

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ХИМИЧЕСКИ
ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

Ю.В. ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 20 апреля 2012

Принята к печати 22 июня 2012

Рассмотрены результаты моделирования магнитных полей 60 химически пекулярных звезд (СР). Применяемая методика моделирования основана на предположении о внутренней структуре магнитных полей подобной теоретическому магнитному диполю. Структура магнитных полей у большинства звезд не симметрична относительно центра звезды. Сделано предположение, что с точки зрения реликтового механизма наблюдаемые конфигурации поля являются остатками протозвездных сложных структур, которые с течением времени вследствие неустойчивости стремятся к простой геометрии в форме дипольных структур. Обсуждаются трудности гипотезы тороидально-полоидальных внутренних структур магнитных полей СР-звезд. На примере звезды HD 21699 показано, что распределение химических аномалий тесно связано с распределением магнитного поля. Подтверждено, что химические аномалии возникают вследствие диффузии химических элементов в стабильной атмосфере под действием гравитации, лучевого давления и ветра.

Ключевые слова: *звезды:пекулярные:магнитное поле*

1. *Введение.* В этой работе мы продолжаем большую программу исследования структур магнитных полей химически пекулярных (СР) звезд с целью выяснения основных свойств и параметров крупномасштабных магнитных конфигураций. Эти данные интересны для выяснения природы магнитных СР-звезд и особенностей их эволюции. Предварительные результаты статистических исследований около 50 звезд обсуждались в работах [1-3]. Ценность наших исследований структур магнитных полей состоит в том, что они выполняются единой методикой. С учетом данной работы число изученных объектов приближается к 60.

Наиболее популярной гипотезой возникновения магнитных звезд в настоящее время считается реликтовая. Наблюдаемые сейчас поля являются остатками протозвездных намагниченных облаков, из которых эти звезды сформировались. В однородном магнитном поле звезд заряженные частицы осуществляют движения по винтовой линии с осью, параллельной силовой линии. В каждой точке силовой линии можно определить вектор магнитного поля, а сложение всех векторов дает один общий вектор, описываемый одним гипотетическим магнитным диполем (наподобие доменов в железных магнитах), создающим на поверхности соответствующее распределение магнитного поля. На этом основана наша методика моделирования. Некоторые

авторы [4] считают, что поверхность магнитной звезды, кроме глобальной, имеет тонкую слабую структуру (если это подтвердится) магнитного поля (это допускал и Бэбкок), которую обычная зеемановская методика не чувствует. Важность исследования глобальных структур состоит в том, что они являются остатками первоначального реликтового поля, тогда как мелкие неоднородности давно исчезли вследствие неустойчивости. Мелкомасштабные неоднородности, которые наблюдаются сейчас, без сомнения молодые, возможно, вследствие влияния конвективного ядра.

2. *Основные типы магнитных структур.* Наша методика в отличие от других, основанных на предположении дипольных структур, предполагает возможность любого положения и ориентации магнитного диполя внутри звезды. Глобальные структуры выявляются путем исследования фазовых зависимостей продольного магнитного поля $B_e(\Phi)$ или среднего поверхностного поля $B_s(\Phi)$ и изучаются нами путем моделирования при предположении диполя с магнитными зарядами $\pm q$, расположенными на расстоянии l между собой [5]. Программа расчета позволяет выбирать любое положение диполей (и зарядов) и любую ориентацию диполей внутри звезды путем задания координат каждого заряда по долготе $\lambda(q_1)$ и широте $\delta(q_2)$ и расстояния их от центра звезды $r(q_1)$ и $r(q_2)$. Поверхность звезды разбивается на N элементов меридианами и параллелями и в каждом из них вычисляется вектор магнитного поля от магнитного диполя. Сумма векторов на видимой полусфере, с учетом потемнения к краю и площади элемента, дает среднее поверхностное магнитное поле B_s , которое на практике измеряется по полному расщеплению спектральных линий в неполяризованном спектре. Сумма векторов, направленных в сторону наблюдателя, дает среднее продольное магнитное поле B_e , которое измеряется по зеемановским спектрам. Изменяя последовательно угол поворота видимой полусферы на необходимый угол, можно получить вычисленные фазовые зависимости $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$. Методом последовательных приближений, меняя параметры, можно добиться совпадения вычисленной и наблюдаемой фазовой зависимости до получения минимальной величины суммы квадратов отклонений наблюдаемых величин от вычисленных. Практически во всех случаях отклонения находятся в пределах ошибок измерений, что подтверждает правильность получаемых приближений. В частности, для модели центрального диполя параметры практически совпадают с параметрами, получаемыми методом Стиббса-Престона [6], разработанным для диполя в центре звезды. Это обстоятельство является независимой проверкой правильности обоих методов. Наша программа позволяет также получать меркаторскую карту распределения магнитного поля по поверхности, величины магнитного поля в полюсах, координаты полюсов, а также глобусы в любой фазе периода вращения, что необходимо для исследования распределения химических элементов по поверхности на фоне распределения

магнитного поля. Следует особо отметить, что измеренные (и вычисленные) величины B_e и B_s являются средними по видимой полусфере, поэтому получаемые данные характеризуют только глобальные структуры магнитного поля и нет возможности исследовать детально каждую точку поверхности. У большинства звезд форма фазовой зависимости определяется положением диполя внутри звезды, а амплитуда зависит от магнитного момента. Итак, наша методика позволяет получить модельные фазовые зависимости $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$, величины поля в полюсах $\pm B_p$, угол наклона оси диполя к оси вращения β , координаты магнитных монополей λ и δ , координаты магнитных полюсов, угол наклона звезды к лучу зрения i , расстояние между монополями l и расстояние монополя от центра звезды Δa .

Опыт моделирования большого числа звезд показывает, что характер распределения магнитного поля по поверхности можно описать, кроме известных центрального и смещенного вдоль оси диполей [7], некоторыми другими основными приближениями [8,9]:

- 1) диполь в центре звезды;
- 2) диполь смещен вдоль оси;
- 3) диполь смещен поперек оси;
- 4) сложная структура, описываемая двумя или тремя диполями, смещенными поперек оси.

