационного коллапса и убеждает в реальности предположения о формировании основных свойств магнитных звезд в этот период эволюции. В [19] показано, что наиболее вероятным механизмом потери момента вращения протозвездных облаков является процесс передачи углового момента из коллапсирующего объема вещества к окружающей материи в присутствии магнитного поля. При этом эффективность торможения облака много сильнее в случае ориентации магнитного поля параллельно плоскости вращения. Такое избирательное торможение приводит к известному избытку звезд с магнитным полем, параллельным плоскости вращения звезд (рис. 1а, б), а вследствие малой доли звезд с благоприятной ориентацией магнитного поля возникает известный 10% эффект [3]. Таким образом, обсуждаемая гипотеза объясняет одновременно несколько основных свойств магнитных звезд.

1984а. Норт [44] утверждает, что: 1) магнитные звезды теряют момент вращения до ГП, либо они являются изначально медленными ротаторами. Старые Si-звезды имеют совершенно такие же периоды вращения, как и молодые, поэтому очевидно, что на ГП торможения нет; 2) замечена антикорреляция между скоростью вращения и магнитным полем. В настоящее время не найдены механизмы для эффективного торможения звезд, а наблюдаемая антикорреляция может быть связана с другими свойствами.

Таким образом, подтвердился такой же вывод, сделанный ранее в [33].

Антикорреляция была замечена также в работах [45-47]. Действительная связь между величиной магнитного поля и периодом вращения лучше всего видна на зависимостях, показанных на рис. 4а для маломассивных звезд (SrCrEu) и рис. 4б для массивных звезд (He-r+He-w) [3]. Стрелки показывают направление максимального торможения. Максимальная эффективность торможения у звезд первой группы приходится на $B_s = 5 \text{ кГ}$, а у второй на $B_s = 2.5 \text{ кГ}$. Кроме того видно, что степень торможения у массивных звезд меньше. Зависимость степени торможения от величины магнитного поля сложная - до максимума она растет с увеличением поля, после максимума она уменьшается. Ввиду сложной зависимости между величиной поля и скоростью вращения многие авторы не смогли прийти к определенному результату. Очевидно, что теорию потери момента вращения магнитной протозвезды, предложенную в [19], следует усовершенствовать. Что касается механизмов потери момента вращения, то мы придерживаемся варианта, предложенного в [19]. Этот механизм мы обсуждаем в этой статье неоднократно (см., 1967, 1970, 1973, 1979, 1981) ввиду крайней важности его в эволюции магнитных звезд.

1984б. Норт и Крамер [40] пытались найти признаки уменьшения магнитного поля с возрастом на ГП, с использованием величин магнитного поля, определенным фотометрическим методом. Сделано заключение, что магнитное поле Si- и SrCrEu-звезд уменьшается при уменьшении $\log$, причем

поле изменяется пропорционально R^2 . Это вывод, в общем, совпадающий с выводом в [32,37].

Первое замечание состоит в том, что фотометрические оценки магнитного поля пропорциональны измеренным величинам только до $B_1 = 3-5$ кГ [29], что приводит к значительному рассеянию точек на зависимостях и их искажению. Второе замечание - фотометрические оценки поля нельзя определить для He-г и He-w-звезд, поэтому зависимости относятся только к маломассивным звездам. Последующие исследования показали более сложное поведение магнитного поля на ГП, как это видно на рис.6а, б [12,38,48] (см., 1998b). На самом деле поле быстро растет вблизи ZAMS, достигает максимума на $R/R_z = 1-1.1$ и только после этого начинает уменьшаться в результате, в основном, эволюционного увеличения радиуса. Уменьшение магнитного поля происходит пропорционально R^2 (см., 1988) [12,38,48].

