

УДК 524.35-337

## МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СР-ЗВЕЗД. HD18296, HD19832, HD22470, HD24712

© 2010 Ю. В. Глаголевский

*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 30 июня 2009 г.; принята в печать 1 сентября 2009 г.

Проведено моделирование магнитного поля четырех магнитных звезд по опубликованным в литературе измерениям продольного магнитного поля  $V_e$ . Все четыре звезды имеют структуру магнитного поля, близкую к полю находящегося в центре звезды диполя. К сожалению, количество измерений у всех четырех звезд недостаточно для точного определения параметров, поэтому не удалось установить имеется ли смещение диполя в пределах точности его определения  $\Delta a \approx 0.1$  в долях радиуса звезды. Данные этой работы подтверждают мнение, что результат моделирования сильно зависит в первую очередь от точности знания величины угла наклона оси вращения звезды  $i$ .

Ключевые слова: *звезды — строение и эволюция*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Этой работой мы продолжаем исследование крупномасштабных структур магнитных полей химически пекулярных (СР) звезд. Применена разработанная нами методика “магнитных монополей”, изложенная наиболее подробно в [1]. Для моделирования используются опубликованные фазовые зависимости продольного магнитного поля  $V_e$ , а иногда и среднего поверхностного магнитного поля  $V_s$ , если они известны. Самая простая модель — это модель диполя, помещенного в центре звезды. Результат моделирования сильно зависит от точности измерений. Если она достаточна, имеется возможность получить более определенные сведения о положении диполя внутри звезды. Во многих случаях одним диполем не удается описать наблюдательные данные и приходится предполагать наличие двух и более диполей внутри звезды. Конечно, надо иметь в виду, что применяемая методика дает только самое первое, приблизительное представление о структуре поля. Если измерений мало или на фазовых зависимостях наблюдается большой разброс, всегда используется простейший вариант центрального диполя. Данные, полученные нами в предыдущих исследованиях, показывают, что многие объекты действительно обладают магнитным полем, хорошо описываемым центральным диполем. Значительное количество звезд имеют структуру поля, описываемую смещенным из центра диполем на величину до  $\Delta a = 0.5–0.6$  радиуса звезды. Между объектами со смещенным и центральным диполем существует, по-видимому, плавный переход. Распределение по  $\Delta a$  трудно получить потому, что при изучении поля многих звезд

заранее предполагалась конфигурация центрального диполя только вследствие малой точности фазовых зависимостей. Важным параметром является наклон оси диполя к оси вращения  $\beta$ . Данные, накопленные к настоящему времени показывают, что диполи ориентированы в первом приближении равновероятно, но этот вывод необходимо подтвердить на основании достаточного количества данных. Наша задача состоит в том, чтобы получить максимально полное представление о накопленном наблюдательном материале по магнитным измерениям с точки зрения структуры магнитных полей.

### 2. HD18296 (21Per)

Эта звезда относится к SrCrEu-типу и обладает заметными магнитной, фотометрической и спектроскопической переменностью. Ее температура  $T_e = 10950$  К [2]. Скорость вращения звезды у разных авторов довольно сильно различается:  $v \sin i = 5$  км/с [3] (по двум оценкам),  $v \sin i = 25$  км/с [4],  $v \sin i = 10$  км/с [5]. Среднее взвешенное равно  $v \sin i = 11 \pm 5$  км/с. Эфемерида Престона [6] соответствует максимуму фотометрических изменений блеска  $JD = 2439491.77 + 2.88422E$ .

Величина радиуса звезды в единицах радиуса Солнца равна  $R = 2.5R_\odot$  [7]. В нашей работе [8] дается близкое этому значению  $R = 2.6R_\odot$ . Отсюда средняя величина  $v = 50.6 \times R/P = 45$  км/с и  $i = 14^\circ \pm 6^\circ$ .

Модель магнитного поля строилась по измерениям продольного поля  $V_e$ , сделанным по линиям

Таблица 1. Параметры магнитного поля HD18296

Знак монополя	Долгота ( $\lambda$ ), °	Широта ( $\delta$ ), °	Поле на полюсах ( $B_p$ ), Гс
+	$36 \pm 5$	$2 \pm 1$	$1580 \pm 400$
–	$216 \pm 5$	$-2 \pm 1$	$1580 \pm 400$

водорода, которые слабо подвержены воздействию неравномерного распределения химических элементов по поверхности. Для этого использовались данные из работ [9, 10], они показаны на Рис. 1а точками. Ввиду того, что разброс точек велик, нет возможности искать точную модель магнитного поля звезды. Поэтому заранее задавалась модель центрального диполя.

