

СТРУКТУРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД. I. HD 57682, HD81009

Ю.В.ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 16 ноября 2023

Принята к печати 7 марта 2024

На основе литературных данных о величинах магнитного поля построены модели магнитного поля магнитных звезд разных типов пекулярности HD 57682, HD81009 и получены параметры их магнитного поля. У HD 57682, как и у других горячих объектов, обнаруживаются различия физических условий в области магнитных экваторов и в области близ магнитных полюсов, которые пока не поддаются интерпретации. Звезда HD81009 по своим свойствам является типичным представителем магнитных звезд SrCrEu-типа, кроме ее двойственности.

Ключевые слова: *магнитное поле; пекулярные звезды*

1. Введение. В данной работе мы продолжаем выполнение большой программы по исследованию структур магнитных полей химически пекулярных звезд (СР) на основании использования опубликованных последнее время измерений продольного поля V_e (или средних поверхностных величин B_s). Несмотря на то, что в этих работах обычно проводится подробный анализ полученных данных, дополнительное изучение их магнитных структур с нашей уникальной методикой позволит дополнить и уточнить эти данные. Это важно также тем, что параметры магнитного поля получаются для всех звезд с единой методикой. Кроме того, существенно пополняется список параметров и величин среднего поверхностного магнитного поля B_s и уточняются структуры магнитного поля. Методика моделирования подробно описана в работах [1-3]. Она основана на предположении дипольной структуры магнитного поля, которая реально формируется в магнитных звездах в процессе эволюции. Опыт моделирования (около 140 звезд) показывает, что даже в тех случаях, когда структуры отличаются от центрального диполя, они имеют другие формы - такие как смещенный из центра звезды диполь, или в более сложных случаях как результат двух-трех диполей внутри звезды. Особенно важны в статистических исследованиях средние поверхностные величины магнитного поля B_s , используемые при исследованиях разного рода зависимостей. К сожалению, не часто имеется возможность моделировать структуры магнитного поля по действительно хорошим данным.

2. Звезда *HD57682 (O)*. Величина среднего поверхностного магнитного поля B_s у этой звезды неизвестна, поэтому ее оценка представляет собой значительный интерес. Кроме того, звезда относится к малоизученному классу горячих магнитных звезд О-типа, которых в последнее время часто причисляют к семейству химически пекулярных (CP) звезд, с более высокими температурами.

Величины продольной компоненты магнитного поля B_e магнитной звезды HD57682 в разных фазах Φ периода вращения приводятся в работе [4]. Средняя точность определений B_e равна $\sigma = \pm 26$ Гс. Они оценивались по спектрополяриметрическим измерениям высокого разрешения ($R = 68000$) мультилинейчатый способом (LSD) [5]. Тем не менее, надо иметь в виду, что в отличие от измерений по линиям водорода и гелия [6,7], измерения магнитного поля по линиям металлов подвержены влиянию неравномерного распределения химических элементов по поверхности звезды. Обычно этот эффект влияет на амплитуду изменений магнитного поля. Физические параметры звезды, взятые из [4,8], приведены в табл.1.

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДОВАННЫХ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД

HD	Тип	T_e , K	M_b	logg	$R/R_\odot$	logt, г	$M/M_\odot$	B_s , Гс	R/R_z
57682	O	35000	-7.3	4.0	7	7.3	17	212	1.21
81009	SrCrEu	8120	+1.4	3.98	2.3	8.90	2.2	8378	1.40

Используя формулу $v = 50.6 R/P$, получаем экваториальную скорость звезды $v = 6.4$ км/с, откуда угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 47^\circ$. Величина $v \sin i = 4.6$ км/с и период вращения $P = 63.6$ сут взяты из [4]. Полученный угол близок к оценке $i \approx 60^\circ$, полученной в [4]. Для удобства сравнения результатов анализа мы использовали в дальнейшем угол $i = 60^\circ$. Методом последовательных приближений получена модель, которая оказалась центральным диполем, с параметрами, приведенными в табл.2. Здесь B_s -величина среднего поверхностного магнитного поля, B_p -величина поля на магнитных полюсах, ΔA , R_* - смещение диполя из центра звезды, α - угол между осью диполя и плоскостью экватора вращения, i -наклон оси вращения к лучу зрения.

