

УДК 524.35-337

## О МАГНИТНОМ ПОЛЕ AP-ЗВЕЗДЫ 52 HER

© 2012 В. Д. Бычков<sup>1</sup>, Л. В. Бычкова<sup>1</sup>, Ю. Мадей<sup>2</sup>, А. А. Панферов<sup>3</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория Варшавского университета, Варшава, 00-478 Польша<sup>3</sup>Тольяттинский госуниверситет, Тольятти, 445667 Россия

Поступила в редакцию 3 октября 2011 г.; принята в печать 17 октября 2011 г.

В работе исследуется переменность магнитного поля известной Ap-звезды 52 Her. На основании 15-летнего магнитного мониторинга и анализа литературных данных показано отсутствие долгопериодической переменности магнитного поля этой звезды и прецессии оси вращения главного компонента двойной системы 52 Her. Уточнен период переменности интенсивности линии K Ca II, предположительно являющийся периодом вращения главного компонента. Данные измерения позволили уточнить параметры средней магнитной фазовой кривой, полученной по линиям металлов, и обнаружить существенное отличие от фазовой кривой по линиям водорода. Обсуждены возможные причины необычной переменности магнитного поля этой звезды.

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле—звезды: двойные—звезды: индивидуальные: 52 Her*

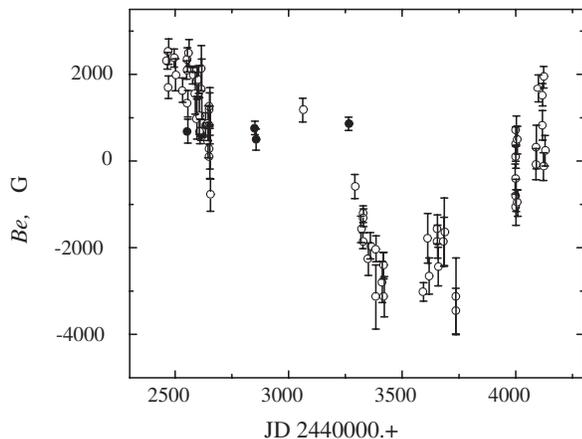
## 1. ВВЕДЕНИЕ

52 Her (HD 152107, HR 6254, V 637 Her) — это визуально-двойная система, главный компонент которой — химически пекулярная звезда SrSrEu-типа пекулярности спектрального класса A2p,  $m_V = 4.82$ . Вторичный компонент — звезда  $m_V = 9.0$  спектрального класса K0 V. Орбитальный период двойной системы 56<sup>a</sup>.75, эксцентриситет орбиты  $e = 0.22$  [1, 2]. В такой широкой паре пренебрежимо мало гравитационное возмущение атмосферы главного компонента вторичным.

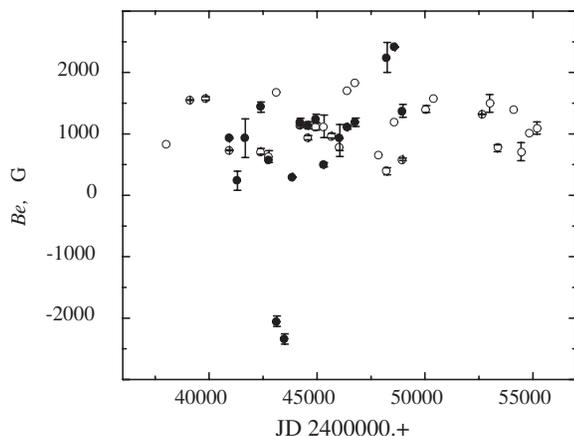
Первые измерения магнитного поля этой звезды были сделаны Вавcock [3] в июне 1949 года. С тех пор до настоящего времени (в течение 62 лет) было произведено 315 измерений продольной компоненты магнитного поля [3–11] (см. Табл. 1). По нашим измерениям и измерениям других авторов магнитное поле всегда положительно и в среднем около +1000 G. Однако измерения Gerth [5, 10] значительно отличаются и показывают отрицательные значения магнитного поля  $B_e(t)$ , достигающие до –3900 G в интервале JD 2442400–2444560. На Рис. 1 изображены оценки продольной компоненты магнитного поля  $B_e$  в моменты их получения именно в этом интервале. Несмотря на то, что это яркий объект, удобный для наблюдений в северном полушарии, и были проведены многочисленные исследования магнитного поля, до сих пор нет однозначного определения периода вращения главного компонента и не найдена с хорошей точностью средняя магнитная фазовая

кривая. Неопределенность средней магнитной фазовой кривой связывалась прежде всего с неточным знанием периода вращения. Наши попытки уточнить его по опубликованным фотометрическим данным не дали результата. Это удалось сделать по переменности интенсивности линии K Ca II, используя опубликованные данные из работы Wolff и Preston [4]. По нашим измерениям и измерениям других авторов магнитное поле всегда положительно и в среднем около +1000 G. Однако измерения Gerth [5, 10] значительно отличаются и показывают отрицательные значения магнитного поля  $B_e(t)$ , достигающие до –3900 G в интервале JD 2442400–2445600. На Рис. 2 приведены оценки  $B_e$ , усредненные за 1 год. Хорошо видно, что оценки Gerth [5, 10] значимо отличаются от всех, полученных до и после указанных интервалов. Тем не менее, эти оценки послужили основанием для предположения о долгопериодической переменности магнитного поля, которое объяснялось в работах [12–14] возможной прецессией оси вращения главного компонента в двойной системе. Поэтому исследование переменности магнитного поля этого объекта на больших временах (существенно превышающих период осевого вращения главного компонента) является актуальной задачей.