1985. Глаголевский [49,50] сделал попытку найти зависимость величины среднего поверхностного магнитного поля от периода вращения, как это пытались сделать и другие исследователи. Предполагалось, что если поле генерировалось динамо, то его величина B должна быть пропорциональной скорости вращения Ω . Если поле реликтовое, то связи между ними не может быть. Найдено, что максимальное поле наблюдается у звезд с периодом $P = 10$ дней и оно падает в сторону малых и больших величин P . Однако последние данные [3,21] показывают, что на самом деле зависимость $B_s(\log P)$ в чистом виде не имеет смысла, так как она включает разные составляющие: 1) родительские протозвездные облака SrCrEu-звезд тормозятся сильнее и имеют максимальные величины $\log P$ вследствие меньшей массы, по сравнению с массивными (рис.4 и рис.5); 2) маломассивные протозвездные облака (как и SrCrEu-звезды) имеют в среднем более сильное поле, чем массивные (рис.3); 3) степень торможения зависит от длительности периода торможения (пропорциональной возрасту), которая у маломассивных протозвезд на порядок больше, чем у массивных (рис.7) (см., 1975, 1984а).

1986. Уменьшение магнитного поля с возрастом вследствие омической диссипации предполагалось найти в [51,52] с использованием данных о $\langle \text{Be} \rangle$ и возрастов звезд разных скоплений. Отмечается большое рассеяние точек на искомым зависимостях, затрудняющее выявление эффекта. Признаки омической диссипации не найдены, но обнаружены признаки падения поля при эволюционном движении поперек ГП, как и в [32,37,44]. На самом деле эта зависимость сложная, это видно из рис.6а, б [12,38,48]. Поверхностное поле растет вблизи ZAMS, достигая максимума, и только после этого начинает уменьшаться вследствие, в основном, эволюционного увеличения радиуса (см., 1981а, 1984b и 1985).

1987а. В [53] рассмотрено влияние меридиональной циркуляции на перво-

начальное распределение магнитного поля.

Наше замечание об отсутствии меридиональной циркуляции в магнитных звездах такое же, что и к предыдущим работам Мосса (см., 1974 и 1977).

1987b. Свойства магнитных звезд статистически исследованы в работе [54]. Получены следующие основные результаты:

1) Отмечено, что величина периода вращения магнитных звезд P пропорциональна их возрасту t .

Действительно, эта зависимость хорошо видна на рис.7. Быстро эволюционирующие звезды с гелиевыми аномалиями существенно меньше отличаются от нормальных звезд по величине периодов вращения, чем долго эволюционирующие звезды SrCrEu-типа. Граница между магнитными и нормальными звездами приходится на $\log P = 0$. Но надо учесть, что степень торможения зависит не только от длительности эволюции, но также сложным образом от величины поля, как это видно из рис.4a, b и от массы (рис.5) (см., 1985).

2) В работе приводятся доводы в пользу мнения о твердотельности вращения магнитных звезд. Если бы они вращались дифференциально, то вследствие вмерзновенности магнитного поля наблюдалась бы существенная перестройка его конфигурации со временем и его быстрое разрушение [55], (см., 1974) чего на самом деле нет. Из обсуждения (1974) и из рис.1a, b, рис.2a, b и табл.1 видно, что структуры магнитных полей совершенно стабильны в течение всей жизни звезд.

3) Обсуждается мнение, что следует отказаться от гипотезы генерации магнитного поля в конвективном ядре, потому что последующий его вынос путем диффузии происходит за 10^4 лет, в соответствии с мнением Паркера [56]. Это время много больше возраста значительной части магнитных звезд. Таким образом, поддерживается мнение о реликтовой природе магнитных звезд.

1988. В [12] продолжено статистическое исследование магнитных звезд с использованием достаточно большого количества данных (238 звезд) о величинах $\langle Be \rangle$ [50]. Получены следующие результаты:

1) Зависимость $\langle Be \rangle (\log t)$, построенная по всем типам звезд, показала, что магнитное поле с возрастом на ГП не меняется. Однако позднее, на основании исследования средних поверхностных величин магнитного поля B_s , стало ясно, что поле меняется на ГП на самом деле сложным образом, как это видно из рис.6a, b [12,38,48,57] (см., 1998b). При достижении магнитных HAcBe звезд начала ГП (ZAMS) величина магнитного поля оказывается всего несколько десятков, иногда сотен, гаусс. Уже ранние результаты исследований [12] показали (рис.6a), что намечается начальный рост поля после ZAMS, который достигает максимума после 20-30% (см. далее) времени их жизни на ГП. Впоследствии этот факт подтвердился на основании использования данных по B_s для 160