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

HD	B_s , Гс	B_p , Гс	ΔA , R_*	α , гр.	i , гр.
57682	212	± 323	0.0	8	60
81009	8378	+20672, -9396	+0.13	16	16:

Параметры модели подбирались так, чтобы различие модельных и измеренных величин B_e в разных фазах периода вращения были меньше 3σ . На рис.1a точками обозначена наблюдаемая фазовая зависимость $B_e(\Phi)$, сплошной линией - модельная. На рис.1b показана модельная зависимость среднего поверхностного магнитного поля $B_s(\Phi)$, из которой получается средняя величина $B_s = 212$ Гс. Важнейший параметр - угол между осью диполя и плоскостью экватора вращения в нашей модели $\alpha = 8^\circ$, в работе [4] $\alpha = 11^\circ$, величина достаточно близкая нашей оценке. На рис.2 показана схема ориентации диполя в звезде HD57682. Штриховыми линиями ограничена область магнитного экватора, черными полукружками обозначены магнитные полюса. Основное замечание состоит в том, что в [4] предлагается величина магнитного поля на магнитных полюсах $B_p = 880$ Гс, тогда как у нас $B_p = \pm 323$ Гс.

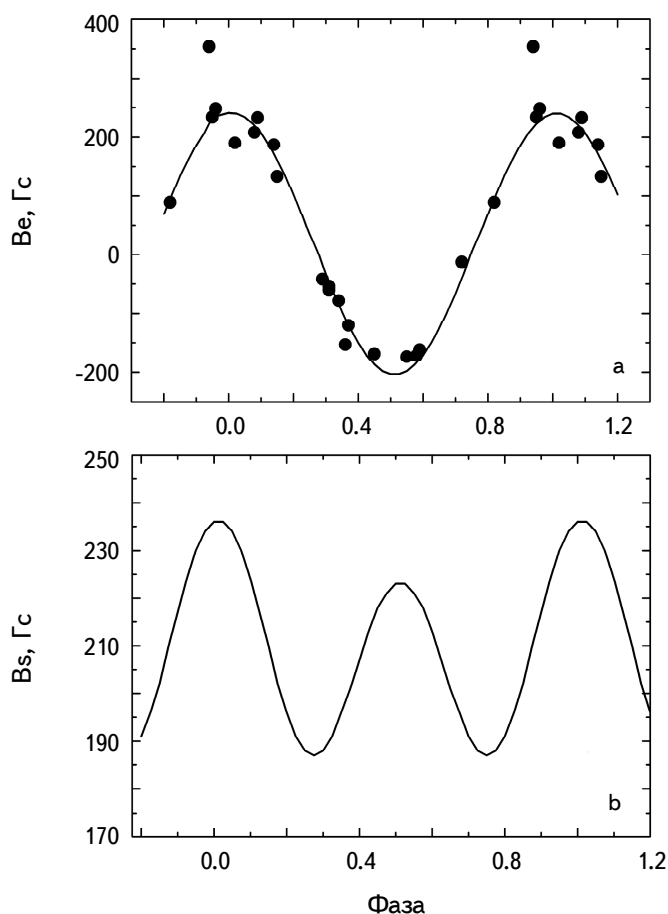


Рис.1. Изменение магнитного поля HD57682 с фазой периода вращения. а) зависимость продольного поля $B_e(\Phi)$; точки - измеренные данные, сплошная кривая - модельная. б) модельная зависимость среднего поверхностного поля $B_s(\Phi)$.

