

УДК 524.35-337/54

## СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ИЗБРАННЫХ ЗВЁЗД. I.

© 2014 Ю. В. Глаголевский\*

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 10 января 2014 года; принята в печать 12 мая 2014 года

Методом магнитных диполей построены модели магнитного поля восьми звезд с целью получения дополнительных сведений об особенностях структур магнитных полей CP-звезд. Эти данные необходимы для уточнения условий формирования звезд в начальных стадиях эволюции. Отмечается большое разнообразие начальных условий, приводящее к сильному разбросу параметров магнитных звезд и магнитных структур.

Ключевые слова: *звёзды: магнитное поле — звёзды: химически пекулярные — звёзды: эволюция*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе методом магнитных диполей [1] получены модели магнитного поля для следующих звезд: HD 35298, 35456, 36485, 59435, 70331, 90044, 101412 и 133880. Основная цель — накопление данных о разнообразии форм магнитных структур и их параметров для лучшего понимания условий их формирования, а также для увеличения надежности статистических исследований. К настоящему времени изучены магнитные структуры 75 звезд, однако для многих статистических исследований этого количества явно недостаточно. Примерно 83% структур описываются центральным или смещенным диполем. Остальные, более сложные, описываются двумя или тремя диполями. Возможно, что имеются и более сложные структуры, но их трудно выделить вследствие недостаточной точности измерений. По-видимому, не существует структур, описываемых диполем, находящимся точно в центре звезды. Все диполи смещены из центра в той или иной степени, и выявление величины смещения зависит от точности измерений поля. Величина смещения иногда достигает  $\Delta a = 0.5 R_*$  ( $R_*$  — радиус звезды). Главный вывод, который можно сделать на основании моделирования: у всех звезд без исключения структура магнитного поля в пределах ошибок измерений такая же, как структура теоретического магнитного диполя. С точки зрения реликтовой гипотезы, которой мы придерживаемся, магнитные структуры звезд формируются на начальных стадиях эволюции при гравитационном сжатии намагниченных протозвездных облаков и сохраняются до сих пор

вследствие медленной релаксации. Теоретически время жизни  $t$  центрального диполя максимально по сравнению с более сложными структурами. Поле исчезает вследствие омической диссипации за  $t = 4\pi\epsilon l^2 = 10^{10} - 10^{11}$  лет [2] ( $\epsilon$  — проводимость,  $l$  — характерный размер магнитных структур). Это означает, что крупномасштабные магнитные структуры сохраняются практически без изменений в течение всего времени жизни магнитных звезд, имеющих максимальный возраст  $t = 10^9$  лет [3–5]. Все возможные механизмы формирования магнитных звезд изложены в [6], однако во всех своих работах мы пытаемся развивать только наиболее принятую сейчас реликтовую гипотезу, а не все вместе. В процессе коллапса протозвездных облаков и на более поздних стадиях эволюции магнитные поля вследствие вмороженности испытывают сложные преобразования вместе с турбулентным газом, в результате чего магнитные поля звезд оказываются в широком диапазоне величин. По этой причине структуры и параметры магнитных полей тоже крайне разнообразны.

К сожалению, измерения магнитных полей не всегда надежны. Ошибки измерений величин продольной компоненты поля  $B_e$  частично могут быть увеличены вследствие «пятнистости» распределения магнитного поля [3–5] и неравномерного распределения химических элементов по поверхности [7] и, возможно, по глубине атмосферы. В работе [5] обсуждается вероятность нарушения структуры верхней атмосферы и магнитного поля в верхних слоях вследствие воздействия аккреции на молодые звезды. Нарушенная в результате магнитная структура после окончания аккреции мгновенно не исчезает. Она может существовать

\*E-mail: glagol@sao.ru

Таблица 1. Основные физические параметры звезд

HD	Измерения $B_e$	$P$ , дни	$T_{\text{eff}}$ , К	$v \sin i$ , км с $^{-1}$	$M_b$	$R/R_{\odot}$	$i$ , град.
35298	[8]	1.85457 [18]	15200 [21]	57 [22]	-1.6 [21]	2.6	53
35456	[9]	0.28313 [19]	14000 [21]	55 [23]	-1.4 [21]	3.0	6
36485	[10]	1.47775 [10]	20000 [10]	32 [10]	-3.4	3.5	12
59435	[11, 12]	1360 [12]	8600 [11]	0.15	-0.05	4.0	88 [11]
70331	[13]	1.99812 [16]	14300	16	-1.5	2.8	27
90044	[14, 15]	4.379000 [13]	9780 [8]	15 [13]	+0.1 [8]	3.0	26
101412	[16]	42.076 [20]	9500	$\sim 2$	+1.75	1.6	80 [20]
133880	[17]	0.877485 [17]	12000	103 [24]	-0.51	3.0	37

Таблица 2. Параметры магнитных полей звезд

HD, метод	Знак монополя	Долгота монополя, град.	Широта монополя, град.	$B_p$ , Гс	$B_s$ , Гс	$\alpha$ , град.	$\Delta a$ , $R_*$
35298	+	150	-2	+4672	2886	2	0
metal	-	358	+2	-4663			0
35456	+	180	-0.5	+2934:	1642:	0.5	0
H	-	0	+0.5	-2934:			0
36485	+	20	8	+14000	5891	5	0.30
metal	-	110	0	-17600			0.30
	+	200	8	+14000		5	0.30
	-	290	0	-3000			0.17
59435	+	179	+40	+8983	3292	40	0.20
metal	-	350	-40	-2502			0.20
70331	+	185	+2	+21776	12220	2	0.03
metal	-	60	-2	-21744			0.03
90044	+	20	-2	+3759	2153	2	0
H	-	200	+2	-3759			0
101412	+	147	+13	+558	535	13	0.13
H	-	327	-13	-1235			0.13
101412	+	147	-8	+554	374	10	0
metal	-	327	+8	-554			0
133880	+	160	-16	+4203	5302	16	0.2
H	-	354	+16	-16150			0.2