Таблица 1

ДОЛЯ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД РАЗНЫХ ТИПОВ

	Структура поля	Доля звезд
1	Центральный диполь	16%
2	Смещенный диполь вдоль оси	34%
3	Смещенный диполь поперек оси	12%
4	Сложные конфигурации	11%
5	Неизвестная структура (ц.диполь?)	27%

В табл.1 показано какова доля магнитных звезд каждого типа в нашей выборке из 60 объектов. Интересно, что 3-я и 4-я модели приводят к хорошему согласию с измерениями только в том случае, если расстояние между монополями l принимается величиной порядка долей радиуса, т.е. на самом деле мы имеем дело с не "точечным" диполем (см. далее раздел 4), а с диполем, похожим на стержневой магнит [10]. В этих случаях положение монополей определяется сингулярными точками, в которых сходятся (фокусируются) силовые линии, а положение диполя определяется точкой на половине расстояния между монополями. В отличие от 3 и 4 случаев, в моделях 1 и 2 величина l слабо влияет на форму фазовой зависимости, поэтому нет возможности величину l точно определить. Основываясь на результатах исследования моделей 3 и 4 можно предположить, что в реальных

звездах области максимальной напряженности поля, по-видимому, относительно обширны, они имеют размеры порядка долей радиуса звезды.

В моделях 1 типа (центральный диполь) элементарные магнитные векторы p_i образуют симметричную относительно оси диполя структуру, поэтому суммарный диполь с полным вектором магнитного поля P находится в центре звезды. Максимальная напряженность поля и максимальная плотность совпадают с центром.

В модели 2 типа (смещенный вдоль оси диполь) возникает асимметрия направлений векторов вдоль оси. Поэтому ось диполя тоже проходит через центр звезды, но сам диполь смещен вдоль оси. Возникает вопрос, где максимальная напряженность поля, в центре звезды или в месте предполагаемого диполя. Модель предсказывает единственный вариант - в месте диполя. Особенно интересны звезды 4 группы, потому что в них содержатся два диполя, и, соответственно, две области с максимальной напряженностью поля. Важно заметить, что эти диполи имеют поля с противоположным направлением. Так что проблема организации магнитных структур существенно увеличивается.

Таким образом, мы рассмотрели структуру магнитного поля "намагниченных" звезд, у которых форма силовых линий дипольного типа, т.е. они сгущаются в центральной части. Если бы магнитные силовые линии сходились как у идеального магнитного диполя в объеме атомных размеров, то напряженность магнитного поля там была бы чрезвычайно высокая. Реально, в случае больших I поле внутри звезды вряд ли превышает сотен тысяч Гс.

Другая точка зрения на внутреннюю структуру магнитного поля состоит в том, что дипольная конфигурация неустойчива. Ее сторонники утверждают, что начальная структура с течением времени неминуемо должна организоваться в тороидально-полоидальную [11,12] и только такая конфигурация устойчива. При некоторых начальных условиях такой механизм может создавать поле на поверхности подобное модели центрального или смещенного диполей. К сожалению, расчеты делались без учета влияния конвективного ядра и для не вращающейся звезды. Этот механизм также не объясняет преимущественную ортогональную ($\beta = 90^\circ$) ориентацию магнитных осей к оси вращения [8], а также не объясняет конфигурацию с двумя диполями, которые реально наблюдаются. Факт ортогональности осей у более половины звезд показывает, что тороид обязательно должен быть направлен у них по меридиану, что непонятно.

Пока еще не разработана методика моделирования при предположении тороидально-полоидальной структуры и неизвестно каково было бы распределение поля на поверхности звезды в случае наличия между поверхностью и конвективным ядром магнитного тороида и какова была бы форма фазовой зависимости $V_e(\Phi)$ при этом.

Рассмотрим подробнее ориентацию диполей. Распределение углов β

изучалось нами и другими авторами [13-15]. Больше половины звезд имеют углы наклона осей диполей к оси вращения близкие к 90° , т.е. магнитные диполи находятся в плоскости экватора вращения. Остальные распределены по углам равномерно. Это одно из замечательных свойств магнитных звезд, которое нельзя не учитывать, и очевидно, что оно как-то связано с вращением. С другой стороны, нет зависимости величины β от скорости вращения. Не исключено, что по величине β звезды делятся на две группы: с большими углами и с $\beta \sim 20^\circ - 30^\circ$. Это свойство впервые было замечено Престоном [6]. Очевидно также, что ортогональность осей диполей не является результатом действия меридиональной циркуляции [16], потому что нет различия между распределениями углов β у звезд разных возрастов $\log t$. Поскольку звезды SrCrEu типа на два порядка старше звезд He-r, то в случае влияния медленной циркуляции распределения у них различались бы. Построение линейной регрессии показывает отсутствие зависимости $\beta(t)$:

$$\beta = (72.25 \pm 41.27) - (0.79 \pm 5.32) \cdot \log t .$$

Следовательно, ориентация диполей внутри звезды не изменяется под действием предполагаемой меридиональной циркуляции. Вероятно, циркуляция подавляется магнитным полем так же, как турбуленция.

3. Образцы точных моделей. Как уже говорилось выше, каждой точке внутри звезды соответствует свой вектор магнитного поля, а сложение всех векторов дает один общий вектор, описываемый одним предполагаемым магнитным диполем. Можно предположить, что в теле звезды направления отдельных участков силовых линий могут отличаться от тех, которые были бы при идеальном дипольном источнике. Отличия от "идеальности" должны приводить к нарушению фазовой зависимости. Одним из способов проверки применимости методики моделирования является исследование фазовой зависимости $Ve(\Phi)$ для какой либо звезды, полученной с высокой точностью.

Одна из работ, в которых измерения магнитного поля сделаны очень точно LSD методом это [17]. По данным этой работы мы промоделировали звезду HD 62140 [18]. Наилучшие результаты получены при предположении модели смещенного диполя на $\Delta a = -0.045 R_s$. Наблюдаемая фазовая зависимость $Ve(\Phi)$ показана на рис.1a точками, модельная проведена сплошной линией. На рис.1b показаны отклонения измеренных величин магнитного поля от модельных. Штриховыми линиями показаны границы, равные средней ошибке измерений $\sigma = \pm 50$ Гс (3% от максимальной величины поля). Из рассмотрения рисунков делаем вывод, что в пределах ошибок модель хорошо описывает наблюдаемую фазовую зависимость.