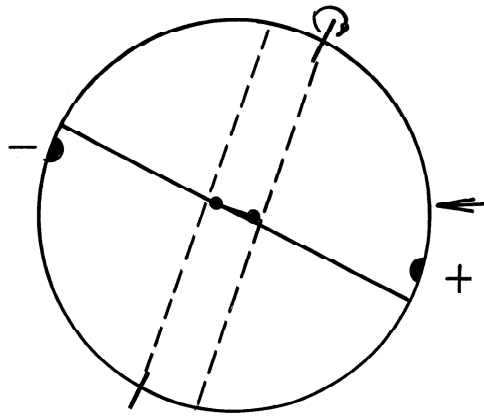
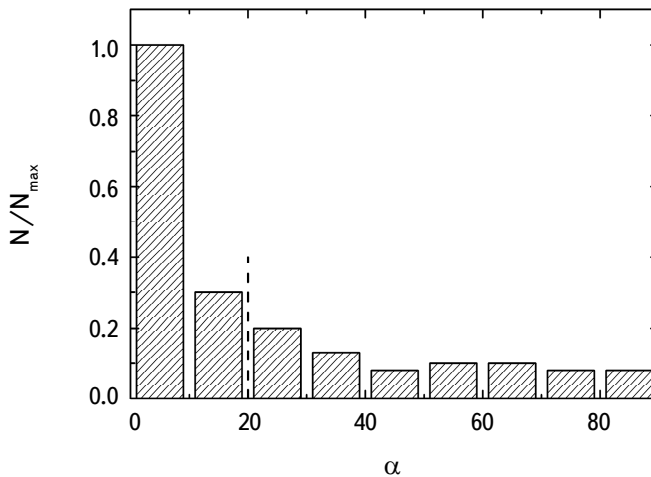


Рис.2. Ориентация дипольного магнитного поля в звезде HD57682.

На рис.3 показана зависимость распределения магнитных звезд по углам α , на которой звезда HD57682 находится в диапазоне углов $\alpha = 0 - 20^\circ$, что является типичным для магнитных звезд [9]. Малость величины α является характерным свойством магнитных звезд и обусловлена потерей момента вращения через силовые линии окружающих облаков на ранних этапах эволюции.

Структура магнитного поля - центральный диполь, встречается у более чем половины магнитных звезд и объясняется, по-видимому, тем, что они сформировались из однородного по своей структуре родительского намагниченного протозвездного облака [9]. Важным свойством звезды HD57682 является ее относительно малая величина B_s , что характерно для магнитных

Рис.3. Распределение магнитных звезд по углам α .

О-звезд [10]. Это видно из рис.4, где показана зависимость среднего магнитного поля звезд разного типа пекулярности от температуры (от массы). Здесь О-звезды обозначены звездочками. Возраст звезды HD57682 $\log t$ оценивался по зависимости $\log t(R/R_z)$, приведенной в [10], где R/R_z - радиус данной звезды относительно ее радиуса на ZAMS.

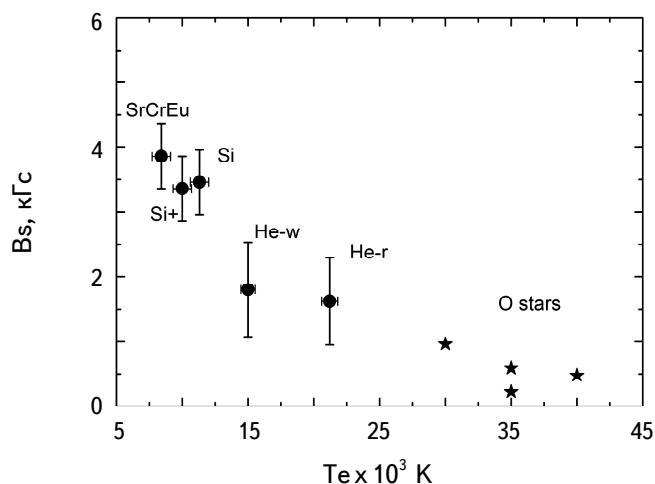


Рис.4. Зависимость средних поверхностных величин магнитного поля B_s от температуры (массы). Звездочки - объекты О-типа.

На основании результата моделирования переменной эмиссии Na у HD57682 в работе [4] сделан вывод, что это излучение генерируется из оптически толстого, сплюснутого распределения магнито-удерживаемой плазмы, которая распределена вдоль магнитного экватора. Однако из рис.1 в работе [4] хорошо видно, что максимальная интенсивность эмиссии возникает в $\Phi = 0.02$, т.е. в момент прохождения положительного магнитного полюса через центральный меридиан (рис.1a, b). Следовательно, эмиссия максимальна в области магнитного полюса, а не на магнитном экваторе. Второй максимум (несколько более слабый) происходит в $\Phi = 0.45$, совпадающий с моментом прохождения отрицательного магнитного полюса через центр видимого диска. Из-за наклона оси диполя область отрицательного полюса видна хуже, чем область положительного. В $\Phi = 0.3$, и особенно $\Phi = 0.72$, наблюдаются области ближе к магнитному экватору, здесь эмиссия слабее. Совершенно очевидно, что эмиссионные области находятся вокруг магнитных полюсов, где особенно сильный ветер. Эквивалентная ширина линии $\text{H}\gamma$ больше в магнитных полюсах, как это видно на рис.8 в работе [4].