долго, в зависимости от размеров неоднородностей. Измерения, сделанные по линиям водорода, имеют преимущество по сравнению с измерениями по линиям металлов, т.к. последние неравномерно распределены по поверхности. Иногда влияние этого эффекта значительно [7]. Практика показывает, что наиболее надежны модели в том случае, если известны обе фазовые зависимости магнитного поля — эффективного  $B_e(\Phi)$  и среднего поверхностного  $B_s(\Phi)$  (модуль магнитного поля). При отсутствии одной из этих зависимостей необходимо знать величину наклона оси вращения к лучу зрения  $i$ , которая определяется не всегда достаточно точно. Вопрос точности получаемых параметров весьма сложный. В первую очередь, путем подбора параметров мы добиваемся того, чтобы модельные зависимости находились в пределах  $3\sigma$  относительно измеренных величин магнитного поля. Шаг изменения долготы монополя меняется от  $1^\circ$  до  $5^\circ$  в зависимости от величины рассеяния точек на фазовой зависимости. Шаг изменения широты всегда  $1^\circ$ . Следовательно угол между осью диполя и плоскостью экватора вращения  $\alpha$  определяется типично тоже с шагом  $1^\circ$ . Средняя ошибка определения величины сдвига диполя из центра звезды  $0.05 R_*$ . Труднее оценить ошибку поля  $B_p$  на магнитных полюсах и среднего поверхностного поля  $B_s$ . Она в основном зависит от ошибки определения угла наклона звезды к лучу зрения  $i$ . В литературных источниках, которыми мы пользуемся, редко даны ошибки угла  $i$ , поэтому на основании опыта моделирования 75 звезд мы принимаем  $\sigma = 20\%$ . Примерно такую же величину мы принимаем и для ошибок  $B_p$  и  $B_s$ . Эта величина уверенно поддерживает градиацию «очень слабое поле—слабое поле—среднее поле—сильное поле—очень сильное поле—экстремальное поле», которая достаточна для наших статистических исследований. Если сравнить средние по всем фазам величины  $B_s$ , полученные по расщеплению линий в неполяризованном спектре (метод Матиса), с модельными, построенными с использованием двух фазовых зависимостей  $B_e(\Phi)$  и  $B_s(\Phi)$ , то различие находится в пределах  $5\%$  [1]. Это те случаи, когда нет необходимости использовать угол  $i$ .

В таблице 1 приводятся физические параметры исследованных звезд, а в таблице 2 — параметры полученных нами магнитных моделей. Условия моделирования и особенности звезд описываются далее отдельно для каждого объекта. Во втором столбце таблицы 1 даны ссылки на статьи с измерениями магнитного поля  $B_e$ .  $P$  — период вращения,  $T_{\text{эф}}$  — эффективная температура,  $M_b$  — болометрическая звездная величина,  $R/R_\odot$  — радиус звезды в единицах солнечного радиуса,  $i$  — угол наклона оси вращения к лучу зрения наблюдателя.

Без ссылки на источник — наши оценки. В таблице 2 первая колонка содержит номер звезды HD и обозначение метода измерения: H — по линиям водорода, metal — по линиям металлов. Вторая колонка — знак монополя, третья и четвертая — координаты монополя внутри звезды,  $B_p$  — величина поля на магнитных полюсах,  $B_s$  — среднее поверхностное поле,  $\alpha$  — угол между осью диполя и плоскостью экватора вращения звезды,  $\Delta a$  — величина смещения монополя из центра в единицах радиуса звезды.

## 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ

### 2.1. HD 35298 (He-w)

В таблице 1 указаны все необходимые параметры и их источники. Измерения эффективного магнитного поля  $B_e$  были сделаны по линиям металлов. Радиус и угол наклона оси диполя к лучу зрения вычислены по этим параметрам и известной формуле  $v = 50.6 R/P$ . В пределах ошибок измерений полученная модель соответствует центральному диполю. На рис. 1а–1с показаны, соответственно, фазовая зависимость эффективного магнитного поля  $B_e(\Phi)$ , где точками обозначены наблюдаемые величины, а сплошной кривой — модельная зависимость, затем модельная фазовая зависимость среднего поверхностного магнитного поля  $B_s(\Phi)$  и отличия наблюдаемых величин  $\Delta B_e$  от модельной зависимости. Видно, что они не превышают  $3\sigma$  ( $\sigma = 320$  Гс). За начальную фазу мы приняли момент самого первого наблюдения JD 2455554.300. Период вращения  $P = 1^d 85457$  взят из работы [18]. Принятая начальная фаза не точно попадает на момент экстремального поля, она происходит на  $0.005$  ( $2^\circ$ ) раньше. Параметры модели приведены в таблице 2. Из них видно, что диполь лежит практически в плоскости экватора вращения, угол между осью диполя и плоскостью экватора вращения  $\alpha = 2^\circ$ .  $B_p$  — это величина поля на магнитных полюсах. Величина среднего поверхностного магнитного поля вычисляется как  $B_s = (B_{s(\text{max})} + B_{s(\text{min})})/2 = 2868$  Гс. Если взять среднее арифметическое по всем данным, то получается  $B_s^* = 2955$  Гс. Эти величины обычно слегка различаются.

### 2.2. HD 35456 (He-w)

Необходимые параметры для моделирования приведены в таблице 1. Величины  $B_e$ , полученные по линиям водорода, взяты из рисунка в работе [9]. Вследствие приблизительности данных принята модель центрального диполя, параметры которой приведены в таблице 2. По данным таблицы 1 вычислен относительный радиус и угол наклона оси вращения к лучу зрения.