С целью исследования предполагаемой долговременной переменности магнитного поля и уточнения магнитной фазовой кривой мы на протяжении 15 лет проводили мониторинг магнитного поля в куде-фокусе 1-м телескопа САО РАН.



**Рис. 1.** Измерения  $B_c(t)$  в интервале JD 2442400–2445600. Пустые кружочки — [5], заполненные кружочки — [6].



**Рис. 2.** Величины усредненного за год магнитного поля в интервале 1963–2011 года. Заполненные кружочки — средние значения за год, полученные по данным из работ Герта [5, 10]. Пустые кружочки — все остальные работы. Хорошо видно, как средние данные из работ Герта [5, 10] значительно отличаются от средних данных, полученных остальными авторами, особенно в 1977–1978 и 1982–1983 годы.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

### 2.1. Периоды вращения по переменности интенсивности линии K Ca II

Основопологающей работой по определению периода вращения звезды 52 Нег является работа Wolff и Preston [4]. В этой работе период вращения определялся по совокупности величин: эквивалентной ширине  $W_\lambda$ , центральной интенсивности  $I/I_c$ , полученной путем сканирования линии, фо-

**Таблица 1.** Временные интервалы, в течение которых различные авторы получали оценки магнитного поля

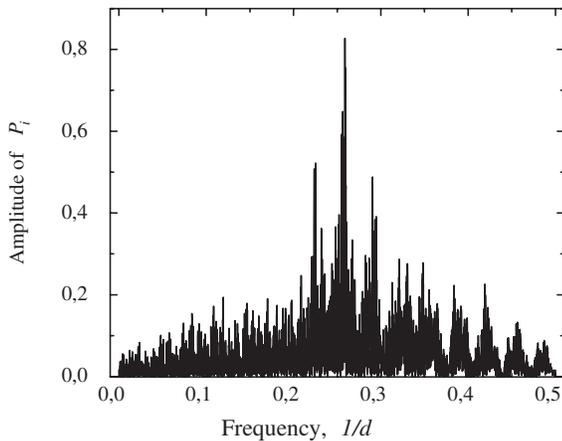
| JD24000000.+ | $N$ | Ссылки         |
|--------------|-----|----------------|
| 33077–35170  | 2   | [3]            |
| 38244–41168  | 47  | [4]            |
| 41055–46989  | 141 | [5]            |
| 42555–43263  | 6   | [6]            |
| 44329–46370  | 49  | [7]            |
| 45923–48501  | 12  | [8]            |
| 48138–48138  | 1   | [9]            |
| 48583–49322  | 20  | [10]           |
| 50301–50559  | 2   | [11]           |
| 50117–55700  | 35  | Эта публикация |

**Таблица 2.** Временные интервалы измерения параметров линии K Ca II и количество измерений  $N$ , использованных для определения периода вращения в работе [4]

| JD 24000000.+ | $\Delta t$ , days | $N$ | Параметр              |
|---------------|-------------------|-----|-----------------------|
| 39244–39986   | 742               | 21  | $W_\lambda$ (K Ca II) |
| 41434–41467   | 124               | 18  | $I/I_c$ (K Ca II)     |
| 39247–39259   | 12                | 12  | $k$                   |
| 41169–41210   | 41                | 14  | $c_1$                 |
| 39244–41467   | 2223              | 64  | $P$                   |

тометрическому индексу  $c_1$  Стремгеновской фотометрической системы и индексу  $k$ . Индекс  $k$  линии K Ca II есть отношение фотоэлектрически измеренных потоков в полосе шириной  $8 \text{ \AA}$ , центрированной на линию K Ca II, и в двух полосах шириной по  $4 \text{ \AA}$ , отстоящих симметрично в обе стороны на  $12 \text{ \AA}$  от ядра линии. Т.е. индекс  $k$  отражает интенсивность линии. Данные об этих измерениях приведены в Табл. 2.

Как видно из Табл. 2, временные интервалы, в которых проводились измерения конкретных величин ( $W_\lambda$ ,  $I/I_c$ ,  $k$ ,  $c_1$ ), невелики. Количество измерений также мало, и определение периодов по таким рядам не давало высокой точности [4]. Поэтому с целью уточнения периода было решено применить следующий способ: из работы [4] взяты величины, прямопропорциональные интенсивности



**Рис. 3.** Спектр мощности параметра  $P_i$  в интервале периодов от 2.0 до 1000 дней. Максимум приходится на частоту  $0.2589855 \text{ d}^{-1}$ , что соответствует периоду  $3^{\text{d}}86122$ .