Из рис.8 в работе [4] видно, что спектральные линии CII4056, HeI4713, HeI4921, HeI6678, NIII4634, HeI4713, CIV5801, CIV5812, $\text{H}\gamma$, HeI4471, MgII4481,

NIII4523, SiIII4552, OII4801 имеют максимальную интенсивность в $\Phi = 0$. Это значит, что они концентрируются на положительном магнитном полюсе, который в этой фазе находится на центральном меридиане. В то же время линии CIV5801, CIV5812 максимальны в $\Phi = 0.5$. В этой фазе полусфера с отрицательным магнитным полем видна хуже, чем полусфера с положительным магнитным полем в $\Phi = 0$, но лучше виден магнитный экватор. Вероятнее всего линии CIV5801 и CIV5812 формируются на магнитном экваторе. Последнее утверждение усиливается, если принять угол $i = 47^\circ$, а не 60° . Рассматривая подробно лучевые скорости линий основной группы элементов [4], можно проследить, как химическое "пятно" выходит из-за горизонта, проходит через центральный меридиан и, затем, уходит за горизонт. Что касается линий CIV5801 и CIV5812, то при значительном разбросе точек, который наблюдается на зависимостях, трудно что-либо понять. Необходимы новые измерения.

Учитывая результаты предыдущих исследований, можно утверждать, что типичным свойством магнитных O- и He-г звезд является сильный ветер [11] на магнитных полюсах, где максимальная напряженность магнитного поля также способствует сильной диффузии химических элементов. В результате возникают сильные химические аномалии в близполярной области [12-14]. Концентрация некоторых химических элементов происходит также в области магнитного экватора [15-17], где силовые линии горизонтальны к поверхности. Существует зависимость химических аномалий от величины магнитного поля, связанная с тем, что магнитное поле подавляет турбулентность, облегчая диффузию химических элементов [18,19].

Звезда HD57682 является типичным представителем магнитных звезд O-типа. Например, структура поверхности O-звезды HD37022 тоже делится на две основные области по своим свойствам - вокруг магнитных полюсов и на магнитном экваторе [12]. У HD37022 эмиссия H α и HeII4686 сильнее в магнитных полюсах, слабее в экваториальной области. Таким образом, у HD57682 и у HD37022 эмиссионное облако формируется на магнитных полюсах [12]. Точно так же ведут себя O-звезды HD149438 и HD191612 [12]. Общий вывод - вблизи магнитных полюсов O-звезд формируется разреженная эмиссионная оболочка, тогда как экваториальная область плотная, и если там формируется эмиссия, то в меньшей степени.

На магнитных полюсах HD57682 линии поглощения H α и He имеют максимальную интенсивность (см. рис.8 в работе [4]). Таким образом, линии поглощения водорода и гелия в HD57682 ведут себя противоположно тому, что наблюдается у HD37022, у которой эквивалентная ширина H α минимальна в $\Phi = 0$ и максимальна в $\Phi = 0.5$ [20,21]. В звезде HD57682 непонятна ситуация с лучевой скоростью, измеренной по линиям H и He (см. рис.8 в [4]): в $\Phi = 0$,

т.е. в момент прохождения водородного и гелиевого "пятна" через центральный меридиан, лучевая скорость максимальна, хотя она должна быть равна 0. Необходимы дополнительные наблюдения.