Другой пример касается звезды HD 71866 [19]. Наблюдаемая фазовая зависимость лучше всего описывается моделью смещенного на $\Delta a = 0.05 R_s$ поперек оси диполя. Фазовая зависимость показана на рис.2a (точки - наблюдения). На рис.2b показаны отклонения ΔVe наблюдаемых величин

V_e от модельных, из которых видно, что они преимущественно меньше ошибки $\sigma = \pm 83$ Гс (что составляет 4% от максимальной амплитуды). Снова делаем вывод, что применяемая нами дипольная модель практически идеально описывает распределение направления силовых линий и величины магнитного поля по поверхности обеих звезд. Вывод о смещении диполей из центра

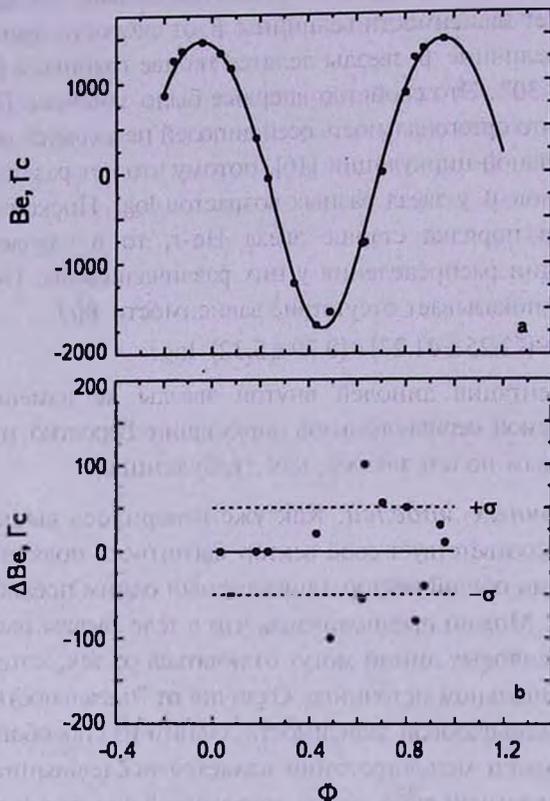


Рис.1. Модель магнитного поля звезды HD 62140. а - фазовая зависимость $V_e(\Phi)$, б - отклонение измеренных величин от модельных.

звезд показывает, что распределение поля по поверхности не симметрично относительно центра. Полученные результаты, наряду с многими другими, позволяют считать, что имеются все основания относиться серьезно к применяемой нами "дипольной" модели, при которой имеет место сгущение силовых линий вблизи центра звезды, что не противоречит предположению о формировании звезд из протозвездных облаков, при котором напряженность поля будет пропорциональна плотности вещества. Несимметричность структур не противоречит предположению, что протозвезды формировались из облаков с неоднородным магнитным полем и не противоречит предположению о возможном влиянии аккреции крупных масс. Дипольная конфигурация

противоречит обсуждаемому в литературе предположению о существовании сильных градиентов магнитного поля на поверхности.

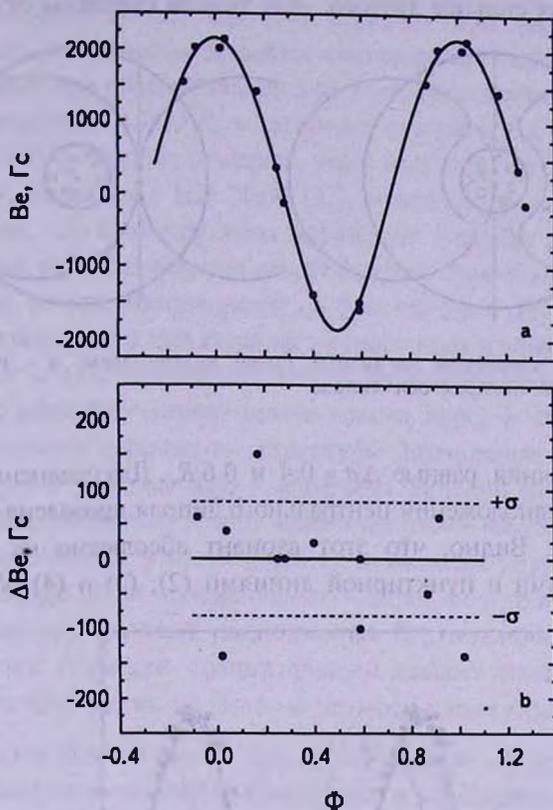


Рис.2. Модель магнитного поля звезды HD 71866. Обозначения как на рис.1.

4. *Замечания об особенностях структур магнитного поля внутри звезд.* Сильные отклонения от "дипольной структуры" следует ожидать вблизи центра звезды вследствие влияния конвективного ядра. На рис.3 показана возможная схема силовых линий, обходящих конвективное ядро в случае модели центрального (а) и смещенного (б) поперек оси диполя.

В области конвективного ядра, если плотность энергии поля $H_0^2 \gg 4\pi\mu$ (μ - плотность массы, u - средняя массовая скорость газа, ρu - плотность количества движения [20]), то поле подавляет турбулентцию. Если $H_0^2 \ll 4\pi\mu$, то влияние поля пренебрежимо. Но в конвективном ядре поле, по-видимому, не может подавить турбулентцию вследствие очень высокой плотности. Возможно, оно несколько уменьшает его диаметр. В таком случае силовые линии должны обходить ядро.

Рассмотрим структуру поля внутри звезды HD 32633 [21]. Наблюдаемая зависимость представлена на рис.4а точками, модельная - сплошной жирной

линией. Наблюдаемая фазовая зависимость хорошо описывается только моделью с двумя противоположно расположенными от центра диполями, причем один из них сильнее другого. Эти диполи смещены от центра на

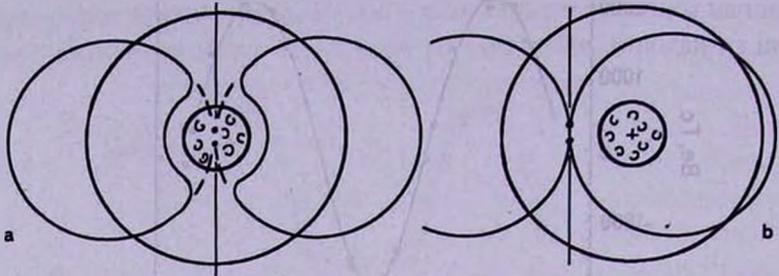


Рис.3. Возможные структуры магнитных полей внутри звезд. а - центральный диполь, б - смещенный поперек оси диполь.

значительные расстояния, равные $\Delta a \approx 0.4$ и $0.6 R_s$. Для сравнения фазовая зависимость при предположении центрального диполя проведена сплошной тонкой линией (1). Видно, что этот вариант абсолютно не подходит. Тонкими штриховыми и пунктирной линиями (2), (3) и (4) обозначены

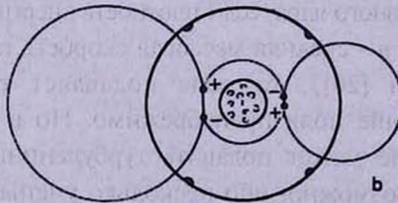
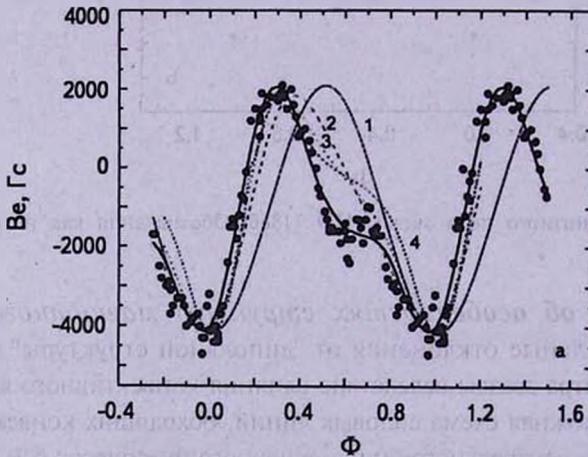


Рис.4. а - Модель магнитного поля звезды HD 32633. 1-4 смещение диполя поперек оси на величину $\Delta a = 0, 0.1, 0.2$ и $0.3 R_s$. Сплошная жирная линия - модель двух смещенных поперек осей диполей. б - схема расположения диполей внутри HD 32633.