линии К Ca II, перечисленные в Табл. 2. По каждой величине вычислялся безразмерный параметр  $P_i$  отнормированный на амплитуду переменности взятой величины, где  $p_{\max}$ ,  $p_{\min}$  — максимальное и минимальное значение величины, а  $p_i(t)$  — ее конкретное значение в момент измерения.

$$P_i(t) = (p_i(t) - p_{\min}) / (p_{\max} - p_{\min}).$$

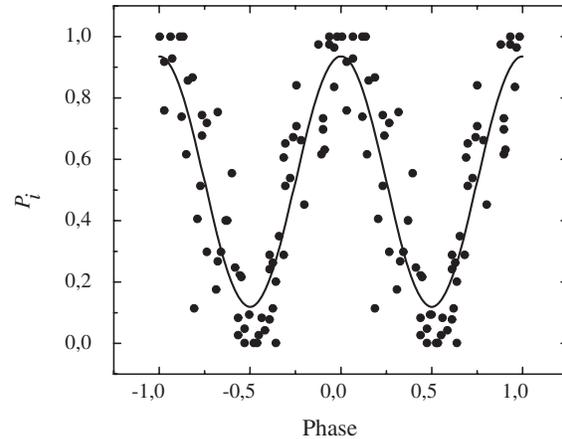
Применив такой способ, мы получили ряд безразмерной величины  $P_i(t)$ , имеющий большее количество точек ( $N = 64$ ) и покрывающий больший интервал времени ( $\Delta t = 2223^{\text{d}}$ , см. Табл. 2), что позволило уточнить период переменности линии К Ca II:

$$\text{JD } 2439247.606 \pm 0.003 + 3^{\text{d}}86122\text{E} \pm 0.00006.$$

На Рис. 3 приводится спектр мощности безразмерного параметра  $P_i$ , а на Рис. 4 — изменение параметра  $P_i$  с фазой этого периода.

Следует помнить, что определение периода вращения производилось по изменению интенсивности линии К Ca II, очень чувствительной к физическим условиям в атмосферах относительно холодных звезд. Поэтому период вращения хорошо может определяться таким способом только в случае отсутствия активных физических процессов в атмосфере, которые могут происходить на поверхности. Т.е. полагая, что в рассматриваемом нами случае переменность линии К Ca II обусловлена только меняющейся проекцией различных частей поверхности вследствие вращения, а не активными физическими процессами, возможно, происходящими в атмосфере звезды.

Фотометрическое поведение в системе Стремгrena изучалось в работе Wolff и Preston [4],



**Рис. 4.** Изменения параметра  $P_i$  с фазой полученного периода.

где была найдена заметная переменность индекса  $c_1 = (u - v) - (v - b)$ . Едва заметная переменность наблюдалась ими в индексе  $m_1 = (v - b) - (b - y)$  и отсутствовала в фильтре  $v$  и в показателе цвета  $(b - y)$ . Более поздние фотометрические исследования Adelman и др. [15, 16] также не выявили переменности. При этом следует отметить, что полученные ими данные не описываются фотометрической кривой с периодом вращения  $3^{\text{d}}86$  и имеют значительный разброс, который заметно превосходит точность измерений. Причину этого авторы [15, 16] не смогли объяснить. Создается впечатление что существует фотометрическая переменность, не связанная с периодом вращения. Необходимы дополнительные фотометрические наблюдения, которые смогли бы прояснить ситуацию с возможными периодическими изменениями блеска.

## 2.2. Магнитные измерения. Ранее полученные результаты

Исследование переменности магнитного поля 52 Her проводилось неоднократно в работах [4, 5, 7, 8, 13, 14, 17]. Впервые наиболее детально исследовалось изменение магнитного поля этой звезды в работе Wolff и Preston [4] на протяжении почти 5.5 лет (см. Табл. 1). Полученные ими магнитные измерения с периодом, определенным по переменности линии К Ca II, дают весьма значительный разброс на фазовой кривой. Следует обратить внимание, что магнитные измерения выполнялись на двух различных инструментах: куде-спектрографе 3-м телескопа Ликской обсерватории в период 1963–1968 гг. (37 измерений) и куде-спектрографе 2.2-м Мауна

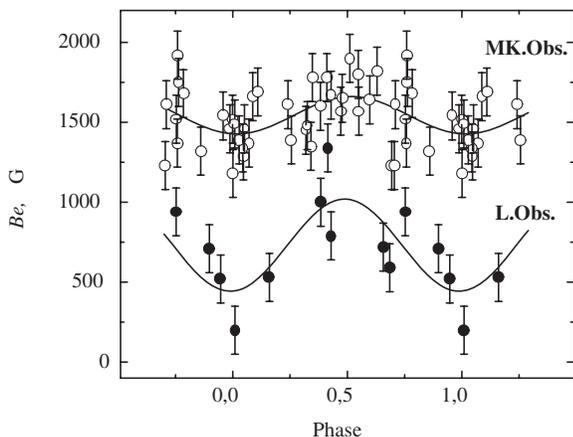


Рис. 5. Изменения  $B_e$  с фазой периода по измерениям, полученным в Ликской обсерватории (пустые кружки) и в обсерватории Мауна Кеа (заполненные кружки).