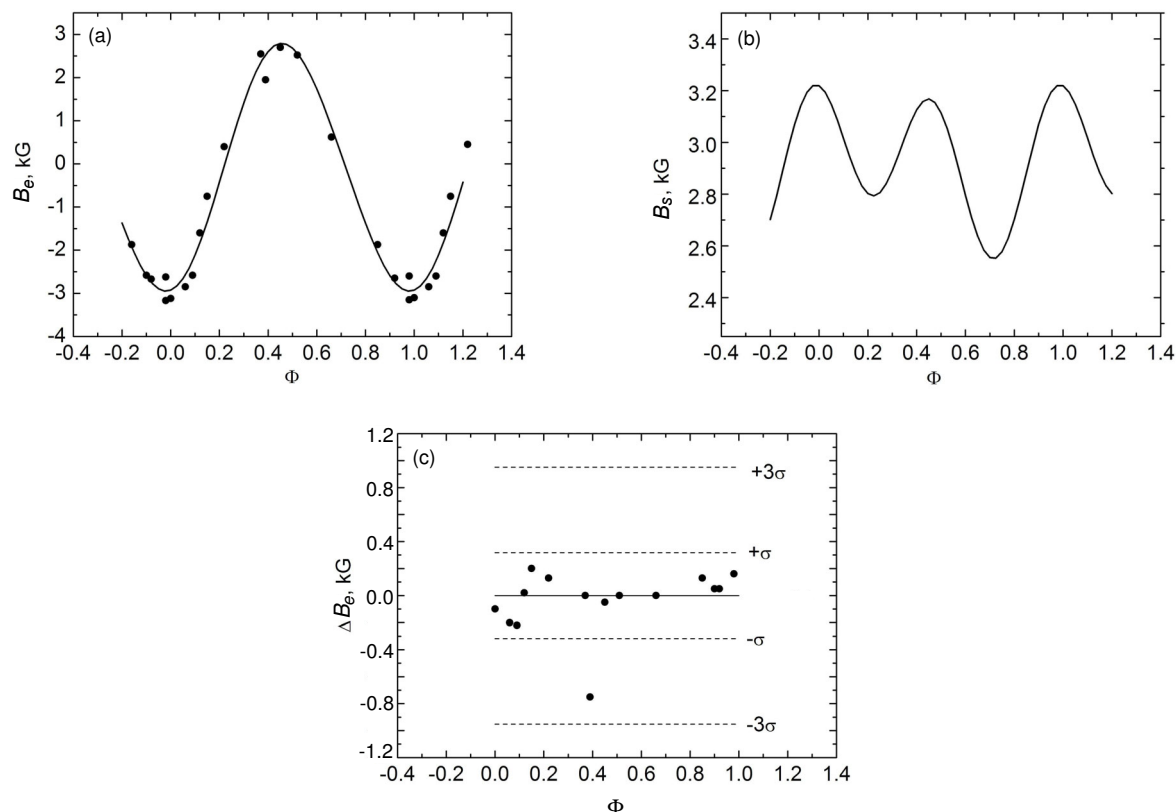


Рис. 1. Магнитная модель звезды HD 35298: (а) наблюдаемая зависимость  $B_e(\Phi)$  (точки) и модельная зависимость (линия); (б) модельная зависимость  $B_s(\Phi)$ ; (с) отклонения измеренных величин  $B_e$  от модельных.

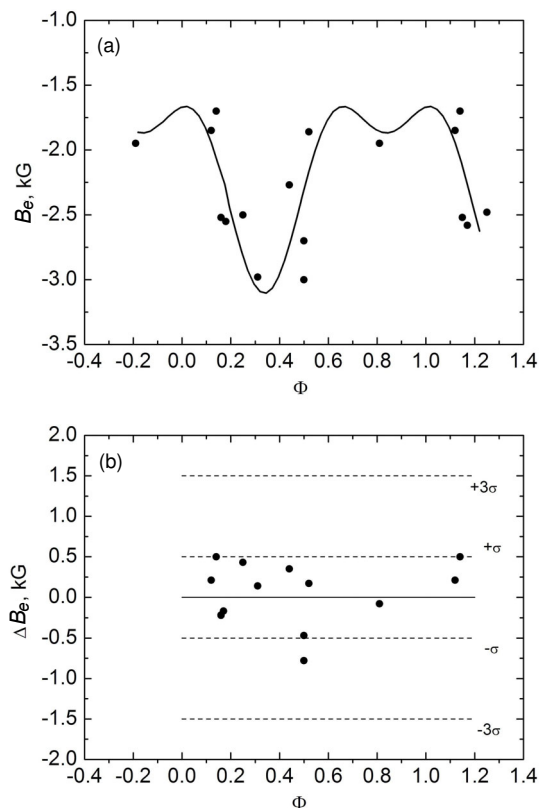
### 2.3. HD 36485 (He-г)

Это горячая звезда, все необходимые параметры для нее даны в таблице 1. Измеренные по линиям металлов величины  $B_e$  взяты из работы [10]. Момент нулевой фазы в этой работе JD 2448298.86. Разброс измеренных величин магнитного поля велик, а ошибки измерений в среднем составляют  $\pm 500$  Гс. Расположение точек на фазовой зависимости напоминает случай двухдипольной модели звезды HD 45583 [25]. Поэтому, несмотря на недостаточное количество измерений, мы попытались применить эту модель к HD 36485. Наблюдаемая и модельная фазовые зависимости для двухдипольной модели показаны на рис. 2. Видно, что они хорошо соответствуют друг другу, и разброс измеренных величин относительно модельной зависимости не превышает  $1.5\sigma$  (рис. 2b). Параметры модели приведены в таблице 2. На рис. 3а приведена меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности звезды, а на рис. 3б — схема расположения монополей внутри звезды.