Методом наименьших квадратов мы совместили наилучшим образом вычисленное изменение поля  $B_e$  с наблюдаемыми данными  $B_e(\Phi)$ , показанное на Рис. 1а сплошной линией. Вычисленная зависимость среднего поверхностного магнитного поля  $B_s(\Phi)$  представлена на Рис. 1b. Полученные из модели параметры магнитного поля приведены в Табл. 1.

Угол между осью вращения звезды и осью диполя  $\beta = 88^\circ \pm 1^\circ$ , среднее поверхностное магнитное поле  $B_s = (B_s(\max) + B_s(\min))/2 = 890 \pm 200$  Гс. Ошибки, указанные в Табл. 1, показывают насколько изменяются параметры при изменении угла  $i$  на  $\pm 5^\circ$ . При данной конфигурации поля и наклоне звезды эти ошибки для поля на полюсах  $B_p$  оказываются довольно существенными. Ось диполя лежит вблизи плоскости экватора вращения, но не точно в плоскости, потому что отношение амплитуд изменения магнитного поля  $r = 0.65$ , а не 1. Из данных таблицы видно, что экстремумы поля не попадают точно в фазы 0 и 180, а сдвинуты на величину  $+36^\circ$ , вероятно, из-за неточности периода вращения. Измерения, сделанные в работе [9], по-видимому, сдвинуты относительно наших измерений на  $-220$  Гс. По данным работы [10], среднее поверхностное магнитное поле  $B_s = 600-800$  Гс, что близко нашему результату 890 Гс (Рис. 1b).

В работе [11] нами исследовалось распределение ряда химических элементов по поверхности HD18296. Наиболее сильные два “пятна” с избытком редкоземельных элементов и Fe имеют долготу  $0^\circ$  и  $180^\circ$  и широту первое  $-20^\circ$  и второе  $+20^\circ$ , что близко к координатам магнитных полюсов. Характерные радиусы этих пятен составляют  $55^\circ$ . Другие два небольших по диаметру “пятна”, найденные в работе [11], располагаются между большими. Более вероятно, что на самом деле элементы в этих областях концентрируются не в круглых пятнах, а в поясе вдоль магнитного экватора. Меркаторская

карта распределения магнитного поля по поверхности звезды приведена на Рис. 2. Положение двух основных “пятен” химсостава из упомянутой работы обозначено штриховой линией. Некоторое различие по широте магнитного и химического центров может произойти из-за ошибок измерений и из-за другого угла  $i = 40^\circ$ , принятого в работе [11]. Этот результат еще раз показывает, что максимальные химические аномалии наблюдаются вокруг магнитных полюсов. В областях, показанных на Рис. 2, сконцентрированы элементы Ti, Mn, Eu, Gd. Здесь же наблюдается наиболее сильное магнитное поле. Эта звезда относится к слабомагнитным звездам, но несмотря на это, распределение ряда элементов по ее поверхности похоже на распределение у звезд с сильными магнитными полями. Элементы Ca, Si, Sr, Cr, Mg не концентрируются в ограниченных областях поверхности и распределены относительно равномерно [11]. В [11] обсуждается также проблема слишком слабого вторичного максимума фотометрической переменности на фазе 0.5, хотя в случае центрального диполя оба максимума обычно одинаковы. Вероятнее всего у звезды HD18296 отрицательный магнитный полюс виден хуже положительного, что и приводит к неравенству видимости “пятен”. На Рис. 1b видно, что максимум  $B_s$  в фазе 0.5 тоже меньше.

### 3. HD19832 (56Ari)

Звезда относится к Si-типу. Минимум блеска в V-фильтре описывается эфемеридой  $JD = 2437667.728 + 0.72789 E$  [12]. Скорость вращения звезды определялась неоднократно и равна  $v \sin i = 110$  [4], 85 [5] и 128 [7] км/с, среднее значение  $v \sin i = 108$  км/с. Температура  $T_e = 12390$  К, абсолютная болометрическая звездная величина  $M_b = -0.8$ ,  $R = 2.8 R_\odot$  взяты из [2]. Отсюда  $v = 50.6 \times R/P = 194$  км/с и  $i \approx 34^\circ$ .