фазовые зависимости при предположении "точечных" диполей (l порядка размеров круговых токов), смещенных от центра звезды на $\Delta a = 0.1, 0.2$ и $0.3 R$. Хорошо видно, что этот вариант тоже не может объяснить наблюдаемую зависимость. Хорошее совпадение с наблюдениями можно получить только при предположении двух диполей и значительного расстояния между монополями $l = 0.17 R$, у "сильного" диполя и $l = 0.04 R$, у "слабого" диполя HD 32633. Следует отметить, что у всех звезд со смещением диполя поперек оси, например у HD 21699 [22], величина l тоже значительна. Это говорит о том, что в центре звезд магнитные силовые линии сходятся не в одной точке, как предполагает теоретический "точечный" диполь, а в двух сингулярных точках, находящихся на расстоянии l друг от друга. Таким образом, мы видим, что структура магнитного поля в центре звезды немного отличается от идеального диполя. Одной из причин может быть то, что на внутреннюю структуру влияет конвективное ядро, и силовые линии его обходят, искажая "дипольную" структуру. Возможные схемы структуры магнитного поля в случае двух смещенных диполей показаны на рис.4б. Важно отметить, что диполи имеют противоположное направление полярности.

Практика показала, что, несмотря на возможные нарушения дипольной структуры внутри звезд, применяемые модели в состоянии были описать все наблюдаемые фазовые зависимости без исключения. В будущем предполагается провести сравнительный анализ наших результатов с моделями, полученными из анализа четырех параметров Стокса.

5. О реликтовом поле Ар-звезд. Одной из основных проблем является неизвестный механизм, приводящий к наблюдаемым конфигурациям магнитных полей. Наиболее признанной гипотезой возникновения магнитных звезд в настоящее время считается реликтовая. Если предположить, что магнитное поле досталось от намагниченных протозвездных облаков, то следует учитывать, что в конвективной фазе Хаяши начальное поле могло разрушиться, но могло и генерироваться новое. Однако в [23,24] опубликована модель эволюции звезд до Главной последовательности (ГП), в которой звезды с массами $M > 2 M_{\odot}$ сжимаются как радиативные объекты, проходя вдоль почти горизонтальной части эволюционного трека и не испытывают конвективную фазу. Это обстоятельство коренным образом меняет ситуацию. Если эта модель верна, то она объясняет различия между звездами с $M < 2 M_{\odot}$, испытывающие крупномасштабную турбулентцию и последующее разрушение поля, и с $M > 2 M_{\odot}$, которые не испытали разрушения поля и могут сохранить их первоначальные поля. Наблюдаемые сейчас поля являются остатками протозвездных намагниченных облаков, из которых эти звезды сформировались. В пользу реликтового механизма служат трудности теории динамо:

1) Динамо не может работать потому, что у звезд в данном диапазоне температур и масс нет конвекции. У магнитных звезд наблюдается твердо-

тельное вращение, а для генерации поля необходимо наличие дифференциального вращения.

2) Некоторые авторы предполагают работу динамо в конвективном ядре, откуда поле всплывает затем наружу. Однако расчеты показывают, что поле из конвективного ядра не успевает выйти наружу за время жизни звезды на Главной последовательности [25-28].

3) Наблюдается большое разнообразие структур, которое не объясняется теорией динамо.

4) Зависимость $B \propto \Omega$, ожидаемая в случае динамо, не наблюдается. Ее отсутствие скорее соответствует реликтовому механизму [29].

С другой стороны, если будет найдена возможность быстрого всплывания магнитного поля, то гипотеза магнитного динамо в конвективном ядре может оказаться перспективной.

Таким образом, возникает ясная картина возможности сохранения реликтового магнитного поля и проблема скорее состоит не в том, как возникли магнитные звезды, а почему 90% звезд не сохранили его. Моделирование структур магнитного поля CP-звезд показывает, что в прошлом структуры, по-видимому, были сложными и их детальное исследование сможет прояснить условия формирования звезд, так как наблюдаемые сейчас сложные несимметричные структуры поля, очевидно, отражают начальные условия эволюции магнитных звезд. В начальных этапах поле формируется из намагниченных турбулентных протозвездных облаков, на звезде происходит мощная аккреция, вызывающая ударные волны и зоны неустойчивости, аккреция продолжается в период неустойчивой фазы Ae/Be Хербига вплоть до выхода звезды на ГП. Исследование этой проблемы важно не только для магнитных звезд, но и для понимания формирования и эволюции звезд вообще. До ГП структура магнитного поля неоднородная, запутанная, причем неоднородности неустойчивые, они исчезают за время, зависящее от их масштаба $t = 4\pi\sigma l^2$, где σ - проводимость, l - характерный размер области. Кроме того поле упрощается вследствие действия натяжения вдоль силовых линий (натяжение силовой трубки поперечного сечения A с силой $T = AB^2/4\pi$ [25]). Существуют другие типы неустойчивости. Оценки показывают, что вследствие омической диссипации магнитное поле звезд, с такими радиусами как у CP- звезд, время затухания поля $\tau \approx 10^{10}$ лет. Наши оценки по исследованию звезд, скоплениям и ассоциациям разного возраста дали оценку $\tau > 10^8$ лет [30], а в [31,32], получена величина $\tau \approx 10^9 - 10^{10}$ лет. В работе [33] приводятся данные о более коротких временах диссипации, но там не учтено уменьшение поля на поверхности вследствие эволюционного увеличения радиуса [29,34]. Очевидно, что конфигурации, которые мы в настоящее время наблюдаем, это остатки сложной былой структуры, которая возникла в начальных фазах эволюции, или после слияния с близким компонентом или с крупными аккреционными массами, и у

которых полная релаксация магнитного поля еще не завершилась. Сложность реликтовой гипотезы состоит в том, что неизвестно почему первоначально запутанное магнитное поле организуется именно в "дипольную" структуру, ориентированную вдоль экватора вращения.