3. *HD81009 (SrCrEu)*. Звезда интересна тем, что относительно нее выполнено необычно много (39) измерений магнитного поля B_s по расщеплению спектральных линий в неполяризованном спектре [22]. Таким образом, в нашем распоряжении оказывается богатый и надежный материал, позволяющий уверенно изучить структуру магнитного поля звезды. Дополнительно к этому имеется ряд измерений продольного поля B_e в разных фазах периода вращения в [23], выполненного по линиям металлов. Таким образом, в обоих случаях не исключено влияние неравномерного распределения

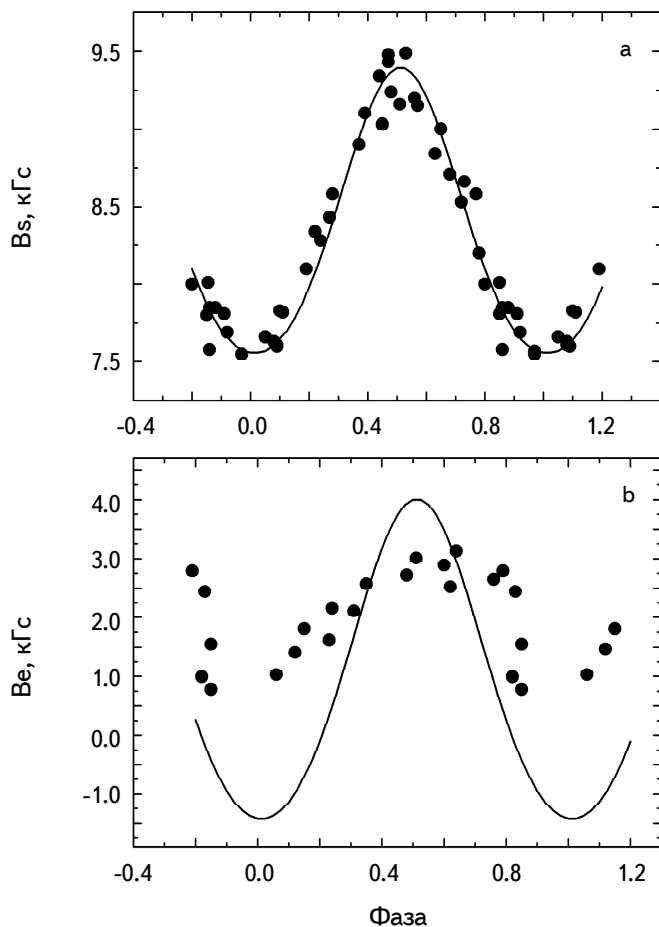


Рис.5. Изменение магнитного поля HD81009. а) зависимость среднего поверхностного поля $B_s(\Phi)$; точки - измеренные данные, сплошная кривая - модельная. б) зависимость продольного поля $B_e(\Phi)$; точки - измеренные данные, сплошная кривая - модельная.

химических элементов по поверхности на измерения, вызывающего обычно некоторое увеличение амплитуды изменений. Наблюдаемые фазовые зависимости $B_s(\Phi)$ и $B_e(\Phi)$ на рис.5а, б обозначены точками. К сожалению, на зависимости $B_e(\Phi)$ слишком большой разброс данных, что вызывает неуверенность при их использовании. Необходимые нам параметры представлены в табл.1, они взяты из [8,23]. Период вращения звезды равен $P = 34$ сут. К сожалению, неизвестна величина $v \sin i$, поэтому нет возможности определить такой важнейший параметр, как угол наклона i звезды к лучу зрения наблюдателя. В работе [23] предполагается $v \sin i = 2.8$ км/с. Но в нашем случае это можно сделать на основании моделирования. При правильном выборе параметров моделей с использованием зависимостей $B_s(\Phi)$ и $B_e(\Phi)$ должен получиться одинаковый угол i .