Измеренные величины продольного магнитного поля  $B_e$  взяты из работы [9]. Разброс точек оказался значительным, поэтому была рассчитана простейшая конфигурация поля, когда диполь находится в центре звезды. Результат приведен в Табл. 2. Оказалось, что фазовая зависимость сдвинута от  $\Phi = 0$  на  $90^\circ$ . На Рис. 3а приведены наблюдаемая зависимость (точки) и вычисленная зависимость (сплошная кривая), которая оказалась

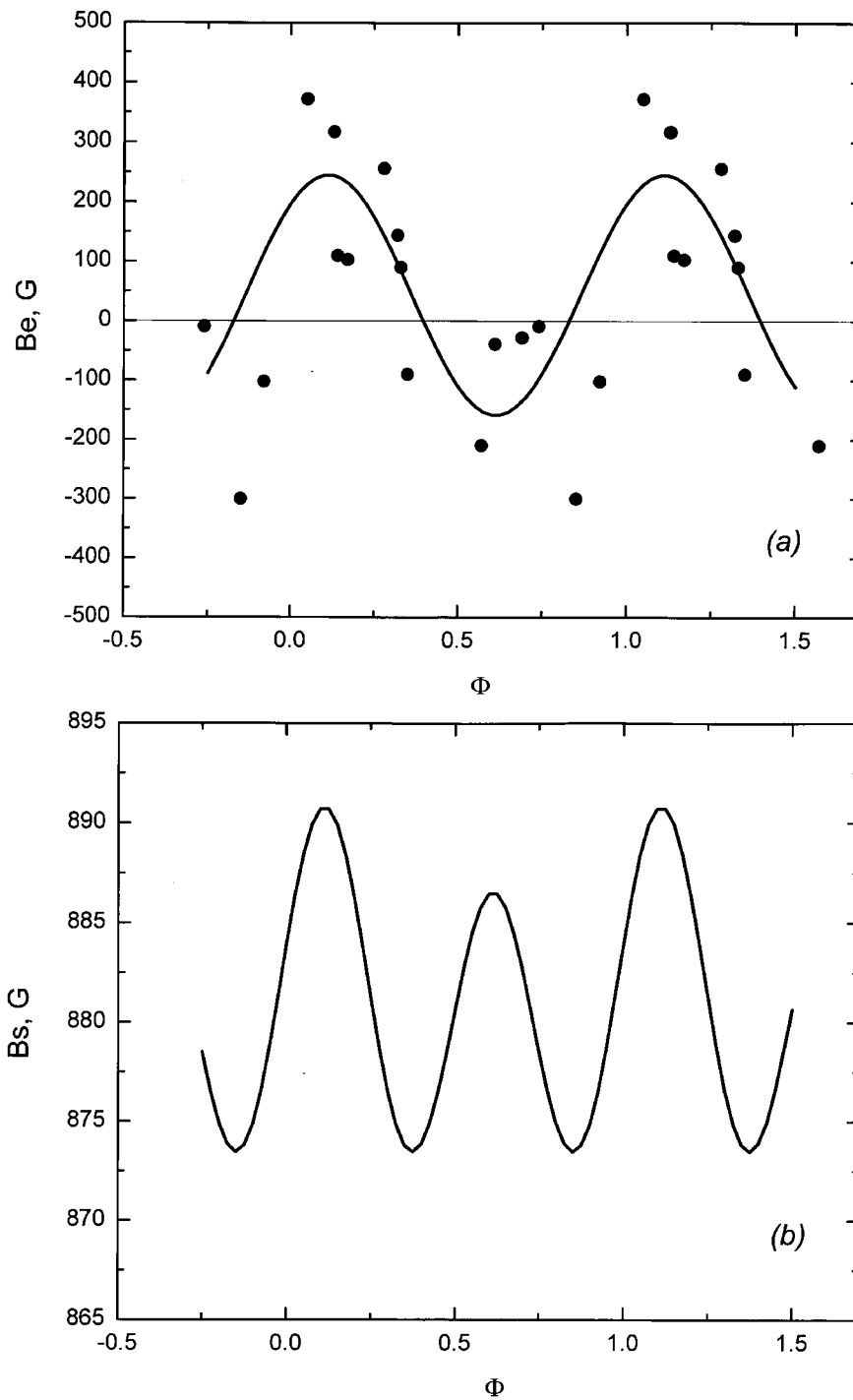


Рис. 1. (a) — фазовая зависимость изменения продольного магнитного поля  $B_e$  звезды HD18296. Кружки — наблюдения, сплошная линия — модельная зависимость. (b) — модельная фазовая зависимость среднего поверхностного магнитного поля  $B_s$  звезды HD18296.