Большой трудностью для реликтовой гипотезы является асимметрия магнитных структур. Магнитные силовые линии вморожены в вещество, особенно вблизи центральных областей звезды, где высока степень ионизации. Максимальная напряженность поля, несмотря на общее увеличение к центру, в случае смещенного диполя не совпадает точно с максимальной плотностью в центре звезды. Это непонятно ни с точки зрения простого сжатия намагниченных протозвездных облаков ни с точки зрения влияния конвективного ядра. Возможное объяснение состоит в том, что в момент формирования звезды магнитное поле было слишком неоднородным вследствие слияния крупных неоднородных по напряженности поля масс, а после релаксации магнитного поля максимальный вектор поля и максимальная напряженность могли оказаться и не в центре. В случае мелкомасштабных неоднородностей остаточный вектор поля может оказаться равным нулю, тогда образуется нормальная звезда. В последующих фазах эволюции в случае катастрофических событий типа слияния с тесным компонентом тоже могла возникнуть несимметричная конфигурация. Наблюдаемая ныне клочковатость [4] поверхностных магнитных полей может служить признаком воздействия аккреции в поздних фазах Ae/Be Хербига.

Некоторое количество звезд, имеющих симметричную конфигурацию типа центрального диполя, противоречит гипотезе захвата тесного компонента [35], так как после слияния звезда должна была испытать слишком большие деформации и сомнительно, что поле успело бы релаксироваться. Среди объектов с простой дипольной конфигурацией есть, в частности, быстро эволюционирующие горячие звезды такие как HD 3360 (He-г), звезды Ae/Be Хербига HD 200755 и V380 Ori [36], которые, очевидно, с момента рождения должны были иметь простые структуры и не испытывать дальнейших возмущений. Относительное число таких звезд составляет 17% [10], что слишком много с точки зрения гипотезы захвата намагниченного компонента [35].

Крупные неоднородности, которые мы сейчас наблюдаем, имеют время релаксации сравнимое с временем омического затухания поля всей звезды, равного $\sim 10^{10}$ лет. В табл.1 приведены данные о средней величине смещения диполя Δa для звезд разных типов пекулярности, которую можно принять как величину, характеризующую степень неоднородностей. Звезды He-г и He-w примерно на два порядка более молодые, чем звезды SrCrEu типа. У быстро эволюционирующих горячих звезд релаксация успела произойти в меньшей степени и можно ожидать у них большую степень

неоднородности. В табл.2 приведены данные, показывающие зависимость средней величины смещения диполя из центра звезды от возраста $\Delta a = (0.67 \pm 0.26) - (0.05 \pm 0.03) \cdot \log t$, (с учетом весов, равных числу звезд). Значимость ее невелика (угол наклона получился с ошибкой около 1.7σ), но полученная зависимость не противоречит предположению, что звезда со временем стремится к простой геометрии (к полю центрального диполя) и $\Delta a = 0$ наступит в возрасте $\sim 10^{13}$ лет, что близко по порядку оценкам времени омического затухания магнитного поля всей звезды. Эту зависимость следует изучить более тщательно.

Таблица 2

СРЕДНЕЕ СМЕЩЕНИЕ ДИПОЛЕЙ ИЗ ЦЕНТРА У ЗВЕЗД РАЗНОГО ВОЗРАСТА

Тип	SrCrEu	Si+	Si	He-w + He-r
Число звезд	21	7	7	16
Средний Δa	0.07 ± 0.04	0.13 ± 0.07	0.20 ± 0.10	0.15 ± 0.09
Средний возраст, лет	$2.5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^6$

В работе [37] показано, что доля CP-звезд, у которых магнитное поле сильное, уменьшается с ростом массы. Так, доля He-r звезд, у которых магнитное поле измерено определенно, составляет 40%, а доля SrCrEu уже равна 90%. Это может быть признаком того, что доля простых дипольных конфигураций увеличивается, и они легче обнаруживаются. Это свойство тоже не противоречит предположению о медленной релаксации первоначальных сложных магнитных структур. Интересно было бы получить дополнительные данные для подтверждения этого результата.

Интересно, что количество звезд со сдвигом в сторону положительного монополя и отрицательного одинаково, а количество смещений диполя вдоль оси такое же как смещение поперек + сложные конфигурации. Это свидетельствует о том, что деформации поля в разных направлениях равновероятны. Это важный фактор для теории формирования магнитных звезд. Не исключено, что конвективное ядро на ранних стадиях эволюции в момент формирования тоже участвует в процессе искажения магнитной конфигурации, оно "изгоняет" центральную часть магнитного поля несимметрично.

6. *Влияние магнитного поля на диффузию элементов, Звезды HD 21699 и HD 64740.* Исследование структуры магнитного поля в первую очередь необходимо для изучения природы магнитных звезд и распределения химических аномалий по поверхности. Многие опыты исследования распределения магнитного поля и химических аномалий по поверхности показали несомненную связь между ними. Звезда HD 21699

была одной из первых, у которых мы впервые заметили эффект смещенного поперек оси диполя [22]. У нее монополи смещены на $\Delta a = 0.4 R_*$, а расстояние между монополями $l = 0.1 R_*$. Меркаторская карта распределения магнитного поля и глобусы показаны на рис.5.

По спектрам, полученным на БТА, исследована структура атмосферы магнитной звезды HD 21699 в области магнитных полюсов и между ними, где обнаруживается экстремальное магнитное поле $B_p = 22000$ Гс и сильный градиент поля по поверхности и вглубь. На обратной стороне поле $B_s = 6000$ Гс.

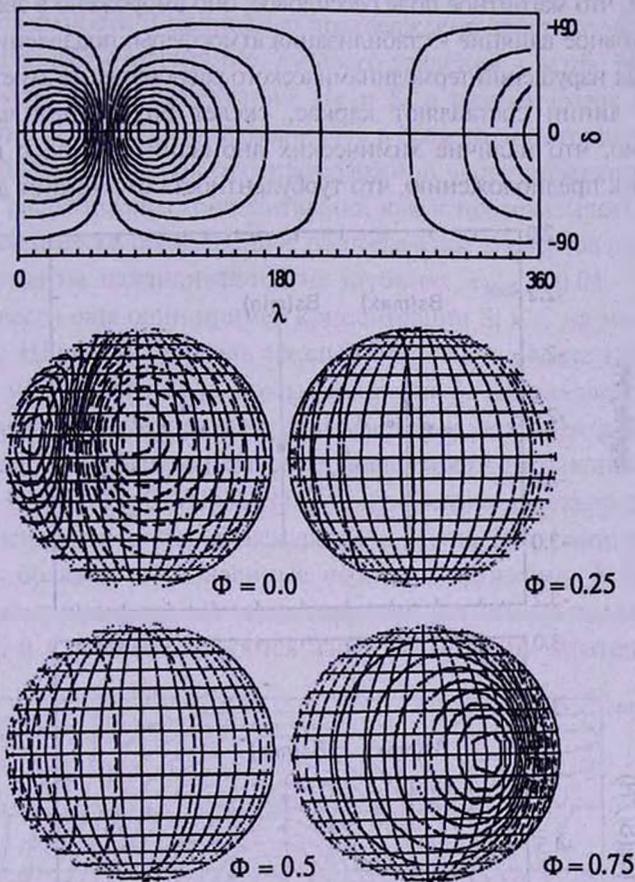


Рис.5. Распределение магнитного поля по поверхности HD 32633.