Несколько замечаний. Смещение монополей из центра на величину до  $\Delta a = 0.3$  сделано для того, чтобы получить наблюдаемую амплитуду изменений. При меньшем смещении амплитуда меньше. Смещение отрицательного монополя на долготе

$\lambda = 290^\circ$  пришлось уменьшить для лучшего совпадения модельной кривой с наблюдаемой точкой на фазе  $\Phi = 0.81$ . Оба диполя находятся практически в плоскости экватора вращения под углом  $\alpha = 5^\circ$ . Малый угол типичен для большинства магнитных звезд. На рис. 3а приведена меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности, а на рис. 3б — схема расположения диполей, если смотреть вдоль оси вращения. Картина распределения поля практически типичная для двухдипольной конфигурации [7]. Значительный разброс измерений может быть следствием влияния «магнитной пятнистости» [3, 4] звезды. Ее относительный радиус  $R/R_z = 1.2$  (относительно ее радиуса на ZAMS), т.е. звезда недавно вышла на ZAMS, и степень релаксации поля (поверхностной неоднородности) оказывается еще незначительной, так как возраст эволюционным трекам, равен  $\lg t = 6.23$ . Как видно из таблицы 2, величина среднего поверхностного поля значительна, но она типична для звезд с  $R/R_z = 1.2$  [3, 4]. Таким образом, звезда HD 36485 является типичной магнитной звездой главной последовательности с полем двухдипольной конфигурации, каких насчитывается около 17%.

На рис. 3а показано распределение магнитного

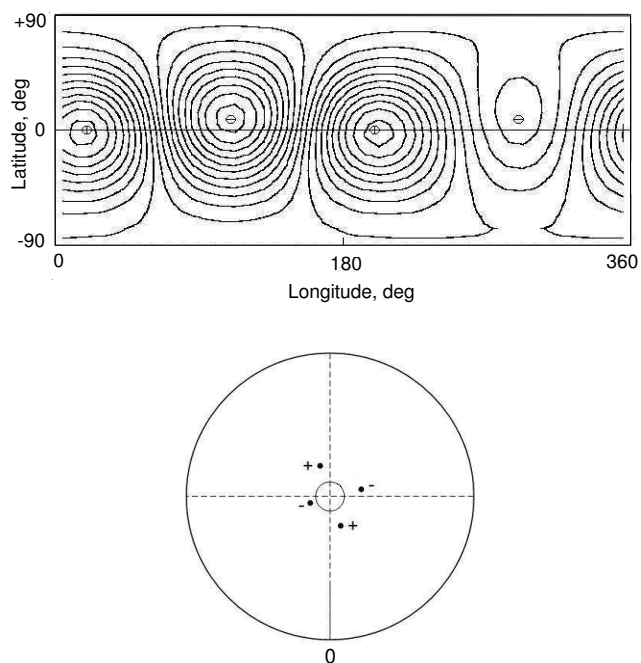


**Рис. 2.** Магнитная модель звезды HD 36485: (а) наблюдаемая зависимость  $B_e(\Phi)$  (точки) и модельная зависимость (линия); (б) отклонения измеренных величин  $B_e$  от модельных.

поля по поверхности. Хорошо видно распределение магнитных полюсов вдоль экватора. Более слабый максимум на долготе  $290^\circ$  происходит вследствие меньшего отклонения монополя от центра звезды.

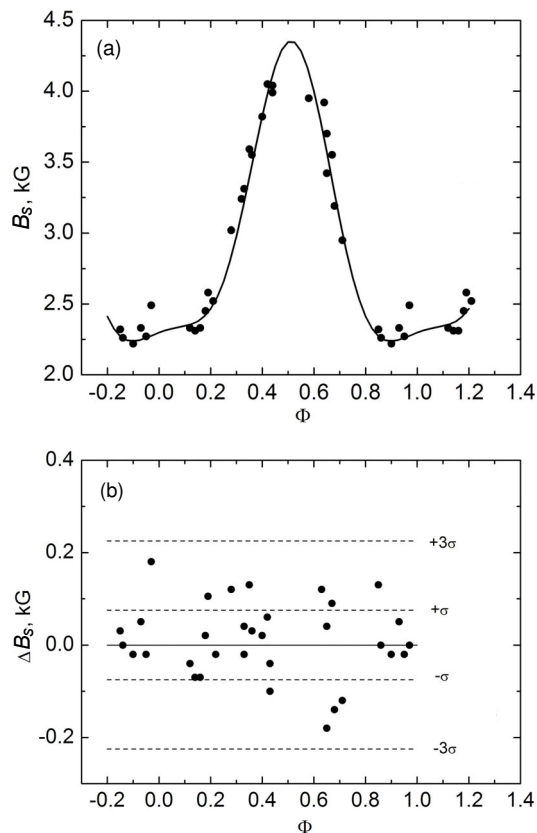
#### 2.4. HD 59435 (SrCrEu)

Магнитное поле измерено в работах [11, 12]. Температура звезды  $T_{\text{eff}} = 8600$  К [11], абсолютная звездная величина  $M_V = -0.4$  [26], откуда болометрическая величина  $M_b = -0.3$ . Величина  $\lg g = 3.51$  из работы [11] соответствует абсолютной болометрической величине  $M_b = +0.2$ , откуда средняя величина  $M_b = -0.05$ . Это значит, что радиус звезды  $R = 4 R_\odot$ . По результатам работ [11, 12] принимаем угол наклона оси вращения к лучу зрения  $i = 88^\circ$ . Поскольку  $P = 1360^d$  и  $\sin 88^\circ \approx 1$ , то  $v \sin i = 0.15$  км с $^{-1}$ . Таким образом, звезда относится к медленным магнитным ротаторам. Относительный радиус получается равным  $R/R_z = 2.3$ , т.е. звезда уходит с главной последовательности. Действительно, по эволюционным трекам ее возраст  $\lg t = 8.8$ . На рис. 4а точками показаны измеренные величины среднего поверхностного магнитного поля  $B_s$ . Начальная фаза



**Рис. 3.** Магнитная модель HD 36485: сверху — меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности; внизу — схема распределения диполей (вид со стороны оси вращения). Круг в центре — конвективное ядро.