Таблица 2. Параметры магнитного поля HD19832

Знак монополя	Долгота ( $\lambda$ ), $^\circ$	Широта ( $\delta$ ), $^\circ$	Поле на полюсах ( $B_p$ ), Гс
+	$90 \pm 5$	$0 \pm 2$	$840 \pm 80$
-	$270 \pm 5$	$0 \pm 2$	$840 \pm 80$

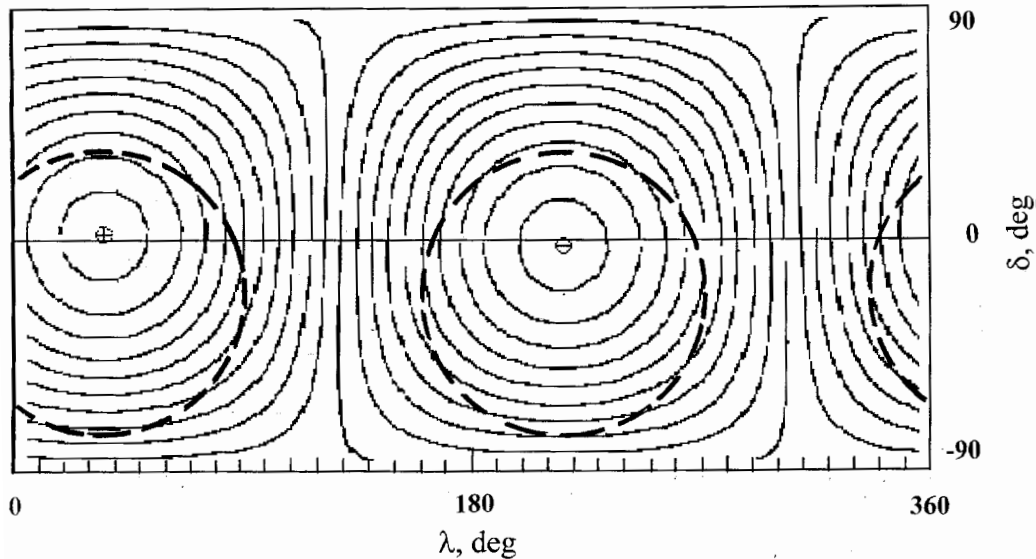


Рис. 2. Меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности звезды HD18296. Штриховые круги — области концентрации химических элементов.

совершенно симметричной относительно  $B_e = 0$  Гс. Модельная фазовая зависимость  $B_s(\Phi)$  приведена на Рис.3б.

Угол  $\beta = 90^\circ \pm 2^\circ$ , среднее поверхностное магнитное поле  $B_s = (B_s(\max) + B_s(\min))/2 = 495 \pm 80$  Гс.

Из приведенных данных видно, что звезда HD19832 принадлежит к числу слабонамагниченных СР-звезд. Отличительной особенностью звезды является замеченный в работе [9] факт, что максимальная концентрация гелия и кремния не совпадают с областями максимальной напряженности магнитного поля, в противоположность тому, что наблюдается у других магнитных СР-звезд. Однако необходимы дополнительные исследования для подтверждения этой особенности.

#### 4. HD22470

Звезда относится к Si-типу. Период вращения установлен не точно, он либо  $P = 0.^d6785$ , либо  $1.^d935$ , из-за чего для необходимых параметров определяются только пределы  $R = (1.75 - 3.5)R_\odot$ ,  $i = 18^\circ - 38^\circ$  [13]. Расчет в этой работе сделан при предположении  $v \sin i = 80$  км/с.

В работе [2] приводятся следующие параметры для HD22470:  $T_e = 13450$  К, абсолютная болометрическая звездная величина  $M_b = -0.95$ , откуда  $R = 2.5R_\odot$ . В соответствии с формулой  $v = 50.6 \times R/P$  получаем  $v = 186$  км/с и  $i = 25^\circ$  при  $v \sin i = 80$  км/с и  $P = 0.^d6785$  (см. ниже).

Эта величина соответствует средним величинам, полученным в работе [13].

Для построения модели использованы измерения продольного поля  $B_e$  из работы [13]. Фазовая зависимость  $B_e(\Phi)$ , построенная с периодом  $P = 0.^d6785$  оказывается ближе к синусоиде, чем с  $P = 1.^d935$ , кроме того, при втором значении периода получается нереальная величина угла  $i > 90^\circ$ . По этой причине вторую величину периода мы не использовали. Вычисленная фазовая зависимость хорошо соответствует наблюдениям (Рис.4а) при предположении модели центрального диполя. На Рис.4б показана расчетная фазовая зависимость  $B_s(\Phi)$ . Основные параметры модели приведены в Табл.3. Ошибки получены при предположении неточности угла  $i$  равной  $\pm 5^\circ$ .