В фазе $\Phi = 0.5$ зависимость $B_s(\Phi)$ более острая, а в $\Phi = 0$ - более тупая, что является признаком смещения диполя в эту сторону. Поэтому одним из важнейших параметров, который приходится подбирать, является величина смещения диполя ΔA , измеряемая в долях радиуса звезды. При моделировании магнитного поля по обеим зависимостям для серии углов i за правильный принимается, тот угол, при котором зависимости наилучшим образом совпадают с наблюдаемыми зависимостями. Таким способом мы получили фазовые зависимости, показанные на рис.5а, б сплошной линией. Такие зависимости получены при параметрах, приведенных в табл.1, величине угла $i = 16^\circ$ и смещении диполя вдоль оси $\Delta A = +0.13 R_*$. Следует заметить, что в результате малого угла i постоянно видна полусфера с положительным знаком магнитного поля, как это видно из рис.6. Штриховой линией ограничена область магнитного экватора. Это очень невыгодная ориентация для получения модели, потому что возникает слишком малая амплитуда изменения магнитного поля и большой разброс точек на фазовой зависимости $B_e(\Phi)$, приводящий к неуверенной модели. Фактически наблюдатель видит область магнитного экватора, где силовые линии горизонтальны к поверхности звезды и продольная компонента B_e слаба. Рассмотрим схему расположения диполя внутри звезды HD81009 (рис.6). Положительный магнитный полюс вращается вокруг полюса вращения практически без изменения напряженности B_s . Вектор B_e тоже практически не меняет ни знака, ни величины. В этом состоит трудность измерений и, особенно, моделирования. Ситуация такова, что, изучая область магнитного экватора, мы должны получить представление о распределении магнитного поля по всей поверхности и внутри звезды. Только предположение магнитного диполя позволяет приблизиться к правильному решению. Модельная величина $B_s = 8378$ Гс оказалась достаточно близкой к средней величине $B_s = 8401$ Гс из работы [22] (различие всего 23 Гс). Величина магнитного поля на магнитных полюсах $B_p = +20672$ Гс и -9396 Гс. Столь сильное различие происходит

вследствие значительного смещения диполя в сторону положительного монополя. Один из важнейших полученных параметров модели это малый угол $\alpha = 16^\circ$ (угол между осью диполя и плоскостью экватора вращения), который по величине соответствует типичному свойству магнитных звезд (рис.3). Обращает на себя внимание отличное соответствие наблюдений и модели на зависимости $Be(\Phi)$ и плохое - на зависимости $Ve(\Phi)$. В последнем случае можно говорить о соответствии только *в среднем*, но не по форме. В работе

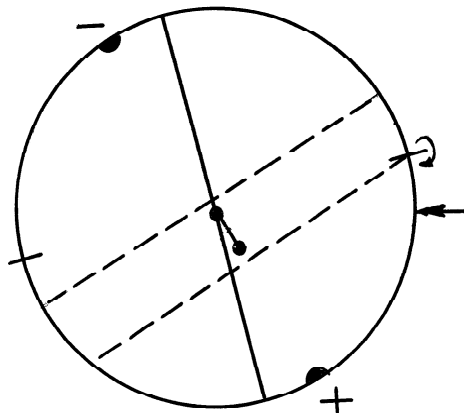


Рис.6. Ориентация дипольного магнитного поля в звезде HD81009.

[22] модельная зависимость $Be(\Phi)$ тоже заметно отличается от наблюдаемой. Выше мы предполагали причину неточных измерений Be , кроме того может быть влияние неравномерного распределения химических элементов по поверхности. Последняя причина наиболее вероятна. Угол $i = 2^\circ.8$, полученный в [23], сильно отличается от нашего результата $i = 14^\circ$, поэтому зависимость $Be(\Phi)$ для данной звезды следует перемерить.

Значительный интерес представляет тот факт, что двойная система HD81009 состоит практически из одинаковых звезд по массе и температуре, но только одна из них магнитная [23]. Проблема формирования и эволюции сложных систем рассматривалась в работе [24]. Здесь может играть роль неоднородность родительского протозвездного облака, когда одна звезда сформировалась из намагниченного фрагмента, а другая нет. Возможен вариант, когда вторичный компонент вследствие быстрого начального вращения не смог преодолеть известный барьер для магнитных звезд $P > 1$ сут. Возраст HD81009 оценивался по зависимости $\log t(R/R_z)$, приведенной в [10], где R/R_z - радиус звезды относительно ее радиуса на ZAMS. Звезда HD81009 типичный магнитный химически пекулярный объект SrCrEu-типа.

Экваториальная скорость звезды равна $v = 50.6 R/P = 3.4$ км/с, а из $i = 14^\circ$

следует $v \sin i = 0.82 \text{ км/с}$. Столь малая величина $v \sin i$ обусловлена медленным вращением и полярной ориентацией звезды.