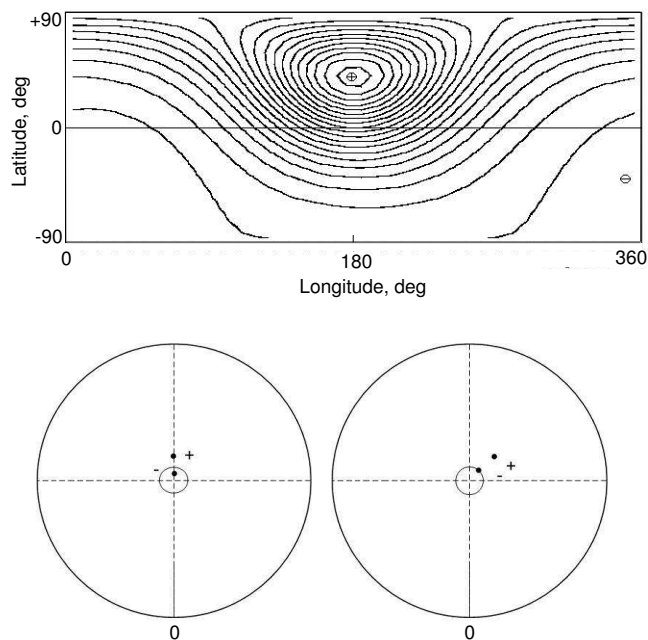
приходится на JD 2450580 + 1360 [12]. Ошибки измерений исключительно малы и в среднем равны  $\sigma = \pm 75$  Гс. В пределах  $3\sigma$  наблюдаемые величины  $B_s$  совпадают с модельной фазовой зависимостью (рис. 4б) при предположении диполя, смещенного на  $\Delta a = 0.20 R_*$  вдоль оси в сторону положительного монополя. Параметры модели приведены в таблице 2. Интересно, что в отличие от большинства звезд угол наклона оси диполя к плоскости экватора вращения у этой звезды равен  $\alpha = 50^\circ$ . В данном примере мы видим смещение диполя не только вдоль оси, но и слегка поперек. Несмотря на очень большой возраст, асимметрия магнитного поля относительно центра звезды остается большой. Мелкие неоднородности поля за такое время жизни должны уже исчезнуть. Очевидно, что вследствие медленной релаксации крупных структур положение и ориентация диполей остается неизменной, она происходит в начальные периоды формирования звезд. В верхней части рис. 5 хорошо видна асимметрия распределения поля по поверхности. Схема положения диполя внутри звезды показана в нижней части рис. 5. Слева показан вид со стороны оси вращения, а справа — в фазе 0.25, когда диполь находится в плоскости рисунка.



**Рис. 4.** Магнитная модель HD 59435: (a) наблюдаемая зависимость  $B_s(\Phi)$  (точки) и модельная зависимость (линия); (b) отклонения измеренных величин  $B_s$  от модельных.

### 2.5. HD 70331 (Si)

Для моделирования этой звезды использованы измерения [13], выполненные по линиям металлов. Абсолютная болометрическая величина  $M_b$  определена по параметру  $\beta$  многоцветной фотометрии, температура  $T_{\text{eff}}$  — по параметру  $X$  многоцветной фотометрии по методике, описанной в работе [21]. Для этой звезды неизвестна величина  $v \sin i$ , необходимая для вычисления угла  $i$ . Однако имеется одно измерение  $B_e = -2819 \pm 184$  Гс [27], которое можно использовать для приблизительной оценки этого угла. Выбирается такая модель, при которой вычисленная фазовая зависимость  $B_s(\Phi)$  наилучшим образом совпадала бы с наблюдениями и одновременно вычисленная зависимость  $B_e(\Phi)$  проходила бы через измеренную точку  $B_e$ . В том случае, если есть обе фазовые зависимости, получаются два решения — с малым и большим углом  $i$ . Выбирается наиболее вероятный вариант по разным признакам. Наименьшие отклонения наблюдаемых величин  $B_s$  от модельных получаются в случае смещенного поперек оси диполя и малого угла  $i = 27^\circ$ . Модельные зависимости  $B_s(\Phi)$  и



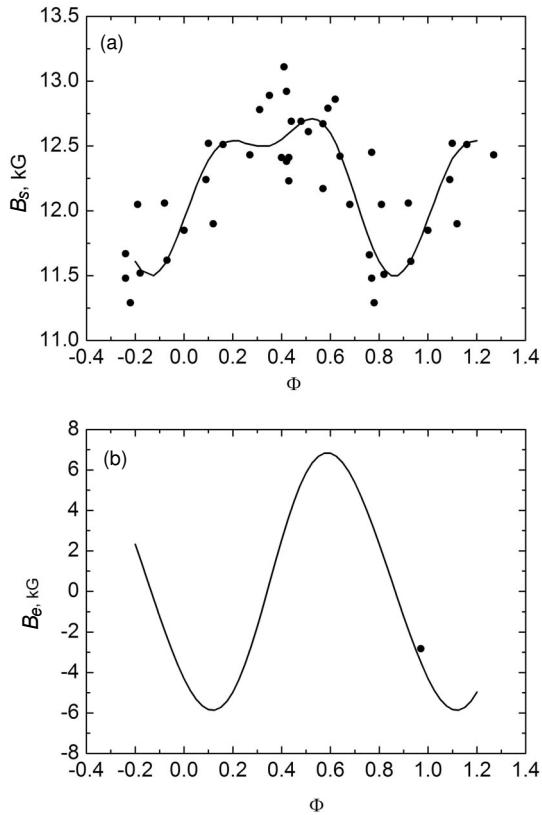
**Рис. 5.** Магнитная модель HD 59435. Вверху — меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности; внизу — положение диполя внутри звезды: слева вид со стороны оси вращения, справа вид со стороны экватора вращения, фаза 0.25.