Сильная деформация магнитного поля может быть признаком того, что звезда недавно испытала катастрофическое воздействие, возможно слияние с близким компонентом [35]. Вопрос состоит в том, не сохранились ли в таких областях нестационарные явления и нарушение термодинамического равновесия. Кроме того, в области магнитных полюсов существует ветер,

который, возможно, искажает структуру атмосферы и приводит к неравномерному распределению химических элементов по глубине. Даже небольшие отклонения поля от потенциальности, должны приводить к нарушению распределения давления, температуры, плотности и др. Все эти эффекты, как можно предположить, способны привести к нестационарным процессам на поверхности HD 21699 вблизи магнитных полюсов. Однако анализ профилей линий водорода показал [39], что в пределах ошибок наблюдений структура в области магнитных полюсов нормальная. Это свидетельствует о том, что в атмосфере звезды отсутствуют нестационарные магнитогидродинамические процессы, что магнитное поле бессилое, оно вморожено в звездное вещество и его основное влияние - стабилизация атмосферы, подавление турбулентности. Локальных нарушений термодинамического равновесия не заметно. Магнитные силовые линии составляют каркас, скелет внутренней части CP-звезд. Интересно, что наличие химических аномалий у звезд с полем 20-50 Гс приводит к предположению, что турбулентность отсутствует даже при самых

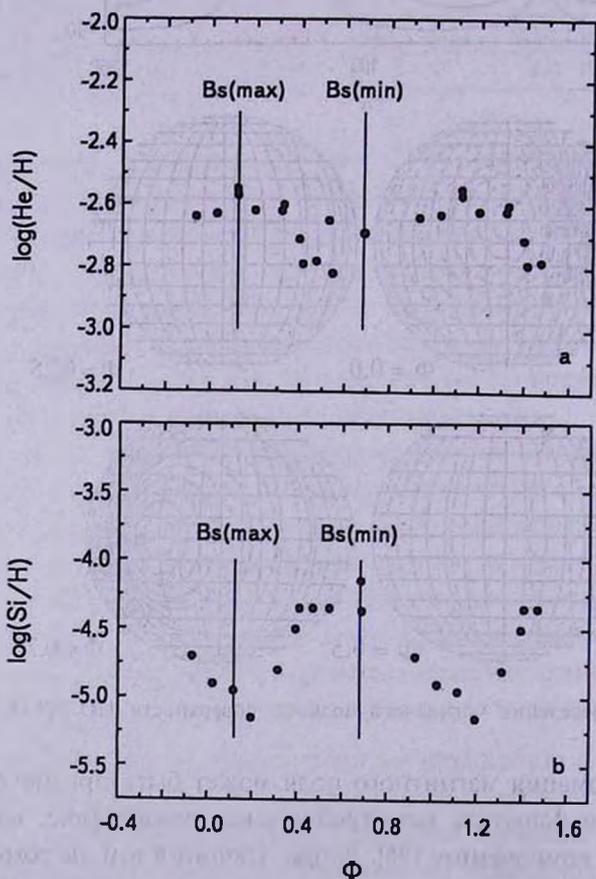


Рис.6. Распределение содержания He и Si по поверхности HD 32633. а - распределение He, б - распределение Si.

слабых полях. Граница пока не найдена.

Нами изучено распределение He и Si по поверхности у HD 21699. Поведение этих элементов по поверхности и вглубь рассчитано теоретически с учетом влияния магнитного поля [40-46]. Важно было проверить действие предложенного там механизма диффузии. Звезда HD 21699 удобна для подобного исследования потому, что на ее поверхности имеется область сильного магнитного поля с вертикально направленными силовыми линиями, а также широкая область с горизонтально направленными силовыми линиями - факторы, регулирующие диффузию элементов. В результате спектроскопического анализа [47] получены данные о распределении этих химических элементов по поверхности и полностью подтверждено действие механизма диффузии под влиянием гравитации, лучевого давления и ветра. На рис.6а и 6б показано изменение содержаний He и Si в разных фазах периода вращения. Заметно повышение содержания He в области магнитных полюсов и повышение содержания Si на противоположной части поверхности, где силовые линии расположены горизонтально, как и предсказывает теория. Кроме того, подтвердилось предсказанное распределение элементов по глубине [48,49]. Эти элементы накапливаются на глубинах $\tau_{5000} \sim 0.01 - 1$.

Можно привести еще один пример концентрации Si и C на магнитном экваторе звезды HD 64740. Модель звезды построена в работе [50], карта распределения магнитного поля показана на рис.7. Штриховой линией показана параллель, которая проходит при вращении через центр видимого диска. В работе [51] приведены фазовые зависимости интенсивности "а" линий SiIV(1394+1403 Å) и CIV(1548+1555 Å), измеренные фотоэлектрически. Максимум интенсивности линий происходит тогда, когда через центр видимого диска проходят области, обозначенные черными кружками. Минимумы случаются в момент прохождения через меридиан магнитных полюсов. Это означает, что Si и C концентрируются вдоль магнитного экватора, как у

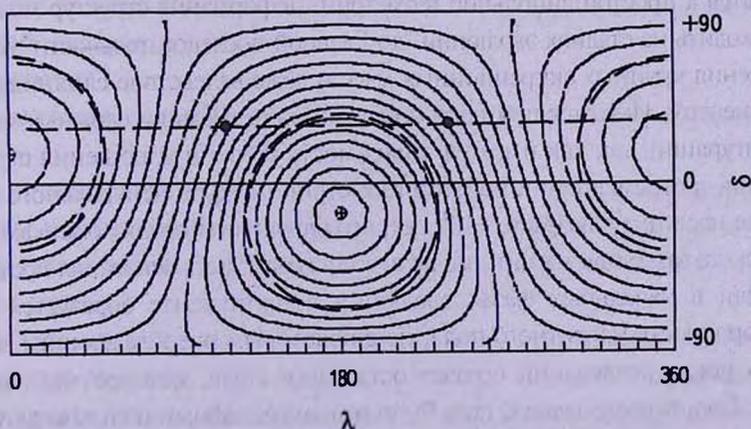


Рис.7. Распределение магнитного поля по поверхности HD 64740.