Угол между осью диполя и осью вращения звезды  $\beta = 90^\circ \pm 2^\circ$ , среднее поверхностное магнитное поле  $B_s = (B_s(\max) + B_s(\min))/2 = 2350 \pm 100$  Гс.

#### 5. HD24712

Это холодная звезда SrCrEu-типа с  $T_e = 7200$  К. В работе [2] имеются две оценки абсолютной болометрической звездной величины звезды  $M_b = 2.5^m$  и  $1.9^m$ , где первая величина получена по гиппарховским данным [14], а вторая — по женевской фотометрии. Отсюда  $R = 1.7R_\odot$  и  $R = 2.4R_\odot$  соответственно. Величина  $v \sin i = < 10$  км/с [3, 5], что соответствует оценке Престона  $v = 7$  км/с [15]. По этой величине Престон определил  $i \approx 40^\circ$ ,  $\beta = 30^\circ$ .

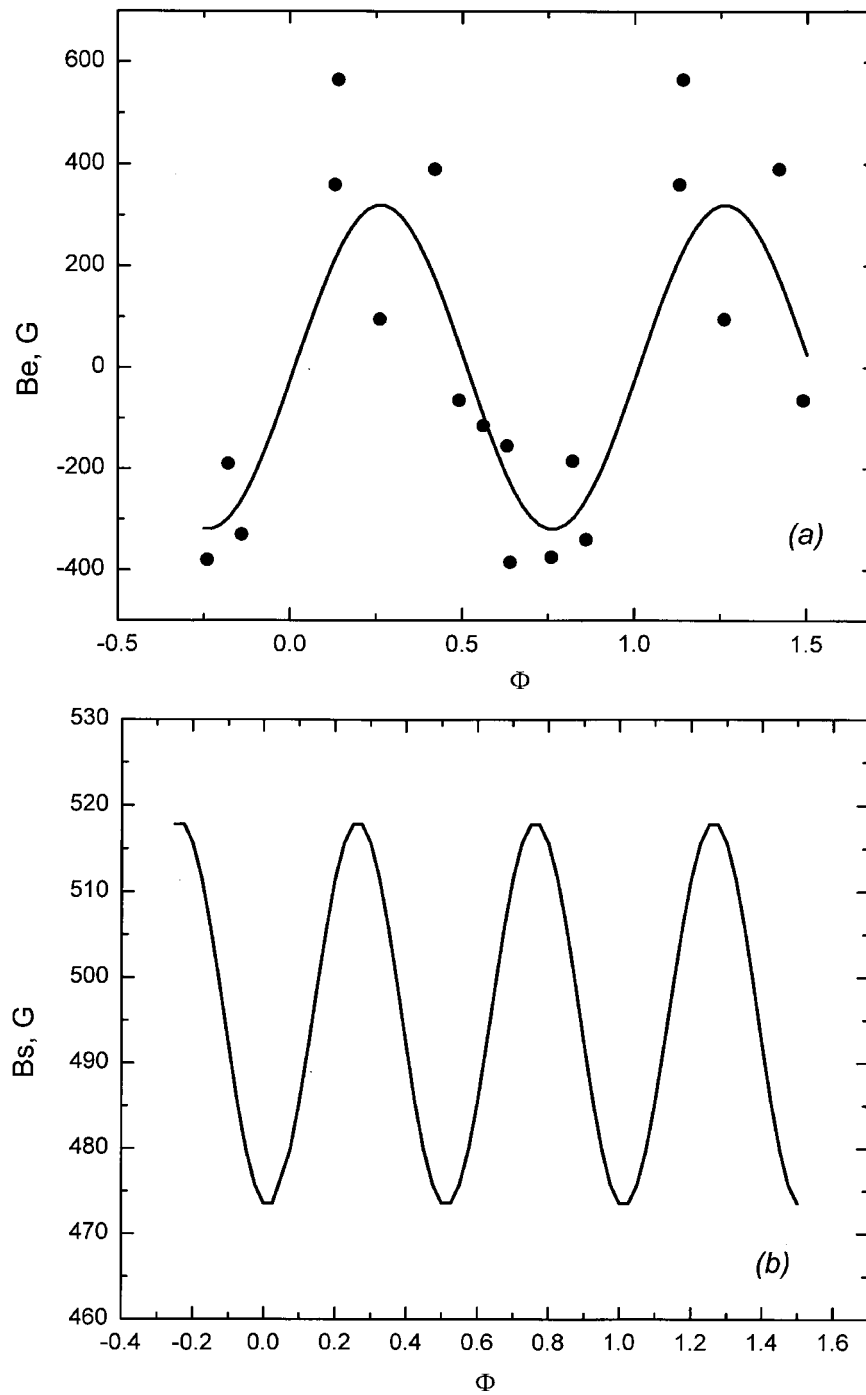


Рис. 3. То же, что на Рис.1, для звезды HD19832.