$B_e(\Phi)$  показаны на рис. 6а и 6б. Измеренное поле  $B_e$  отклоняется от модельной зависимости

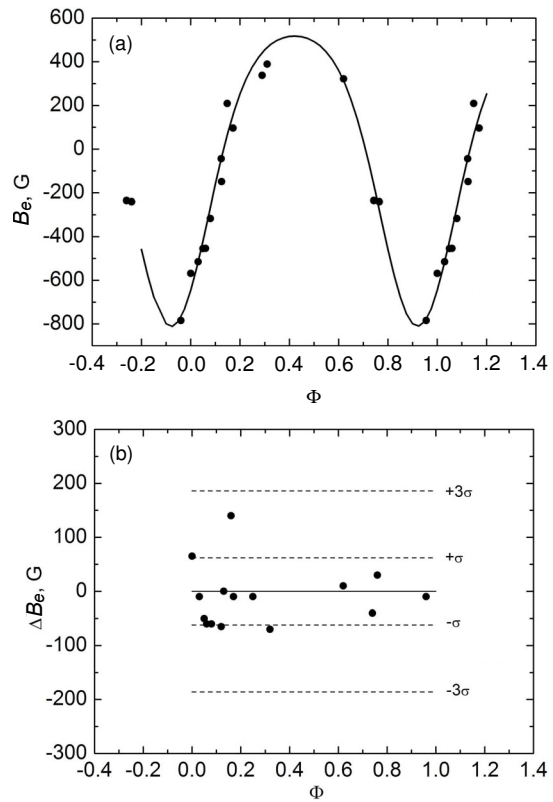
не более чем на  $3\sigma$ . Из таблицы 2 видно, что диполь находится практически в плоскости экватора вращения, так как угол  $\alpha = 2^\circ$ , причем центр диполя смещен из центра звезды поперек оси на величину  $\Delta a = 0.03 R_*$ . Угол наклона оси вращения к лучу зрения невелик, поэтому магнитные полюса находятся практически на краю диска звезды. Возможно, это обстоятельство является причиной большого разброса измерений. Не исключено влияние мелкомасштабных неоднородностей магнитного поля [3, 4].

### 2.6. HD 90044 (Si+)

Для этой звезды использованы наблюдения [14, 15], выполненные по линиям водорода. За нулевую фазу принято первое наблюдение в [14]: JD 2446894.663 + 4.379000. Для вычисления угла наклона звезды принята температура  $T_{\text{eff}} = 9780$  К и  $M_b = +0.1$  [21], откуда  $R = 3.0 R_\odot$ . Из  $v \sin i = 15$  км с $^{-1}$  [15] получаем угол  $i = 26^\circ$ . В нашем распоряжении всего одиннадцать измерений магнитного поля  $B_e$ , поэтому строилась простейшая модель центрального диполя. Параметры модели приведены в таблицах 1 и 2. Ошибки измерений в работе [14] составляют в среднем



**Рис. 6.** Магнитная модель HD 70331: (а) наблюдаемая зависимость  $B_s(\Phi)$  (точки) и модельная зависимость (линия); (б) модельная зависимость  $B_e(\Phi)$  (линия) и одно измерение (точка).



**Рис. 7.** Магнитная модель HD 101412: (а) наблюдаемая зависимость  $B_e(\Phi)$  (точки) и модельная зависимость (линия); (б) отклонения измеренных величин  $B_e$  от модельных.

$\pm 400$  Гс, а в [15] —  $\pm 300$  Гс. Отклонения отдельных измерений от модельной фазовой зависимости находятся в пределах  $3\sigma$ . Ввиду малого числа измерений невозможно искать какие-либо особенности строения магнитного поля.

### 2.7. HD 101412 ( $A_e/B_e$ )

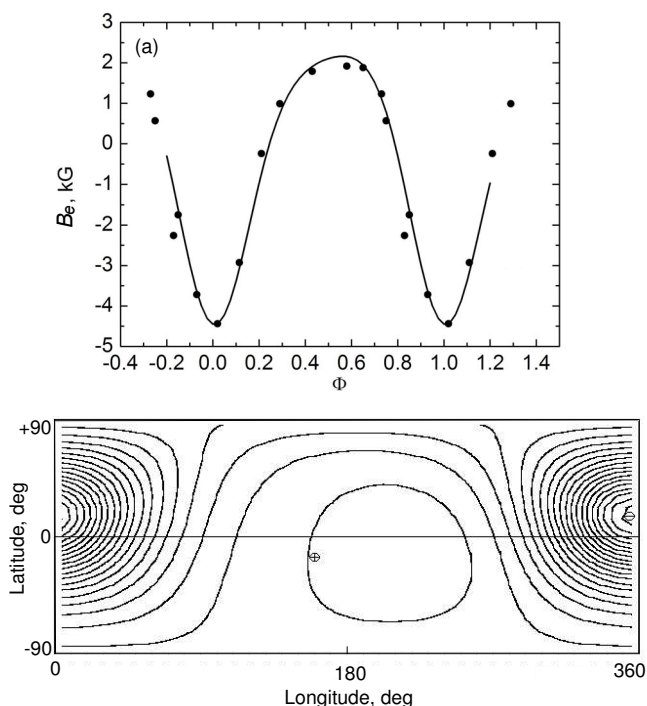
Измерения  $B_e$  выполнены по линиям водорода и по линиям металлов в работе [20]. Угол наклона звезды определен там же  $i = 80^\circ \pm 7^\circ$ . Начальная фаза периода принята как JD 2452792.4 + 42.076. Звезда HD 101412 для нас интересна прежде всего тем, что она находится в стадии эволюции до главной последовательности. По линиям водорода эффективная температура определяется как  $T_{\text{eff}} = 8800$  К [24]. Наши оценки по спектральному классу SpMK = B9.5 V приводят к  $T_{\text{eff}} = 10300$  К, по  $UBVRI$ -фотометрии  $T_{\text{eff}} = 9500$  К, откуда средняя величина  $T_{\text{eff}} = 9500$  К. Если предположить, что звезда близка к ZAMS, то это соответствует  $M_b = +1.75$ ,  $R = 1.6 R_\odot$  и  $t = 10^7$  лет.

Наилучшим образом модельная фазовая зависимость (H) соответствует наблюдательным данным при предположении диполя, смещенного вдоль

оси в сторону отрицательного монополя на величину  $\Delta a = 0.13 R_*$ , угол  $\alpha = 13^\circ$ . Средняя ошибка измерений очень мала:  $\sigma = 62$  Гс. На рис. 7а точками показана наблюдаемая по линиям водорода фазовая зависимость  $B_e(\Phi)$ , а линией обозначена модельная зависимость. На рис. 7b даны отличия измеренных величин  $B_e$  от модельной зависимости, они все меньше  $3\sigma$ .