HD 21699. Точно такой же вывод можно получить из рассмотрения поведения тех же линий у звезды HD 79158 [51]. Эти примеры подтверждают не только механизм химических аномалий [40-46], но и правильность модельного распределения магнитного поля.

Существование зависимости содержания элемента от величины поля [52,53] тоже подтверждает реальность механизма диффузии и доказывает эффект подавления турбуленции магнитным полем. Например, нами получена корреляция между среднеквадратическими величинами поля и содержанием гелия $\langle Be \rangle = (2530 \pm 600) \cdot (He/H) + 36$ [52]. Найдена также корреляция с магнитным полем бальмеровских скачков, параметра Z Женевской фотометрии и степени пекулярности P [54]. Все три параметра связаны со степенью химических аномалий. Кроме подавления турбуленции магнитным полем наблюдается замедление ротационной циркуляции вещества в атмосфере [55] вследствие малой скорости вращения CP-звезд. Магнитное поле не влияет непосредственно на структуру атмосферы, его роль сводится только к стабилизации атмосферы [39]. Очевидно, что магнитное поле CP-звезд потенциальное, не подвержено никаким движениям, иначе не наблюдались бы диффузионные процессы, приводящие к химическим аномалиям.

7. Заключение. В данной работе мы подвели некоторые итоги многолетней работы по моделированию магнитных полей у 60 химически пекулярных звезд. Моделирование звезд, имеющих высокоточные фазовые зависимости $Be(\Phi)$, показало очень хорошее согласие с наблюдениями. Форма наблюдаемых фазовых зависимостей определяется только положением диполя внутри звезды. Структура магнитных полей у большинства, если не у всех звезд, в той или иной степени не симметрична относительно центра звезды. Это свойство может быть признаком того, что наблюдаемые конфигурации поля являются остатками первоначальных протозвездных сложных структур, которые с течением времени, вследствие неустойчивости мелких структур, стремятся к простой дипольной геометрии. Деформация структур может также происходить на стадиях эволюции "до Главной последовательности" вследствие выпадения крупных аккреционных масс и даже вследствие слияния с тесным компонентом. Имеются признаки постепенной релаксации сложных магнитных конфигураций, так как имеется зависимость степени упрощения структур от времени, и стремлению к простой геометрии (к полю центрального диполя), которая наступит в возрасте $\sim 10^{13}$ лет, что близко по порядку оценкам времени омического затухания магнитного поля всей звезды. Есть основания предполагать, что если в начальных фазах эволюции в протозвезде образуется сильная неоднородность магнитного поля, но с некоторым преобладающим вектором, то она после релаксации создаст остаточное поле, которое мы наблюдаем сейчас. Если первоначальное поле было мелкомасштабным и сильно запутанным, то оно не создаст преобладающего вектора и звезда станет нормальной.

Другое объяснение магнитных конфигураций CP-звезд основано на гипотезе тороидально-полоидальных внутренних структур магнитных полей CP-звезд [11,12]. Однако эта гипотеза не объясняет некоторые фундаментальные свойства, такие как сложные конфигурации, ортогональность осей вращения и осей диполей и др. Ортогональность вряд ли формируется вследствие действия меридиональной циркуляции, обсуждаемой в литературе, потому что не обнаруживается зависимость величины угла наклона оси диполя к оси вращения β от возраста звезды.

Были попытки объяснить происхождение поля путем генерации его в конвективном ядре, однако пока не найдены возможности выхода такого поля наружу за время жизни звезды на ГП.

Результаты моделирования показывают, что в центре звезд магнитные силовые линии сходятся не в одной точке, как предполагает теоретический "точечный" диполь, а в двух сингулярных точках, находящихся на расстоянии l друг от друга, сравнимом с радиусом звезды. Это показывает, что структура магнитного поля в центре звезды немного отличается от дипольной. Возможно, это связано с влиянием конвективного ядра на внутреннюю структуру магнитного поля. Но, несмотря на возможные нарушения дипольной структуры внутри звезд, применяемые модели в состоянии были описать все наблюдаемые фазовые зависимости без исключения.

Полученные моделированием карты распределения магнитного поля по поверхности позволяют исследовать связь химических аномалий с магнитным полем и проверить правильность модельного распределения магнитного поля по поверхности. На примере звезды HD 21699 и других рассмотрено распределение химических аномалий, подтверждено предположение о тесной связи их с распределением магнитного поля. Хорошо видно, что аномалии возникают вследствие диффузии химических элементов в стабильной атмосфере под действием гравитации, лучевого давления и ветра. Магнитное поле не влияет непосредственно на структуру атмосферы, его роль сводится только к стабилизации атмосферы.

Итак коротко:

1) Подтверждены данные о произвольности ориентации осей магнитных диполей.

2) Большинство звезд имеют структуры магнитного поля, отличающиеся от структуры центрального диполя. Смещение диполя (т.е. деформация магнитного поля) может происходить в любом направлении. Механизм деформации неясен.

3) Структура магнитного поля в центре скорее всего соответствует не диполю атомных размеров, а стержневому магниту с большим l , сравнимым с радиусом звезды. Не исключено влияние конвективного ядра. Поскольку магнитное поле не может сохраняться в конвективном ядре, то дипольная

структура организуется только в верхних слоях звезды.

4) Некоторые звезды обладают сильно деформированными структурами, у них смещение монополей достигает величины $\Delta a = 0.5 R_*$.

5) Большая часть звезд имеет конфигурацию поля, объясняемую одним смещенным диполем, около 11% имеет более сложную структуру, описываемую двумя диполями.

6) Более половины звезд имеют оси диполей расположенные в плоскости экватора вращения и деформация поля происходит тоже в этой плоскости, возможно, деформации магнитных структур происходят при выпадении на звезду крупных аккрецирующих масс на ранних стадиях эволюции.

7) Получены дополнительные данные в пользу предположения, что химические аномалии происходят вследствие диффузии химических элементов под действием гравитации, светового давления и ветра в магнитном поле.

В результате анализа полученных данных можно перечислить некоторые основные трудности современного состояния физики магнитных звезд.

1) Не до конца ясен сценарий образования магнитных, а следовательно, и нормальных звезд. Неизвестен механизм их разделения.

2) Не объяснена ортогональность осей диполя и осей вращения, т.е. ранние стадии эволюции непонятны.

3) Не подтверждена гипотеза отсутствия турбулентной фазы Хаяши на ранних стадиях эволюции, являющаяся сильным аргументом в пользу реликтового поля.

4) Не объяснена причина медленного вращения магнитных CP-звезд.

5) Теоретически объяснен механизм диффузии только для двух элементов - He и Si. Поведение остальных элементов не изучено.

6) Не решена проблема стабильности дипольных конфигураций, не устранены трудности гипотезы полоидально-тороидальных структур.