Кеа в 1971 г. (10 измерений). Оказалось, что результаты измерений значимо различаются по величине, а кроме этого, фазовые кривые, полученные в обсерватории Мауна Кеа, сдвинуты по фазе относительно фазовой кривой, полученной в Ликской обсерватории, на четверть (0.25) периода, что составляет почти 1 день при периоде  $3^d.86$ . На Рис. 5 изображены магнитные фазовые кривые с найденным нами периодом по оценкам, полученным в Ликской обсерватории и обсерватории Мауна Кеа. Хорошо видно совпадение фаз, при этом средние значения и амплитуда значимо различаются. Поскольку наблюдения на обеих обсерваториях проводились не одновременно (в Ликской — JD 2439244–2439362, в Мауна Кеа — JD 2441089–2441168), допустимо предположить, что во время перерыва в наблюдениях произошли некоторые изменения в атмосфере звезды, повлиявшие на магнитное поле.

### 2.3. Магнитные измерения, полученные в этой работе

Магнитные измерения 52 Her проводились по зеемановским спектрам, полученным в куде-фокусе 1-м телескопа САО РАН [18]. Ранее в работе Glagolevskij [19] обсуждалась проблема повышенного разброса  $B_e$  относительно средней магнитной кривой, и частично указывались возможные аппаратные причины — относительно низкое спектральное разрешение, фотографическая методика и аналоговые способы обработки. В нашем случае мы располагаем высококачественным спектральным материалом ( $R = 45000$ , CCD матрица,  $S/N \approx 100$ ) и цифровой обработкой в системе MIDAS. Методика получения величины

магнитного поля стандартная и состоит из следующих этапов.

1. Отбор пригодных для измерения линий производился с учетом физических параметров и химического состава звезды при расчете синтетического спектра по программе STARSF [20] с использованием базы данных VALD [21].

2. В наблюдаемые профили спектральных линий, соответствующие левой (LCP) и правой (RCP) круговым поляризациям, методом наименьших квадратов вписывалась гауссиана. Линии, имеющие дефекты регистрации вследствие воздействия космических лучей и т.д., естественно, отбрасывались. Величина расщепления линии под действием магнитного поля определялись по величине сдвига между центрами вписанных гауссиан.

3. Напряженность эффективного магнитного поля по каждой линии вычислялась согласно известному соотношению

$$\lambda_R - \lambda_L = 2g_{\text{eff}} 4.67 \times 10^{-13} \lambda_0^2 B_e, \quad (1)$$

где длина волны выражена в  $\text{\AA}$ , а напряженность поля — в Гауссах. Величина  $B_e$  вычислялась как среднее по всем использованным для измерения линиям. Полагая, что разброс значений  $B_e$  вследствие неточности измерений и прочих причин описывается нормальным законом распределения, вычисляется вероятная ошибка  $\sigma B_e$ .

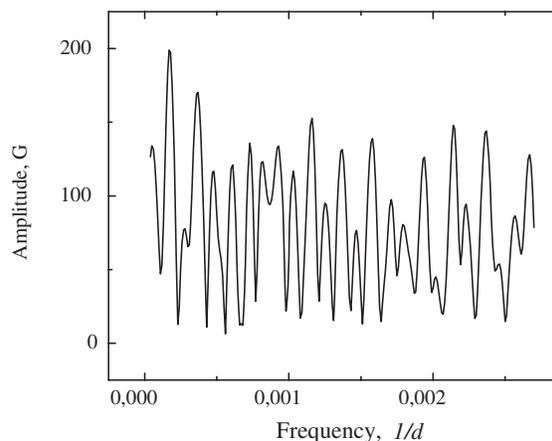
Инструментальные эффекты учитывались согласно [22]. Во время наблюдений мы регулярно для контроля снимали магнитные стандарты —  $\alpha^2 \text{CVn}$  и 53 Cam и стандарты “нулевого” поля —  $\alpha \text{CMi}$ ,  $\alpha \text{Voo}$ , Луну и т.д., что описано в работе [23]. Результаты, полученные по стандартам, хорошо согласуются с литературными данными. В Табл. 3 приведены полученные оценки продольного магнитного поля 52 Her.

Как видно из результатов наших измерений (Табл. 3), наблюдается переменность магнитного поля в пределах от +550 до +1740 Г. Если мы обратимся к полученным ранее наблюдательным данным, то все они показывают наличие переменности  $B_e$  в близких пределах, за исключением данных Gerth [5, 10], изображенных на Рис. 2. Измерения Gerth [5, 10] подробно анализировались в работе Gerth и Glagolevskij [14], в которой было высказано предположение о возможной долгопериодической переменности магнитного поля. Но последующие измерения [11] и измерения, полученные в данной работе, не подтверждают этого предположения. Попытки отыскать долговременную переменность различными способами частотного анализа временных рядов тоже дали отрицательный результат — в интервале периодов от 1 года до 60 лет отсутствует переменность, превышающая амплитуду в 200 Г. Для примера нами