Наблюдаемая фазовая зависимость, полученная по линиям металлов, хорошо моделируется при предположении центрального диполя с параметрами, близкими (кроме  $B_p$ ) предыдущей модели (таблица 2). Диполь в обоих случаях лежит практически в плоскости экватора вращения. В литературе неоднократно обсуждалась проблема зависимости формы фазовых зависимостей от метода измерений поля [28, 29]. Характерный пример — 52 Her [30]. В данном случае очевидно влияние особенностей распределения химических элементов по поверхности и в глубину. Однако надо заметить, что распределение измерений по фазам периода недостаточно равномерно.

Кроме HD 101412 сейчас известны еще две магнитные  $A_e/B_e$ -звезды Хербига (HD 200775,



**Рис. 8.** Магнитная модель HD 133880: сверху — наблюдаемая зависимость  $B_s(\Phi)$  (точки) и модельная зависимость (линия); внизу — меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности.

V381 Ori), у которых достаточно сильное дипольное поле [7]. Характерная черта всех трех объектов состоит в том, что их поле  $B_s$  относительно типичных магнитных звезд невелико. Сильных полей у звезд Ae/Be Хербига нет [31]. В процессе эволюции дипольное магнитное поле начинает расти только после попадания звезды на ZAMS, когда она освобождается от окружающего ее аккрецирующего газопылевого облака, и поверхность звезды начинает стабилизироваться [4]. Мелкие неоднородности магнитного поля, возникшие вследствие ранних нестационарных явлений и затем вследствие более поздних взаимодействий с активным аккреционным диском, постепенно исчезают, и дипольная составляющая проявляется все больше [4]. Первые две звезды видны с полюса вращения, поэтому наблюдаются области, менее подвергавшиеся аккреционным воздействиям. Это возможная причина, почему дипольное поле у некоторых Ae/Be-звезд проявляется раньше других. Но HD 101412 явно не такая, она видна через толщу аккреционного диска, если верить углу  $i = 80^\circ$ , найденному в работе [16]. То, что сквозь аккреционный диск хорошо видны поверхностные спектральные линии, говорит либо о том, что диска фактически нет, т.е. звезда уже вышла на главную последовательность, либо угол  $i$  на самом деле существенно меньше. Угол  $i$  определен

в работе [16] по величине  $v \sin i = 4 \pm 1 \text{ км с}^{-1}$ . В пределах ошибок  $3\sigma$  можно получить угол  $i = 13^\circ$ , а это значит, что звезда HD 101412 может быть видна практически с полюса, как и упомянутые выше Ae/Be-звезды Хербига HD 200775 и V 381 Ori. В таком случае мы видим приполярные области, которые не подвергаются возмущающим действиям со стороны активного аккреционного диска, и магнитная структура практически не искажена. У звезд, которые не имеют столь выгодной ориентации, дипольная структура становится заметной позднее, когда они освобождаются от окружающего их аккрецирующего газопылевого облака и диска.

### 2.8. HD 133880 (Si)

Для этой звезды есть только двенадцать измерений по линиям водорода [14], но они имеют достаточно высокую точность измерений  $\sigma = 170 \text{ Гс}$  для надежного моделирования. Максимум отрицательного поля попадает на  $\text{JD } 2445472.013 + 0.877485$  [14]. Угол наклона звезды находим из следующих данных: по *UBV*-фотометрии и спектральному классу  $\text{SpMK} = \text{B8 IV}$ , средняя величина  $T_{\text{eff}} = 12000 \text{ К}$ ; по параметру  $\beta$  многоцветной фотометрии величина  $M_b = -0.51$  и  $R/R_\odot = 3.0$ ; в работе [28]  $v \sin i = 103 \text{ км с}^{-1}$ , откуда  $i = 37^\circ$ .

Измеренные данные показаны в верхней части рис. 8 кружками. Видно, что отрицательный экстремум острый, а положительный — тупой. Из этого следует, что диполь смещен в сторону отрицательного заряда. Кроме того, положительный максимум несимметричен. Это свидетельствует о том, что диполь смещен не только вдоль оси, но и поперек. Модельная фазовая зависимость  $B_s(\Phi)$  показана в верхней части рис. 8 сплошной линией. Подбор параметров показал, что, действительно, диполь смещен вдоль и поперек оси, а это приводит к распределению поля по поверхности, показанному в нижней части рис. 8. Поскольку мы имеем дело не с центральным диполем, координаты магнитных полюсов не совпадают с координатами магнитных зарядов. Положение диполя такое же, как у звезды HD 59435, только он смещен в сторону другого знака.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Накапливая данные об особенностях структур магнитных полей химически пекулярных звезд, мы сможем выяснить условия их эволюции в разных фазах: на стадии гравитационного коллапса, в нестационарной фазе и в период эволюции на горизонтальном треке главной последовательности. В каждой из них магнитные структуры, как



предполагается, подвергаются разным воздействиям. Например, в нестационарной фазе возникает запутывание силовых линий, в фазе Ae/Be Хербига аккреция искажает поле во внешних слоях, и возможно выпадение крупных фрагментов. Перечислим кратко особенности рассмотренных объектов.

(А) Интерес представляет звезда HD 36485, имеющая двухдипольную структуру поля. Похожий случай — звезда HD 45583 [25]. Фактически это искаженный квадруполь, но это не тот математический квадруполь, который предполагают сторонники магнитного динамо или который описывает структуру дипольно-квадрупольной конфигурацией. Произвольная ориентация диполей относительно друг друга позволяет предположить, что в начальных фазах эволюции, в процессе коллапса, протозвезда сформировалась из двух крупных намагниченных фрагментов. Трудно предположить, что могут быть условия для этого в более поздний период, в стадии Ae/Be Хербига. В этот период, когда в центральных областях отсутствует какая-либо нестационарность, достаточно времени только для того, чтобы дипольное поле начало формироваться.