звезд (рис.5б) в работах [13,38,41,58,67] (см., 1998b). После преодоления максимума магнитное поле на поверхности уменьшается пропорционально R^{-1} . Очевидно, что уменьшение происходит потому, что радиус звезд увеличивается в 2-2.5 раза с момента ZAMS до момента их прихода к верхней границе ГП. Делается определенный вывод, что магнитное поле уменьшается вследствие эволюционного увеличения радиуса. Такой темп может происходить только при условии, что структура магнитного поля дипольная и имеет место сохранение полного магнитного потока с возрастом. Если из зависимости рис.6б исключить влияние квадратического изменения магнитного поля за счет роста радиуса, то получится зависимость, представленная на рис.6с. Эта зависимость показывает, как изменялось бы магнитное поле, если бы радиус оставался постоянным. Она происходит вследствие эволюционного изменения радиуса и омического затухания структур разного размера. Пока присутствуют мелкие структуры, поле изменяется быстро. По мере их исчезновения рост поля замедляется, потому что скорость омического затухания пропорциональна l^2 , где l - характерный размер намагниченного объема. Если бы структура магнитного поля соответствовала теоретическому диполю, находящемуся в центре звезды, то при увеличении радиуса звезды поле уменьшалось в кубической степени, а не в квадратической. Но звезд с центральным диполем только 17-20%, остальные имеют сложную конфигурацию. Этим объясняется квадратическое падение магнитного поля. Зависимость рис.6с тоже уменьшает показатель степени R . На рис.6б хорошо заметен скачек величины B_s на $R/R_z = 1.9$. Это тот момент, когда эволюционный трек испытывает петлю. Рост радиуса на время прекращается, и даже уменьшается, но поле продолжает расти в соответствии с зависимостью рис.6с, формируя скачек. После возобновления эволюционного движения поле продолжает изменяться пропорционально R^{-1} .

Из рис.3, взятого из работы [38], можно было бы заподозрить наличие пропорциональности B_s от возраста, потому что долгоживущие маломассивные звезды (Si+SrCrEu)-типа имеют поле в два раза больше, чем массивные (He-r+He-w). Однако за счет чего магнитное поле маломассивных звезд может вырасти столь сильно, если нет генерации поля? Поэтому надо искать причину слабого поля массивных звезд. Учитывая то, что отношение средних радиусов звезд этих двух типов равно 1.5 получаем, что отношение величин магнитного поля должно быть порядка 2, что и наблюдается. Кроме того, вследствие малого возраста крупномасштабное магнитное поле (He-r+He-w)-звезд не успело сформироваться в той же степени, как у маломассивных звезд, в соответствии с рис.6с.

На рис.6д показан ход параметра многоцветной фотометрии $Z_0(R/R_z)$, который пропорционален интенсивности депрессии $\lambda 5200 \text{ \AA}$. Соответственно, интенсивность депрессии пропорциональна степени химических аномалий.

Хорошо заметно подобие зависимостей b и d , подтверждающая связь химических аномалий с магнитным полем. Подробное обсуждение этих зависимостей будет дано в статье II.

2) В рассматриваемой работе высказано утверждение, что падение поля из-за омической диссипации не заметно. Действительно, максимальный возраст магнитных звезд $t = 10^9$ лет (рис.2), а теоретическое время омического распада магнитного поля у звезд с массами $M > 2M_{\odot}$, равно $t = 10^{10} - 10^{11}$ лет, что на один-два порядка больше времени жизни магнитных звезд. Фактически при теоретических исследованиях можно принять, что у всех магнитных звезд полный поток магнитного поля с возрастом остается постоянным.

3) Сравнение периодов вращения нормальных и магнитных звезд показывает, что периоды массивных магнитных звезд отличаются от нормальных звезд с той же температурой на порядок меньше, чем периоды маломассивных (рис.4, рис.7). Учитывая сказанное выше (1987b) можно предположить, что это происходит потому, что торможение массивных протозвезд произошло в меньшей степени вследствие меньшего времени замедления, из-за их большой массы и вдвое меньшей величины поля [3].