Таблица 3. Параметры магнитного поля HD22470

Знак монополя	Долгота ( $\lambda$ ), $^\circ$	Широта ( $\delta$ ), $^\circ$	Поле на полюсах ( $B_p$ ), Гс
+	$45 \pm 5$	$0 \pm 2$	$4100 \pm 700$
-	$225 \pm 5$	$0 \pm 2$	$4100 \pm 700$

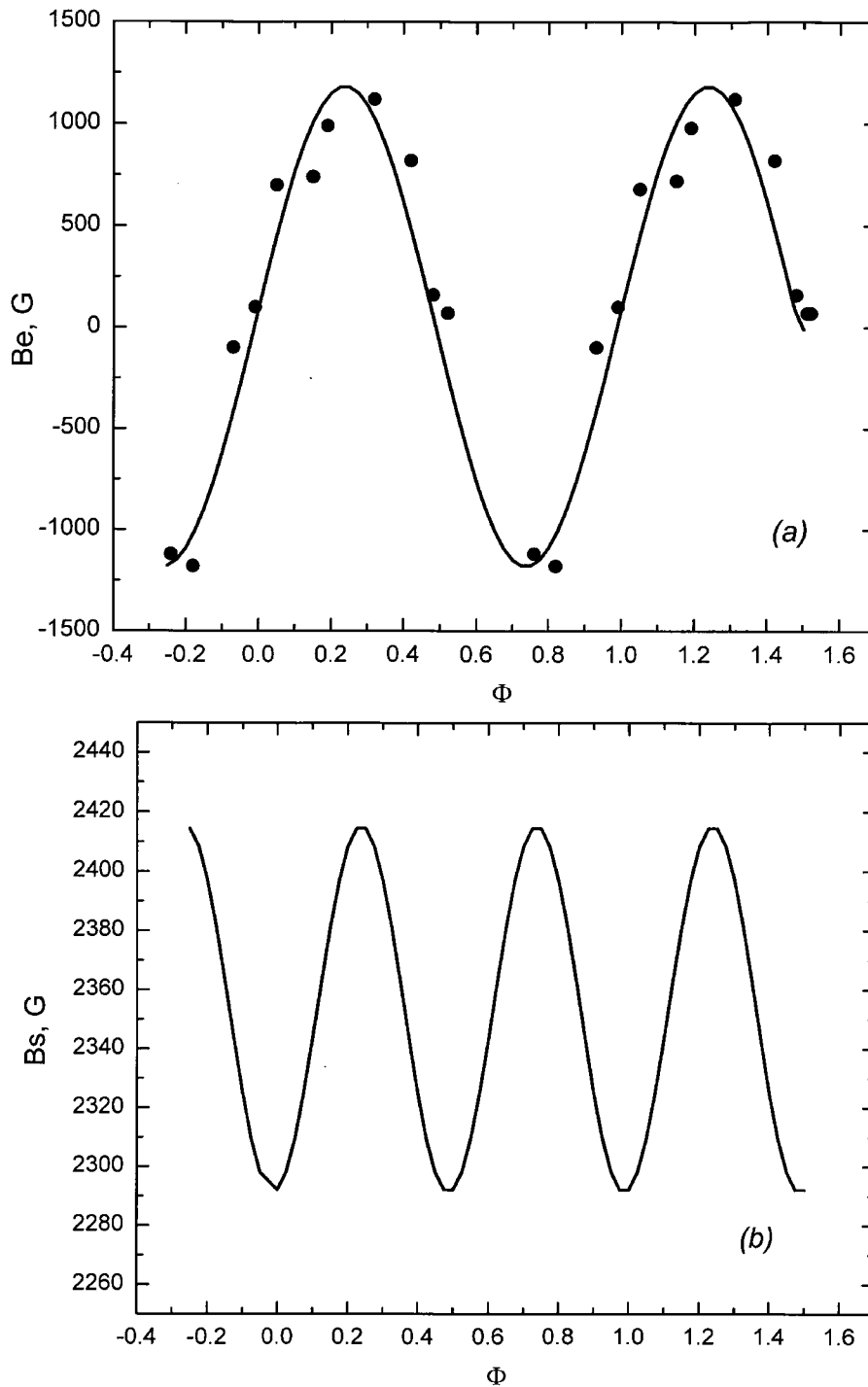


Рис. 4. То же, что на Рис.1, для звезды HD22470.