(В) Звезда HD 101412 интересна тем, что ее относят к классу Ae/Be Хербига. Несмотря на то что у звезд этого типа магнитные поля обычно порядка 100 Гс, эта звезда имеет  $B_p = 1235$  Гс, а среднее поверхностное поле  $B_s = 535$  Гс. Как было сказано выше, она может быть видна с полюса вращения, и наблюдаются области, не испытывающие аккреционных воздействий, поэтому они стабильны. В стабильных областях релаксация сложных структур могла пройти раньше, чем у звезд, повернутых к наблюдателю со стороны экватора. На горизонтальном участке эволюционного трека до главной последовательности молодая звезда испытывает гравитационное сжатие в отсутствие конвекции. Это значит, что после первичной, крайне нестабильной, стадии коллапса в центральных частях звезды наступают достаточно стабильные условия, при которых первоначально запутанные и сложные магнитные конфигурации начинают исчезать вследствие неустойчивости. Остаются только долгоживущие крупные структуры. За время эволюционного движения в сторону главной последовательности достаточно времени, чтобы дипольное поле начало формироваться. Не исключено, что HD 101312 уже практически освободилась от окружающей газопылевой структуры и стала нормальной звездой главной последовательности, как HD 200775 [7]. В этой стадии эволюции (на ZAMS) у звезд дипольное магнитное поле начинает быстро расти вследствие исчезновения поверхностных мелкомасштабных структур [3, 4], возникших вследствие сильной аккреции и взаимодействия с активным диском.

(С) Три звезды — HD 59435, 70331, 133880 — имеют в той или иной степени смещенные диполи. Максимальное смещение, равное  $0.2 R_*$ , наблюдается у HD 59435 и HD 133880. Характерно, что диполь у них смещен не только вдоль оси, но и слегка поперек. Столь сильные деформации поля могли происходить либо в результате коллапса неоднородных структур в начальных фазах эволюции, либо вследствие выпадения крупных аккреционных масс со стороны активного диска в стадии Ae/Be Хербига. При дисковой аккреции нарушение магнитных структур вероятнее на экваторе.

(D) Центральные-дипольные структуры мало интересны: это HD 35298, 35456, 36485, 90044. Относительно однородный коллапс в начальных стадиях эволюции и отсутствие сильных аккреционных влияний в более поздних стадиях создают условия для возникновения максимума напряженности поля в центре звезды, где максимальная плотность. Интересно, что и при таких условиях диполи у трех из них оказались в плоскости экватора вращения. Ориентация происходит в период коллапса или в стадии Ae/Be Хербига? Это одна из главных проблем магнитных звезд.

(E) Приведенные рассуждения показывают, что исследования звездного магнетизма могут прояснить проблему звезд Ae/Be Хербига.

(F) На примере звезды HD 101412 хорошо видно влияние метода измерений. По линиям водорода получается модель диполя, смещенного на  $0.13 R_*$  вдоль оси, а по линиям металлов лучше получается модель центрального диполя. Хотя параметры магнитного поля близки по величине, модели получаются разного типа. Опыт показывает, что предпочтение следует отдавать «водородным» измерениям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 25 (2003).
2. T. G. Cowling, in *The Sun*, Ed. by G. P. Kuiper (Univ. of Chicago Press, Chicago, 1953), Chap. 8, pp. 432–482.
3. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56**, 189 (2013).
4. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56**, 407 (2013).
5. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* (in press).
6. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, *Astronomy Reports* **54**, 156 (2010).
7. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **55**, 189 (2012).
8. I. Yakunin, *Astrophysical Bulletin* **68**, 214 (2013).
9. I. Yakunin, I. Romanyuk, D. Kudryavtsev, and E. Semenko, *Astronomische Nachrichten* **332**, 974 (2011).
10. S. J. Adelman and R. H. Rice, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **136**, 111 (1999).
11. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 33 (2002).

12. F. Leone, D. A. Bohlender, C. T. Bolton, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **401**, 2739 (2010).
13. N. Morrel and H. Levato, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **75**, 965 (2002).
14. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astron. and Astrophys.* **430**, 1143 (2005).
15. G. A. Wade, P. North, G. Mathys, and S. Hubrig, *Astron. and Astrophys.* **314**, 491 (1996).
16. G. A. Wade, G. Mathys, and P. North, *Astron. and Astrophys.* **347**, 164 (1999).
17. G. Mathys, S. Hubrig, and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **123**, 353 (1997).
18. S. Bagnulo, M. Landi Degl'Innocenti, M. Landolfi, and G. Mathys, *Astron. and Astrophys.* **394**, 1023 (2002).
19. D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astron. and Astrophys.* **269**, 355 (1993).
20. F. Leone and G. Catanzaro, *Astron. and Astrophys.* **365**, 118 (2001).
21. S. Hubrig, Z. Mikulášek, J. F. González, et al., *Astron. and Astrophys.* **525**, L4 (2011).
22. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **352**, L5 (1990).
23. S. Hubrig, M. Schöller, I. Savanov, et al., *Astronomische Nachrichten* **331**, 361 (2010).
24. P. North, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **55**, 259 (1984).
25. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 338 (2013).
26. A. E. Gomez, X. Luri, S. Grenier, et al., *Astron. and Astrophys.* **336**, 953 (1998).
27. G. Mathys and S. Hubrig, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 475 (1997).
29. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **42**, 421 (1980).
29. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 78 (2013).
30. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 15 (2003).
31. Yu. V. Glagolevskij and G. A. Chountonov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 105 (1998).

## Magnetic Field Structure and Evolution Features of Selected Stars. I.

Yu. V. Glagolevskij

Using the magnetic dipole method, magnetic field models of eight stars were built in order to obtain additional information about the features of the magnetic field structures in CP stars. These data are necessary to clarify the conditions of star formation in the early stages of stellar evolution. We noticed a large variety of initial conditions that lead to a strong scatter of parameters of magnetic stars and magnetic structures.

Keywords: *stars: magnetic field—stars: chemically peculiar—stars: evolution*