7) Не выяснено влияние конвективного ядра на структуру и стабильность магнитного поля.

8) Неизвестен механизм превращения запутанного начального поля в дипольную структуру.

9) Непонятно почему симметричные по плотности магнитные звезды имеют несимметричные структуры магнитных полей звезд со смещенными диполями.

10) Не установлена граничная величина магнитного поля, при которой начинает подавляться турбуленция.

Исходя из сказанного выше, можно заключить, что проблема магнитных химически пекулярных звезд еще далека от решения.

MAGNETIC FIELD OF CHEMICALLY PECULIAR STARS

Yu.V.GLAGOLEVSKIJ

We discuss the results of modelling of magnetic fields of 60 chemically peculiar stars (CP). The technique of modelling used corresponds to the assumption that the internal structure of magnetic fields is similar to a virtual magnetic dipole. The structure of magnetic fields of the majority of sample stars is not symmetric relative the center of the star. The assumption is made that from the point of view of the relic mechanism the observable field configurations are the remnants of initial complex protostellar structures, which eventually, owing to their instability tend to simple geometry in the form of dipole structures. The difficulties of the hypothesis of toroidal-poloidal internal structures of magnetic fields of CP stars are discussed. By the example of the star HD 21699 we show that the distribution of chemical anomalies is closely related to the distribution of the magnetic field. It is confirmed that chemical anomalies arise owing to the diffusion of chemical elements in the stable atmosphere under the effects of gravitation, radiation pressure and wind.

Key words: *stars:peculiar:magnetic field*

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth, Magnetic stars, Nizhnij Arkhyz, 2011, p.147.
2. Ю.В.Глаголевский, Астрофиз. Бюлл., 66, 158, 2011.
3. Ю.В.Глаголевский, Астрофизика, 54, 263, 1011.
4. О.Кочухов, Physics of Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, 2007, p.61.
5. E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, Magnetic stars, Nizhnij Arkhyz, 2003, p.152.
6. G.Preston, Publ. Astron. Soc. Pacif., 83, 571, 1971.
7. J.D.Landstreet, Astron. J., 85, 611, 1980.
8. Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth, Magnetic stars, Nizhny Arkhyz, 2011, p.142.
9. Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth, ASP Conf. Ser., 248, 337, 2001.
10. Ю.В.Глаголевский, Астрофиз. Бюлл., 63, 201, 2008.
11. J.Braithwaite, H.C.Spruit, Nature, 431, 819, 2004.
12. J.Braithwaite, A.Nordlung, Astron. Astrophys., 450, 1070, 2006.
13. G.W.Preston, Astrophys. J., 150, 547, 1967.
14. E.F.Borra, J.D.Landstreet, Astrophys. J. Suppl. Ser., 42, 421, 1980.
15. Ю.В.Глаголевский, Изв. САО, 20, 26, 1985.
16. D.Moss, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 244, 272, 1990.
17. G.A.Wade, J.-F.Donati, J.D.Landstreet, S.L.S.Shorlin, Mon. Notic. Roy.

- Astron. Soc., 313, 851, 2000.
18. Ю.В.Глаголевский, Астрон. ж., (в печати).
 19. Ю.В.Глаголевский, Астрофиз. Бюлл. (в печати).
 20. Дж.Данжи, Космическая электродинамика, М., 1961, с.33.
 21. Ю.В.Глаголевский, Е.Герт, Астрофиз. Бюлл., 63, 276, 2008.
 22. Ю.В.Глаголевский, Г.А.Чунтонов, Астрофизика, 50, 441, 2007.
 23. F.Palla, S.W.Stahler, Astrophys. J., 418, 414, 1993.
 24. F.Palla, S.W.Stahler, ASP Conf. Ser., 62, 1994, p.491.
 25. Е.Паркер, Космические магнитные поля, т.1, М., "Мир", 1982.
 26. D.Moss, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 236, 629, 1989.
 27. D.Moss, ASP Conf. Ser., 248, 305, 2001.
 28. J.McDonald, D.J.Mullan, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 348, 702, 2004.
 29. Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth, Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, 2011, p.153.
 30. Yu.V.Glagolevskij, Magnetic stars, Leningrad, Nauka, 1988, p.206.
 31. Yu.V.Glagolevskij, V.G.Klochkova, I.M.Kopylov, IAU Coll. No90, 1986, p.32.
 32. Yu.V.Glagolevskij, V.G.Klochkova, I.M.Kopylov, Astron. Zh., 64, 360, 1987.
 33. J.D.Landstreet et al., Magnetic stars, Nizhnij Arkhyz, 2011, p.14.
 34. Ю.В.Глаголевский, Е.Герт, Бюлл. САО, 58, 17, 2005.
 35. А.В.Тутуков, А.В.Федорова, Астрон. ж., 87, 1, 2010.
 36. Ю.В.Глаголевский, Астрофизика, 2012 (в печати).
 37. Yu.V.Glagolevskij, Bull. SAO., 46, 118, 1998.
 38. D.N.Brown, S.N.Shore, G.Sonneborn, Astron. J., 90, 1354, 1985.
 39. Ю.В.Глаголевский, А.В.Шаврина, Г.А.Чунтонов, Астрофизика, 2012 (в печати).
 40. S.Vauclair, Astron. Astrophys., 45, 233, 1975.
 41. G.Michaud et al., Astrophys. J., 322, 302, 1987.
 42. S.Vauclair et al., Astron. Astrophys., 252, 618, 1991.
 43. S.Vauclair, Astron. Astrophys., 45, 233, 1975.
 44. S.Vauclair et al., Astrophys. J., 227, 526, 1979.
 45. C.Alecian, S.Vauclair, Astron. Astrophys., 101, 16, 1981.
 46. C.Maggessier, Astron. Astrophys., 138, 267, 1984.
 47. Ю.В.Глаголевский и др., Астрофиз. Бюлл., 64, 170, 2009.
 48. В.В.Леушин и др., Астрофиз. Бюлл., 66, 67, 2011.
 49. A.V.Shavrina et al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 401, 1882, 2010.
 50. Ю.В.Глаголевский, Астрофиз. Бюлл., 2012 (в печати).
 51. S.N.Shore et al., Astrophys. J., 365, 665, 1990.
 52. Ю.В.Глаголевский, Ф.Г.Копылова, Л.С.Любимков, Астрофизика, 33, 363, 1990.
 53. Ю.В.Глаголевский, Астрон. ж., 71, 858, 1994.
 54. Yu.V.Glagolevskij, Chrmically Peculiar and Magnetic Stars, Tatranska Lomnica, 1994, p.102.
 55. А.Г.Масевич, А.В.Тутуков, Эволюция звезд: теория и наблюдения. М., Наука, 1988.