Поскольку период вращения  $P = 12^d.4610$  [16], то  $v = 50.6 \times R/P = 6.9$  км/с и 9.7 км/с. Отсюда при использовании приведенных выше радиусов получаем  $i = 90^\circ$  и  $44^\circ$ . Последняя величина хорошо совпадает с оценкой Престона. При угле  $i = 90^\circ$  мы никогда не получим наблюдаемую зависимость, имеющую  $r = B_e(\min)/B_e(\max) = 0.6$ ,

и мы его не используем. При угле  $i = 90^\circ$  всегда  $r = -1$ .

Данные измерений продольного поля  $B_e$  взяты из работ [15–18]. Начальная фаза, соответствующая максимуму положительного магнитного поля, и период вращения взяты из работы [16]:  $JD = 2440577.23 + 12^d.4610 \pm 0^d.0025$ . Данные измерений отмечены на Рис.5а точками, а

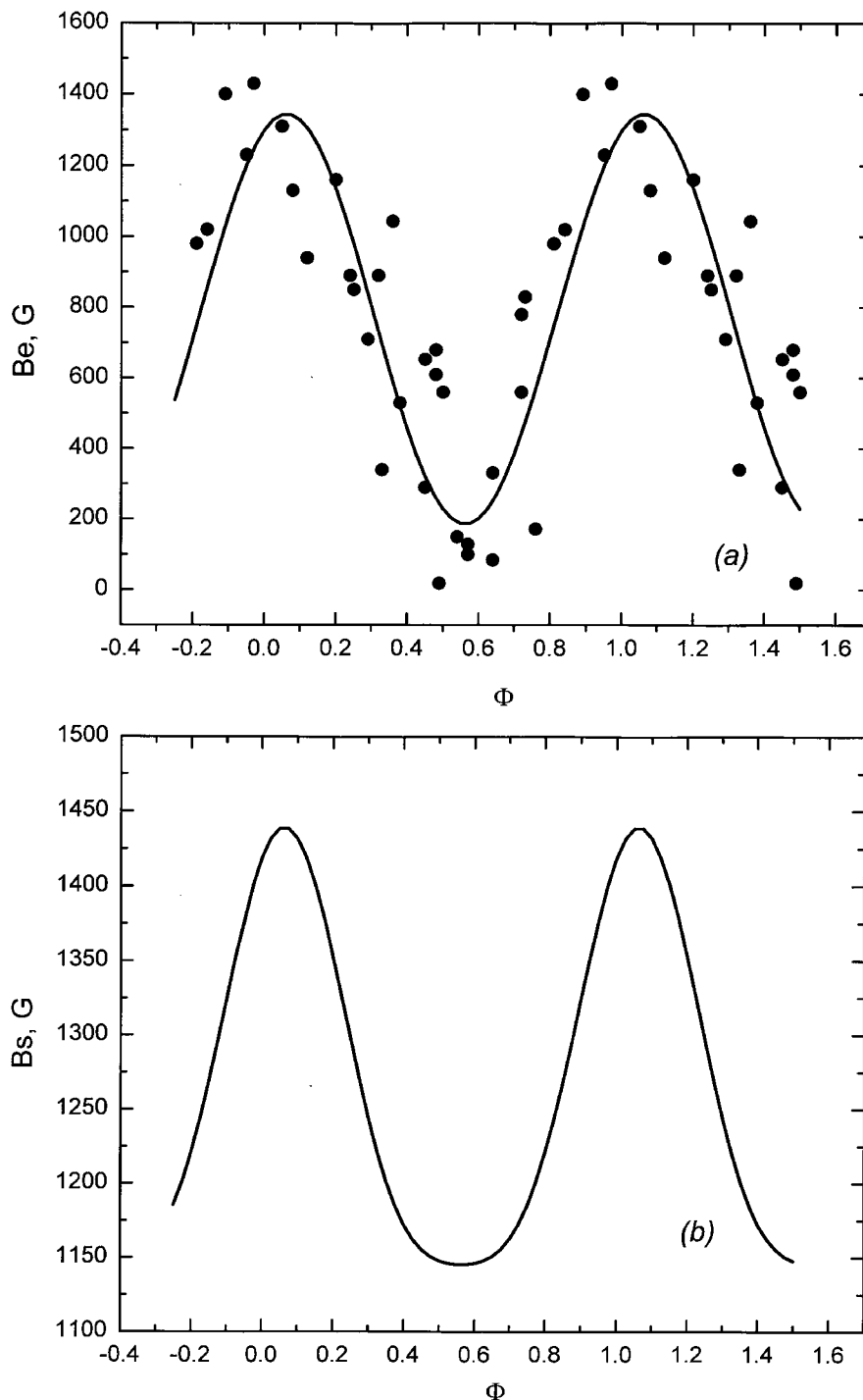


Рис. 5. То же, что на Рис.1, для звезды HD24712.