**Таблица 3.** Результаты измерения магнитного поля 52 Her. Приведены моменты наблюдения, величина продольного магнитного поля  $B_e$ , ошибка измерений  $\sigma B_e$  и количество спектральных линий  $N$ , по которым производились измерения

| JD 24000000.+ | $B_e$ , G | $\sigma B_e$ , G | $N$ | JD 24000000.+ | $B_e$ , G | $\sigma B_e$ , G | $N$ |
|---------------|-----------|------------------|-----|---------------|-----------|------------------|-----|
| 50117.643     | +967      | 60               | 354 | 55496.118     | +749      | 176              | 195 |
| 50119.576     | +731      | 176              | 135 | 55496.147     | +750      | 283              | 120 |
| 52779.426     | +1205     | 187              | 169 | 55636.484     | +775      | 212              | 186 |
| 52779.442     | +1204     | 144              | 238 | 55636.522     | +917      | 147              | 155 |
| 53101.502     | +1174     | 87               | 219 | 55636.563     | +969      | 164              | 193 |
| 53101.535     | +1173     | 67               | 187 | 55699.425     | +1515     | 123              | 503 |
| 53102.528     | +1069     | 451              | 402 | 55699.454     | +1513     | 119              | 410 |
| 53103.510     | +830      | 61               | 352 | 55699.482     | +1737     | 114              | 544 |
| 53513.387     | +552      | 135              | 208 | 55699.507     | +1612     | 115              | 395 |
| 53514.367     | +748      | 94               | 207 | 55699.536     | +1074     | 121              | 442 |
| 53668.125     | +770      | 93               | 263 | 55700.298     | +764      | 246              | 276 |
| 54191.526     | +1143     | 104              | 257 | 55700.354     | +938      | 228              | 289 |
| 54780.111     | +569      | 104              | 211 | 55700.404     | +920      | 209              | 395 |
| 54782.117     | +1395     | 107              | 291 | 55700.435     | +908      | 191              | 332 |
| 54783.136     | +841      | 99               | 224 | 55700.467     | +757      | 194              | 423 |
| 54935.452     | +580      | 132              | 307 | 55700.497     | +814      | 181              | 393 |
| 55230.625     | +817      | 100              | 272 | 55700.525     | +876      | 185              | 358 |
| 55495.144     | +1267     | 124              | 203 |               |           |                  |     |

на Рис. 6 представлен спектр мощности, вычисленный по программе, любезно предоставленной D. Kurtz, и хорошо демонстрирующий этот результат. Естественно, для повышения точности из исходного ряда была вычтена переменность с периодом  $3^d.8682$ . В случае прецессии оси вращения главного компонента двойной системы 52 Her мы бы наблюдали медленный синусоидальный тренд средней составляющей измеряемого магнитного поля, а также, соответственно, и изменение амплитуды переменности, связанной с вращением вследствие гармонического изменения угла наклона оси вращения  $i$ . Но на протяжении всего интервала времени, охваченного измерениями, таких изменений не наблюдается. Исходя из этого, мы делаем заключение об отсутствии прецессии оси вращения главного компонента. Кроме того, поскольку результаты измерений Gerth [5, 10] противоречат измерениям, полученным другими авторами, было решено их в дальнейшем анализе не использовать.



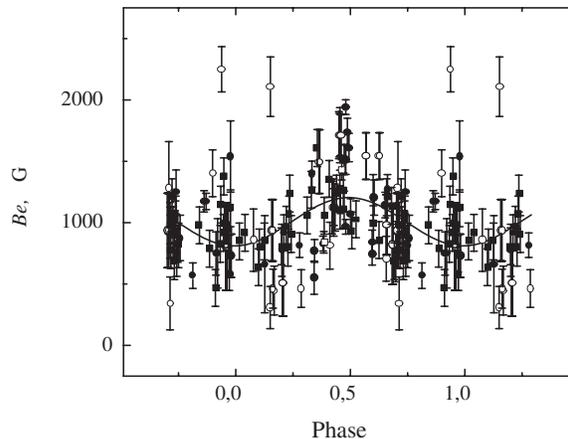
**Рис. 6.** Спектр мощности по имеющемуся ряду наблюдений в интервале периодов от 1 года до 60 лет.

**Таблица 4.** Параметры линий бленды  $\lambda 4476 \text{ \AA}$ , взятые из базы данных VALD [21]

|      | $\lambda$ | $z$  | $\log gf$ |
|------|-----------|------|-----------|
| Fe I | 4476.019  | 1.06 | 0.534     |
| Fe I | 4476.076  | 1.47 | 0.517     |

Период  $3^d 86122$ , полученный в работе [4] по переменности линии К Ca II, не согласуется с измерениями магнитного поля, полученными в настоящей работе. Естественно, была предпринята попытка поиска наиболее подходящего периода для описания магнитного поведения этой звезды. Для этого был определен наиболее вероятный интервал периодов. Поскольку в нашем распоряжении имелось 35 высококачественных зеемановских спектров, полученных в данном исследовании (см. Табл. 3) с разрешением  $R = 45000$ , было решено уточнить величину  $v \sin i$ , используя калибровку из работы Slettebak и др. [24]. Для этого были выбраны две линии — Fe I 4476  $\text{\AA}$  и Mg II 4481  $\text{\AA}$ . В наблюдаемый профиль каждой из линий методом наименьших квадратов вписывалась гауссиана, после чего определялась ширина линии на половине интенсивности — FWHM. Оказалось, что линия Fe I 4476  $\text{\AA}$  имеет асимметричный профиль и показывает заметную переменность полуширины. Чтобы понять причину переменности профиля, был рассчитан синтетический спектр звезды с параметрами, максимально близкими к наблюдаемым у исследуемого объекта —  $T_{\text{eff}} = 8750 \text{ K}$ ,  $\log g = 4.0$  и с увеличенным относительно солнечного содержанием Si и Sr на порядок, Eu — на 6 порядков. Оказалось, что линия Fe I 4476  $\text{\AA}$  состоит из двух линий Fe I, параметры которых приведены в Табл. 4.