4) Высказано мнение, что плюсов в пользу магнитного динамо больше, чем в пользу реликтового поля. На такой вывод большое влияние оказывало существовавшее раньше мнение, что в нестационарной фазе Хаяши конвекция полностью разрушает поле. Однако после работ Ларсона [59] и Палла и Сталера [60] ситуация изменилась. Оказалось, среди звезд с $M > 2M_{\odot}$ нестационарность в фазе Хаяши может быть весьма слабой. Подробный анализ, проведенный в [3], убедительно показывает невозможность работы динамо в магнитных звездах. В первую очередь это связано с тем, что магнитные звезды вращаются твердотельно, а для работы динамо механизма требуется дифференциальное вращение. Динамо не объясняет сложные наблюдаемые структуры магнитных полей, не объясняет, почему только 10% звезд имеют магнитное поле, непонятно как генерируется поле у многих не вращающихся магнитных звезд и т.д. В то же время большое количество фактов подтверждают мнение, что структуры магнитных полей проходят через нестационарную фазу без особых изменений [3]. На рис.1а, б хорошо видна преимущественная ориентация углов наклона магнитного поля, которая не нарушилась после испытания в нестационарной фазе. В случае нарушения структур магнитного поля, значительная часть малых углов стала бы большой. Кроме того известно, что около 17-20% магнитных звезд имеют конфигурации магнитного поля центрального диполя. В случае нарушения структур в нестационарной фазе Хаяши таких звезд не осталось бы.

1989. Мосс [61] теоретически рассмотрел динамо и реликтовые механизмы возникновения магнитных звезд. Гипотеза динамо в конвективном ядре имеет

трудности, связанные с невозможностью переноса поля к поверхности за время жизни на ГП, особенно для молодых звезд. То же самое утверждает Паркер [56].

Теоретически исследовались структуры реликтового поля, имеющего жгутоподобный вид. Модели, рассчитанные для "одно-жгутовой" модели показывают распределение магнитного поля по поверхности, подобное модели для смещенного диполя.

1990. Дудоров и Тутуков [42] придерживаются того мнения, что звезды с $M > 2M_{\odot}$, не конвективные и в них могут существовать реликтовые магнитные поля. Авторы исходят из утверждения, что интенсивность реликтового поля в протозвездном облаке и звезде пропорциональна плотности. Далее авторы предполагают, что во внутренних областях звезды магнитная энергия сравнима с тепловой энергией, а это должно приводить к неустойчивости.

Наше замечание к этим двум утверждениям состоит в том, что в таком случае все магнитные звезды имели бы структуры магнитного поля диполя, находящегося в центре звезды. Однако таких звезд наберется только порядка 17-20%, поэтому приходится предполагать, что магнитное поле в родительских протозвездных облаках чаще не пропорционально плотности. Относительно второго замечания наши результаты моделирования [3] показывают, что магнитные звезды стабильны по всему объему в течение всего времени жизни на ГП и они вращаются твердотельно (кроме конвективного ядра) [54].

Авторы утверждают необходимость интенсификации реликтового магнитного поля путем мощной ионизации от потока космических лучей или жесткого ультрафиолета от близких О- и В- звезд в период формирования магнитной звезды. Такие источники для большинства звезд не очевидны, как и не очевидна необходимость интенсификации магнитного поля. В настоящее время эту проблему следует пересмотреть, опираясь на последние данные.

1994. Глаголевский в [29] развивает важную для теории магнитных звезд задачу зависимости степени химических аномалий от величины магнитного поля, которую обнаружили Крамер и Медер [62]. Наличие такой зависимости было найдено также для бальмеровских скачков, интенсивности депрессии $\lambda 5200$ и степени пекулярности P . Найдено, что прямая зависимость от величины магнитного поля существует только до $B_s \sim 3$ кГ, потом степень химических аномалий остается постоянной. Сделан вывод, что при больших полях полностью подавляется микротурбулентия в верхних слоях атмосфер и диффузия химических элементов усиливается. В работе также показано, что меридиональная циркуляция в магнитных звездах отсутствует. Это видно из постоянства угла α со временем. Рис.1а, б, рис.2а, б и табл.1 подтверждают этот вывод.