результат моделирования показан сплошной кривой. На Рис.5b представлена фазовая зависимость модельного среднего поверхностного магнитного поля  $B_s(\Phi)$ .

Параметры магнитного поля при предположении центрального диполя и  $i = 44^\circ$  приведены в Табл. 4.

$\beta = 38^\circ \pm 5^\circ$ , среднее поверхностное поле  $B_s = (B_s(\max) + B_s(\min))/2 = 1250 \pm 170$  Гс.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы исследовали параметры магнитного поля четырех магнитных звезд дополнительно к тем, которые были опубликованы в [19].

Таблица 4. Параметры магнитного поля звезды HD24712

Знак монополя	Долгота ( $\lambda$ ), °	Широта ( $\delta$ ), °	Поле на полюсах ( $B_p$ ), Гс
+	$0 \pm 5$	$52 \pm 5$	$+1800 \pm 170$
-	$180 \pm 5$	$-52 \pm 5$	$-1800 \pm 170$

Таким образом, мы накапливаем материал, полученный одинаковой методикой, чтобы в дальнейшем изучить основные свойства магнитных полей CP-звезд. В данном случае все четыре звезды имеют структуру магнитного поля, описываемую диполем, находящимся в центре звезды. К сожалению, количество измерений у всех четырех звезд недостаточно для точного определения параметров и существует неопределенность относительно того, имеется ли смещение диполя от центра. Мы оцениваем точность величины смещения диполя от центра как  $\Delta a = 0 \pm 0.1$  в долях радиуса звезды. Из данных этой работы снова видно, что результат моделирования сильно зависит не только от точности измерений, но и от точности определения величины угла наклона оси вращения звезды  $i$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, in *Physics of Magnetic Stars*, Ed. by D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, (Nizhnij Arkhyz, 2007), p.148.
2. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **33**, 33 (2002).
3. A. Uesugi and I. Fukuda, *Contr. Inst. Astrophys. and Kwasan Obs.* №189 (1970).
4. H. Abt, H. Levato, and M. Grosso, *Astrophys. J.* **573**, 359 (2002).
5. H. Abt and N. Morrell, *Astrophys. J.* **99**, 135 (1995).
6. G. Preston, *Astrophys. J.* **158**, 251 (1969).
7. H. Abt, *Astrophys. J.* **122**, 2008 (2001).
8. Ю. В. Глаголевский, К. И. Козлова и Н. С. Полосухина, *Астрофизика* **10**, 517 (1974).
9. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **42**, 421 (1980).
10. Yu. V. Glagolevskij, V. G. El'kin, I. I. Romanyuk, and V. G. Shtol. *Astron. Lett.* **21**, 190 (1995).
11. Ю. В. Глаголевский, К. И. Козлова, В. С. Лебедев и Н. С. Полосухина, *Астрофизика* **12**, 631 (1976).
12. K. Stepień and W. Czechowski, *Astronom. and Astrophys.* **268**, 187 (1993).
13. E. F. Borra, J. D. Landstreet, and I. Thompson, *Astrophys. J. Suppl.* **53**, 151 (1983).
14. A. E. Gomez, X. Luri, S. Grenier, et al., *Astronom. and Astrophys.* **336**, 953 (1998).
15. G. W. Preston, *Astrophys. J.* **175**, 465 (1972).
16. G. Mathys, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **89**, 121 (1991).
17. G. A. Wade, J-F. Donati, J. D. Landstreet, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **313**, 851 (2000).
18. G. Mathys and S. Hubrig, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **89**, 121 (1997).
19. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **64**, 62 (2009).

## MAGNETIC FIELD MODELS OF CP STARS HD18296, HD19832, HD22470, HD24712

Yu. V. Glagolevskij

We model the magnetic fields of four magnetic stars using published longitudinal (Be) field measurements. The structure of the magnetic field of each of the four stars is close to that of the central dipole. Unfortunately, the number of measurements for each star is insufficient for accurate finding of the field parameters, and therefore we find no dipole shift exceeding its error  $\Delta a \approx 0.1$ , expressed as a fraction of the stellar radius. Our data support the opinion that the results of modeling depend most strongly on the adopted inclination of the star's rotation axis  $i$ .

Key words: *stars — structure and evolution*