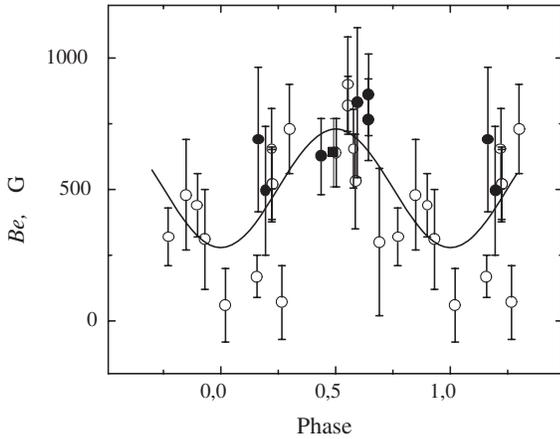
Как видно из этой таблицы, линии очень близки по длине волны, силе осцилляторов и, соответственно, интенсивности, но заметно отличаются по магнитной чувствительности, т.е. по фактору Ланде  $z$ . И вследствие этого мы считаем, что наиболее вероятная причина асимметрии и переменности полуширины (FWHM) профиля является именно высокая магнитная чувствительность Fe I 4476.076  $\text{\AA}$ . Поэтому было решено использовать только линию Mg II 4481  $\text{\AA}$ . В результате по всей совокупности имеющихся у нас спектров мы получили среднюю оценку  $v \sin i = 17.7 \pm 0.6 \text{ km/s}$ . Это заметно отличается от полученной ранее Wolf и Preston [4] оценки  $v \sin i = 24 \text{ km/s}$ . Получив уточненную величину  $v \sin i = 17.7 \text{ km/s}$  и используя выражение (3),



**Рис. 7.** Изменение  $B_e$  с фазой периода  $3^d 8682$  по всем измерениям, полученным по линиям металлов. Пустой квадрат — [3], полный квадрат — [4], пустой кружок — [7], полный кружок — данная публикация.

можно оценить верхнюю границу продолжительности периода — он для 52 Нег не может превышать 7 дней. Для всей совокупности магнитных измерений по линиям металлов, взятых из литературных источников и полученных в ходе выполнения данной работы, наиболее подходящим является период  $3^d 8682$ . При получении фазовой зависимости измерения из работы Gerth и др. [7], полученные в очень близкие моменты времени, усреднялись с целью повышения точности. Фазовая зависимость по всем имеющимся данным, включая полученные в нашей работе, изображенная на Рис. 7, показывает большой разброс относительно средней кривой.

Фазовые магнитные кривые, полученные по измерениям циркулярной поляризации в крыльях водородных линий и по линиям металлов, различаются для Ар-звезд. Это отражает хорошо известный наблюдаемый факт — неравномерное распределение химических элементов по поверхности Ар-звезд. Поскольку водород распределен по поверхности звезды равномерно, то фазовые магнитные кривые по водородным линиям наиболее точно отражают магнитную переменность. Наилучший период, с которым описывается “водородная” магнитная фазовая кривая, построенная по измерениям, взятым из работ [6, 8, 9], составляет  $3^d 85973$ . Фазовая кривая с этим периодом изображена на Рис. 8, а ее параметры приведены в Табл. 5. Как видно из сравнения параметров магнитной переменности, полученной по линиям металлов и водородным линиям, существует значительное различие, прямо свидетельствующее о необычайной концентрации аномалий химсостава в пятнах, расположенных вблизи магнитных полюсов. В этом смысле данная звезда является очень



**Рис. 8.** Изменения  $B_e$  с фазой периода  $3^d.85973$  по водородным линиям. Заполненные кружки — оценки из работы Вогга и Landstreet [6], пустые кружки — из работы Vuchkov и др. [8], заполненный квадрат — из [9].

интересным объектом и заслуживает специального более детального исследования.

Из данных, приведенных в Табл. 5, видно, что “водородная” магнитная фазовая кривая имеет вдвое меньшую постоянную составляющую. Столь существенное различие трудно объяснить только неоднородным распределением химических элементов по поверхности.

Как видно из полученных результатов, магнитные периоды и период переменности интенсивности линии К Ca II хотя и близки, но несколько различаются. Мы полагаем, что это различие связано прежде всего с относительно малым количеством полученных оценок и их невысокой точностью. Для уточнения периодов необходимы дополнительные наблюдения.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1. Стандартный анализ результатов

Вид магнитной фазовой кривой предполагает дипольное магнитное поле, описываемое стандартной моделью наклонного ротатора Стиббса–Престона [5, 26]. В этой модели эффективное магнитное поле описывается гармонической зависимостью. Определялись основные параметры магнитного поля звезды и фазовых кривых, которые в этом случае описываются так же простой гармонической зависимостью.

$$B_e = B_0 + B_1 \cos\left(2\pi \frac{t_i - T_0}{P}\right) \quad (2)$$

Температура и радиус главного компонента 52 Her наиболее точно (по полному потоку) были определены в работе Lipski и Stepien [27],  $T_{\text{eff}} = 8750$  K

и  $R/R_\odot = 2.3$ . Экваториальная скорость в этом случае

$$v = \frac{50.6145R}{P} = 30.1 \text{ km/s} \quad (3)$$

и при использовании полученной нами оценки  $v \sin i = 17.7$  km/s угол наклона оси вращения к лучу зрения составляет  $i = 36.0^\circ \pm 1.4^\circ$ , что хорошо согласуется с полученной ранее Вогга и Landstreet [6] оценкой  $i = 38^\circ$ .