1997. Герт и Глаголевский [16] разработали методику моделирования

структур магнитного поля звезд при предположении его дипольного характера [4,14] (подробнее об этом будет сказано в следующей статье).

1998а. Норт [34] утверждает, что период вращения Si- звезд на ГП не изменяется со временем, и что потеря момента вращения произошла до ГП. Этот вывод совпадает с выводом в работе [33]. Кроме того он подтвержден нами в [63], где тоже показано, что период вращения на ГП не изменяется при эволюционном движении звезд поперек полосы ГП. Угол наклона линейной регрессии зависимости $\log P(R/R_z)$ равен 0.9σ ($R=0.1$). Такой же вывод, сделанный относительно молодых звезд HAcBe (см. 1979), привел к твердому решению, что потеря момента вращения магнитных звезд произошла в фазе гравитационного коллапса магнитных протозвезд.

1998b. Глаголевский и Чунтонов [41] исследовали изменение поля на ZAMS с использованием величин $\langle B_e \rangle$. Подтвердился результат [12], что магнитное поле после ZAMS растет, достигает максимума и затем начинает падать (рис.6а, б) [12,38,48]. Окончательное подтверждение существования этой зависимости получено в [58] уже с использованием надежных величин B_s для 160 звезд. На рис.6б показана зависимость $B_s(R/R_z)$, где точки получены усреднением величин B_s в узких диапазонах R/R_z . Подробное описание этой зависимости дано в обсуждении (1988г.).

1998с. Серия работ Глаголевского и Чунтонова [13,41,64], посвящена поиску сильных магнитных полей у молодых звезд HAcBe. Оказалось, что нет среди звезд этого типа объектов с сильными магнитными полями. Этот результат имеет фундаментальное значение для теории эволюции магнитных звезд, потому что он показывает, что молодые звезды HAcBe не могли потерять момент вращения с участием магнитного поля и что торможение могло произойти только в период гравитационного коллапса до нестационарной фазы Хаяши. Результат подтвержден в серии работ [13,41,65-74].

3. *Заключение.* На основании данных, приведенных в этой работе, можно сделать следующее предположение о формировании магнитных звезд из намагниченных протозвездных облаков (см., 1945, 1977б, 1981б, 1987б, 1989):

1) Потеря момента вращения наиболее вероятна на стадии гравитационного коллапса намагниченных облаков, потому что в отличие от молодых звезд их плотность $<10^4$ (см., 1979, 1981б, 1987б).

2) Потеря момента вращения намагниченных протозвездных облаков легко объясняется теорией Mouschovias & Paleologou (1979), (см. также 1965, 1977б, 1979, 1981б).

3) Только механизм Mouschovias & Paleologou (1979) естественно объясняет преимущественную ориентацию магнитных полей $\alpha = 0-20^\circ$ (1967, 1970, 1979, 1981б).

4) Только механизм Mouschovias&Paleologou (1979) естественно объясняет 10% долю магнитных звезд (1981b).

5) Потеря момента вращения в ранних фазах эволюции естественно объясняет малую долю тесных двойных среди магнитных звезд (1965, 1977b).

6) Потеря момента вращения до нестационарной фазы Хаяши естественно объясняет разделение магнитных и нормальных звезд (1965, 1977b).

7) Потеря момента вращения в фазе HAcBe невозможна вследствие слабого дипольного магнитного поля (1981b, 1998c).

8) Потеря момента вращения звезд на ГП не поддерживается наблюдательными данными (1977a, 1981b, 1984a, 1998a).

9) Сложные структуры магнитного поля естественно объясняются сложными структурами родительских протозвезд. Нет механизмов, которые могли бы создать наблюдаемые структуры в нестационарной фазе Хаяши и в период HAcBe-звезд (1970, 1971, 1988).

10) Если представленные данные верны, то можно сделать вывод, что в нестационарной фазе Хаяши не происходит существенное искажение крупномасштабных магнитных конфигураций (1974, 1987b, 1988).

11) Молодые звезды HAcBe содержат двухкомпонентную структуру магнитного поля - крупномасштабную и мелкомасштабную. Последняя возникла в нестационарной фазе Хаяши (1988).