4. *Заключение.* Исследованы две магнитные звезды, находящиеся в крайних точках температурной последовательности магнитных звезд. О-звезда HD 57682 имеет структуру центрального диполя. Малая величина угла α является признаком потери момента вращения с участием магнитного поля. Малая величина B_s является характерной чертой магнитных звезд. Эмиссия в спектральных линиях, усиление химсостава в близполярных областях характерны для магнитных CP-звезд O и He-г типов. Эмиссионное облако на магнитных полюсах наблюдается и у других горячих магнитных звезд [12]. Область магнитного экватора более холодная и фотометрически более темная, если там формируется эмиссия, то в меньшей степени. Учитывая результаты предыдущих исследований, можно утверждать, что типичным свойством магнитных O- и He-г звезд является сильный ветер [11], где напряженность магнитного поля максимальна. Концентрация некоторых химических элементов происходит также в области магнитного экватора [15,17], где силовые линии горизонтальны к поверхности. Существует зависимость химических аномалий от величины магнитного поля, связанная с тем, что магнитное поле подавляет турбулентность, облегчая диффузию химических элементов [18,19].

Вторая из исследованных звезд HD81009 имеет структуру магнитного поля, смещенного из центра магнитного диполя. Из-за невыгодной ориентации она видна преимущественно со стороны магнитного экватора, наблюдаемая фазовая зависимость $Be(\Phi)$, по-видимому, сильно искажена. Интересно, что HD81009 это двойная система, которая состоит практически из одинаковых звезд по массе и температуре, но только одна из них магнитная [23]. Такие системы могут возникать либо из-за неоднородности магнитного поля в родительском протозвездном облаке, когда одна звезда сформировалась из намагниченного фрагмента, а другая нет. Возможен вариант, когда вторичный компонент вследствие быстрого начального вращения не смог преодолеть известный барьер для магнитных звезд $P > 1 \text{ сут}$.

Подробный анализ исследованных звезд будет представлен в следующей статье.

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

MAGNETIC FIELD STRUCTURES OF CHEMICALLY PECULIAR STARS. I. HD57682, HD81009

Yu.V.GLAGOLEVSKIJ

Based on literature data on magnetic field values, models of the magnetic field of magnetic stars of different types of peculiarity HD57682, HD81009 were constructed and the parameters of their magnetic field were obtained. HD57682, like other hot objects, exhibits differences in physical conditions in the region of the magnetic equators and in the region near the magnetic poles, which are not yet amenable to interpretation. The star HD81009 in its properties is a typical representative of SrCrEu-type magnetic stars, except for it's the binar system.

Keywords: *magnetic field: peculiar stars*

ЛИТЕРАТУРА

1. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij*, Bull. SAO, **56**, 25, 2003.
2. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **71**(1), 43, 2016.
3. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **66**(2), 144, 2011.
4. *J.H.Grunhut et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **426**, 2208, 2012.
5. *J.F.Donati et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **291**, 658, 1979.
6. *E.F.Borra, J.D.Landstreet*, Astrophys. J., **212**, 141, 1977.
7. *Yu.V.Glagolevskij, V.D.Bychkov*, Astrophys. Bull., **78**, 165, 2023.
8. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **74**, 66, 2019.
9. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **76** 100, 2021.
10. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **79**, 10, 2024.
11. *L.Mestel*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **138**, 359, 1968.
12. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., 2024, (in press I).
13. *Yu.V.Glagolevskij et al.*, Astrophys. Bull., **64**(2), 170, 2009.
14. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophysics, **55**(1), 169, 2012.
15. *G.Michaud et al.*, Astrophys. J., **322**, 302, 1987.
16. *S.Vauclair*, Astron. Astrophys., **45**, 233, 1975.
17. *S.Vauclair et al.*, Astron. Astrophys., **252**, 618, 1991.
18. *Yu.V.Glagolevskij, F.G.Kopylova, L.S.Lyubimkov*, Astrophysics, **33**, 363, 1990.
19. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **62**(1), 244, 2007.
20. *J.-F.Donati et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **333**, 55, 2002.
21. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., 2024, (in press II).
22. *G.Mathys et al.*, Astron. Astrophys. Suppl., **123**, 353, 1997.
23. *G.A.Wade et al.*, Astron. Astrophys., **361**, 991, 2000.
24. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **76**(1), 91, 2021.