Согласно модели магнитного ротатора [25, 26], угол наклона оси магнитного диполя к оси вращения звезды  $\beta$ , соответственно, находится из выражения

$$\tan \beta = \left(\frac{1-r}{1+r}\right) \cot i, \quad (4)$$

где

$$r = \frac{B_{e(\text{min})}}{B_{e(\text{max})}} = \frac{\cos \beta \cos i - \sin \beta \sin i}{\cos \beta \cos i + \sin \beta \sin i} \quad (5)$$

По нашим данным  $r = 0.462 \pm 0.045$ , по “водородной” кривой (см. Рис. 8) —  $r = 0.375 \pm 0.111$ , что соответствует углам  $\beta = 27^\circ \pm 4^\circ$  и  $\beta = 32^\circ \pm 8^\circ$ . В таком случае магнитное поле на полюсе

$$B_p = \frac{3.3B_{e(\text{max})}}{\cos(\beta - i)} = 4570 \pm 200 \text{ G.} \quad (6)$$

Углы  $i$  и  $\beta$  могут быть определены по измерениям линейной поляризации в широких полосах (Landi Degl’Innocenti [28], Bagnulo [29]), и это было бы независимой проверкой предлагаемой модели наклонного ротатора. Суть метода состоит в измерении суммарной линейной поляризации  $\pi$  компонент спектральных линий, попадающих в спектральный интервал, охватываемый фильтром. Это позволяет в благоприятных случаях оценить величину углов  $i$  и  $\beta$  независимо. К сожалению, специально проведенные измерения в фильтре  $L$  ( $\lambda 4200 \text{ \AA}$ , FWHM =  $100 \text{ \AA}$ ) Leroy [30] не дали определенного результата прежде всего из-за недостаточного количества измерений. Единственный вывод, сделанный Leroy [30], заключается в том, что углы  $i$  и  $\beta$  невелики, составляют  $i = 38^\circ$  и  $\beta = 14^\circ$ , что согласуется с результатом, полученным в нашей работе.

Дипольное поле звезды, вероятно, генерируется крупномасштабной циркуляцией тока внутри звезды. Из выражения магнитного поля на полюсе диполя для витка тока  $J$  (в единицах CGSM) радиуса  $R_J$  при ( $R_J \ll R_*$ )

$$B_0 = \frac{J2\pi R_J^2}{R_*^3} \quad (7)$$

**Таблица 5.** Параметры магнитных кривых.  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $\sigma B_0$ ,  $\sigma B_1$  — в Гауссах,  $T_0$ ,  $\sigma T_0$  — в днях,  $N$  — количество измерений,  $P$  — период в днях

| $B_0$ , G | $\sigma B_0$ , G | $B_1$ , G | $\sigma B_1$ , G | $T_0$ , JD2400000.+ | $\sigma T_0$ | $N$ | $P$ , d | Комментарии         |
|-----------|------------------|-----------|------------------|---------------------|--------------|-----|---------|---------------------|
| 505       | 32               | 232       | 54               | 42555.159           | 0.153        | 24  | 3.85973 | линии водорода      |
| 1008      | 15               | 198       | 24               | 33076.363           | 0.070        | 137 | 3.86820 | металлические линии |

ток в атмосфере 52 Her может быть порядка  $J = 1.0 \times 10^{17} (0.1R_*/R_J)^2$  А.

Предположим, что толщина токового слоя будет порядка радиуса токового кольца. Тогда площадь поперечного сечения  $S \sim (0.1R)^2 = 2.6 \times 10^{20}$  см<sup>2</sup>, а плотность тока  $j = J/S \simeq 0.39$  мА/см<sup>2</sup>. Если говорить о токовом слое в верхних слоях звезды ( $r \sim R$ ), то эту цифру надо уменьшить в  $\sim 10^4$  раз, т.е.  $j = J/S \simeq 0.04$  мА/см<sup>2</sup>.