12) На ГП магнитное поле изменяется вследствие двух процессов - увеличения крупномасштабной дипольной составляющей за счет омической диссипации мелкомасштабной составляющей и уменьшения за счет эволюционного увеличения радиуса (1984b, 1988, 1998b).

13) Одним из важнейших свойств магнитных звезд является твердость вращения (1974, 1977, 1987, 1990, 1994).

Другие результаты исследований, поддерживающие приведенные утверждения, будут даны в статье II.

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

PROGRESS IN STUDIES OF THE EVOLUTION OF THE MAGNETIC FIELDS OF CP STARS. I

Yu.V. GLAGOLEVSKIY

In this article I the most important results of studies of the properties of magnetic fields of chemically peculiar stars performed before 2000 are critically examined. The properties of magnetic stars have been analyzed from the point of view of their correspondence to the relic hypothesis. Later results are discussed in article II.

Key words: *magnetic CP stars: stellar evolution*

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu.V. Glagolevskij, *Astrophys. Bull.*, **66**, 144, 2011.
2. T.G. Cowling, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **105**, 166, 1945.
3. Yu.V. Glagolevskij, *Astrophys. Bull.*, **72**, 305, 2017.
4. H.W. Babcock, *Astron. J.*, **56**, 116, 1951.
5. Yu.V. Glagolevskij, *Izvestiya of Kazakhstan AS, Phys.-mat. Ser.*, **16**, 43, 1963.
6. Yu.V. Glagolevskij, *Vestnik of Kazakhstan AS*, **239**, 45, 1965.
7. Yu.V. Glagolevskij, *Astron. Zh.*, **10**, 56, 1966.
8. Yu.V. Glagolevskij, *Astron. Zh.*, **43**, 1194, 1966.
9. B. Hauck, *IAU Coll. No.32*, 365, 1975.
10. Yu.V. Glagolevskij, G.P. Topil'skaya, *Bull. SAO.*, **25**, 11, 1991.
11. H.A. Abt, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **77**, 367, 1965.
12. Yu.V. Glagolevskij, *Magnetic stars*, Leningrad, Nauka, 1988, p.206.
13. Yu.V. Glagolevskij, G.A. Chountanov, *Bull. SAO.*, **51**, 88, 2001.
14. G. Preston, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **83**, 571, 1971.
15. O. Kochukhav, S. Bagnulo, G. Wade et al., *Astron. Astrophys.*, **414**, 613, 2004.
16. E. Gerth, Yu.V. Glagolevskij, *Bull. SAO.*, **56**, 25, 2003.
17. G.W. Preston, *Astrophys. J.*, **150**, 547, 1967.
18. G.W. Preston, *The Magnetic and Related stars*, Ed. By R. Cameron, (Mono Book Corp., Baltimore, 1967), p.3.
19. T. Ch. Mouschovias, E. V. Paleologou, *Astrophys. J.*, **230**, 204, 1979.
20. Ю.В. Глаголевский, *Астрофизика*, **57**, 337, 2014, (*Astrophysics*, **57**, 315, 2014).
21. Ю.В. Глаголевский, *Астрофизика*, **59**, 359, 2016, (*Astrophysics*, **59**, 321, 2014).

22. O.Kochukhov, S.Bagnulo, *Astron. Astrophys.*, **450**, 763, 2006.
23. J.D.Landstreet, *Astrophys. J.*, **159**, 1001, 1970.
24. Ю.В.Глазалецкий, *Астрофизика*, **58**, 377, 2015, (*Astrophysics*, **58**, 350, 2015).
25. D.W.N.Stibbs, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **110**, 395, 1950.
26. H.A.Abt, M.S.Snowden, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **25**, 137, 1973.
27. L.Mestel, L.Jr.Spitzer, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **116**, 503, 1956.
28. D.L.Mass, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **168**, 61, 1974.
29. Yu.V.Glagolevskij, *Astron. Zh.*, **71**, 858, 1994.
30. L.Mestel, D.Mass, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **178**, 27, 1977.
31. J.D.Landstreet, E.F.Borra, I.R.D.Angel et al., *Astrophys. J.*, **201**, 624, 1975.
32. E.F.Borra, *Astrophys. J. Letters*, **249**, L39, 1981.
33. M.R.Hartoog, *Astrophys. J.*, **212**, 723, 1977.
34. P.North, *Astron. Astrophys.*, **334**, 181, 1998.
35. Ю.В.Глазалецкий, *Астрофизика*, **48**, 207, 2005, (*Astrophysics*, **48**, 194, 2005).
36. D.Mass, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **182**, 747, 1977.
37. D.N.Brown, J.D.Landstreet, I.Thompson, *Upper Main Sequence CP-stars*, 23-d Liege *Astrophys. Coll.*, Universite de Liege, 1981, p.195.
38. Ю.В.Глазалецкий, *Астрофизика*, **59**, 182, 2016, (*Astrophysics*, **59**, 164, 2016).
39. S.C.Wolff, *Astrophys. J.*, **244**, 221, 1981.
40. P.North, N.Cramer, *Astron. Astrophys.*, *Suppl. Ser.*, **58**, 387, 1984.
41. Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chountanov, *Bull. SAO*, **45**, 105, 1998.
42. A.E.Dudorov, A.V.Tutukov, *Astron. Zh.*, **67**, 342, 1990.
43. B.Larson, *Protostars and Planets*, Chapter I, Tucson, Arizona (1980).
44. P.North, *Astron. Astrophys.*, **141**, 328, 1984.
45. E.F.Borra, J.D.Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.*, **42**, 421, 1980.
46. B.Hauck, P.North, *Astron. Astrophys.*, **114**, 23, 1982.
47. P.Didelon, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **55**, 69, 1984.
48. Ю.В.Глазалецкий, *Астрофизика*, **56**, 189, 2013, (*Astrophysics*, **56**, 173, 2013).
49. Ю.В.Глазалецкий, *Астрофизика*, **22**, 323, 1985, (*Astrophysics*, **22**, 545, 1985).
50. Yu.V.Glagolevskij et al., *Izv. SAO.*, **23**, 37, 1986.
51. Yu.V.Glagolevskij, V.G.Klochkova, I.M.Kopylov, *IAU Coll. No.90*, 1986, p.32.
52. Yu.V.Glagolevskij, V.G.Klochkova, I.M.Kopylov, *Astron. Zh.*, **64**, 360, 1987.
53. D.Mass, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **226**, 297, 1987.
54. Yu.V.Glagolevskij, *Soobshcheniya SAO.*, **54**, 73, 1987.
55. K.H.Raedler, *Geophys. and Astrophys. Fluid dynamics*, **20**, 191, 1982.
56. E.Parker, *Cosmical magnetic fields*, Clarendon press, Oxford, 1979.
57. Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth, *ASP Conf. Ser.*, No305, p.225, 2003.
58. Ю.В.Глазалецкий, *Астрофизика*, **58**, 37, 2015, (*Astrophysics*, **58**, 29, 2015).
59. R.B.Larson, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **145**, 271, 1969.
60. F.Palla, S.WW.Stahler, *Astrophys. J.*, **418**, 414, 1993.
61. D.Mass, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **236**, 629, 1989.
62. N.Kramer, A.Maeder, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **41**, 111, 1980.
63. Ю.В.Глазалецкий, *Астрофизика*, **48**, 229, 2005, (*Astrophysics*, **48**, 194, 2005).

64. *Yu.V. Glagolevskij, G.A. Chountonov*, Stellar magnetic fields, Moscow, 1997, p.116.
65. *J.-F. Donati et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **291**, 658, 1997.
66. *S. Hubrig et al.*, Astron. Astrophys., **428**, L1, 2004.
67. *G. Wade et al.*, Astron. Astrophys., **442**, L31, 2005.
68. *S. Hubrig et al.*, Astron. Astrophys., **446**, 1089, 2006.
69. *C. Catala et al.*, Astron. Astrophys., **462**, 293, 2007.
70. *G. Wade et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **376**, 1145, 2007.
71. *S. Hubrig et al.*, Astron. Astrophys., **463**, 1039, 2007.
72. *S. Hubrig et al.*, Astron. Nachr., **331**, 361, 2010.
73. *S. Hubrig et al.*, Astron. Astrophys., **525**, L4, 2011.
74. *E. Alecian et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **429**, 1001, 2012.