### 3.2. Обсуждение результатов

Линии H и K Ca II очень чувствительны не только к магнитному полю, но и к физическим условиям в области формирования (см., например, [31]). Как показал Wilson [32], поток в этих линиях может меняться в интервалах от нескольких дней до нескольких лет для звезд главной последовательности в спектральном интервале F5–M2. Звезды солнечного типа имеют переменность в этих линиях в интервале от 2.5 до 25 лет [33]. Недавно по переменности Маунт-Вилсоновского индекса  $S_{MWO}$ , отображающего интенсивности в линиях H и K Ca II, был открыт 1<sup>а</sup>6 цикл магнитной активности у звезды с экзопланетами  $\iota$  Her (HD 17051, HR 810) спектрального класса F8 V с периодом вращения 8<sup>d</sup>.5. Следовательно, возможно различие переменности магнитного поля, периода вращения и интенсивности линий H и K Ca II. Мы предполагаем, что у этой звезды возможны циклы магнитной активности, на которые накладывается переменность, связанная с вращением звезды. Вероятно, в таком сценарии можно найти объяснение столь большого разброса отдельных измерений относительно средней магнитной фазовой кривой, как полученной по линиям металлов, так и по водородным линиям (см. Рис. 7 и Рис. 8). Однако, как связаны переменность интенсивности линии K Ca II, период вращения и магнитный период остается неясным вопросом. При этом, конечно, следует помнить, что приводимые выше примеры относятся к звездам более холодным, и различие между спектральным типом  $\iota$  Her и 52 Her составляет более одного спектрального класса. Тем не менее, остается актуальным вопрос — является ли период переменности линии K Ca II периодом вращения 52 Her и, соответственно, магнитным периодом. В [34] отмечается, что 52 Her

входит в группу звезд с повышенной магнитной активностью. Это может объясняться действием динамо-механизма генерации магнитных полей в рамках модели Arlt и Ruediger [35], разработанной для поздних звезд. Основой действия динамо-механизма является преобразование энергии механического вращения в энергию магнитного поля. Для того, чтобы показать действенность такого механизма, приведем следующие оценки.

Энергия вращения звезды оценена в предположении твердотельного вращения:

$$W_r = \frac{Iw^2}{2} = 2.7 \times 10^{45} \text{ erg}, \quad (8)$$

где  $I = KMR^2$  — момент инерции звезды,  $K$  — коэффициент, учитывающий распределение массы внутри звезды,  $w = 2\pi/P$  — угловая скорость вращения звезды. Распределение плотности по радиусу и соответствующий коэффициент  $K = 0.134$  рассчитан для гидростатически равновесного состояния звезды, описываемого уравнением Лейна-Эмдена при показателе политропы  $n = 3/2$ .

Энергия магнитного поля звезды в предположении однородного поля в объеме звезды по порядку величины равна:

$$W_m \approx \frac{B^2}{8\pi} \frac{4\pi R^3}{3} = 1.3 \times 10^{40} \text{ erg}. \quad (9)$$

Получаем отношение энергий:

$$\frac{W_m}{W_r} = \frac{1}{3k} \frac{B^2 R P^2}{4\pi^2 M} = 4.7 \times 10^{-6} \quad (10)$$

Оценки сделаны для параметров звезды  $M_* = 2.2M_\odot$ ,  $R_* = 2.3R_\odot$  согласно [27, 36] и полученной в этой работе оценки  $B_p = 4570$  Г. Это убедительно показывает, как мало энергии вращения может быть затрачено на генерацию магнитного поля с помощью динамо механизма.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В течение более чем 15-летнего мониторинга 52 Her получено 35 оценок магнитного поля. Анализ этих измерений и литературных данных привел к следующим результатам.

1. У 52 Her отсутствует переменность магнитного поля в интервале периодов от 1 года до 60 лет,

превышающая амплитуду в 200 G. Признаков прецессии оси вращения главного компонента 52 Her не обнаружено.

2. Получены параметры магнитной фазовой кривой по линиям металлов.

3. По полученным нами спектрам уточнена величина  $v \sin i = 17.7 \pm 0.6$  km/s, что позволяет уточнить оценку угла  $i = 36.0^\circ \pm 1.4^\circ$ .

4. Уточнен период переменности интенсивности линии K Ca II на основании данных из работы [4], который составляет  $3^d 86122$ .

5. Найдено существенное различие в параметрах магнитной переменности по измерениям в крыльях водородных линий и линий металлов.

6. Показано, что отношение энергии магнитного поля к энергии механического вращения очень мало.

Как указывалось выше, остается несколько нерешенных вопросов: повышенный разброс индивидуальных оценок относительно средних фазовых магнитных кривых, связь переменности интенсивности линии K Ca II с периодом вращения и магнитным периодом. Для исследования поставленных вопросов необходим мониторинг магнитного поля и переменности интенсивности линии K Ca II, как с целью уточнения периода, так и для поиска корреляций с переменностью магнитного поля.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарят Д. Куртца и В. В. Цымбала за предоставление программ и помощь в вычислениях. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Польши (грант по. N203 511638) и российским грантом “Ведущие научные школы” по. 5473.2010.2. Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 16.518.11.7073).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. R. King, A. R. Villarreal, D. R. Soderblom, et al., *Astronom. J.* **125**, 1980 (2003).
2. P. P. Eggleton, A. A. Tokovinin, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **389**, 869 (2007).
3. H. W. Babcock, *Astrophys. and Space Sci.* **30**, 141 (1958).
4. S. C. Wolff and G. W. Preston, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **90**, 406 (1978).
5. E. Gerth, *Astron. Nachr.* **311**, 41 (1990).
6. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **42**, 421 (1980).

7. E. Gerth, V. D. Bychkov, Yu. V. Glagolevskij, and I. I. Romanyuk, in *Proc. of Intern. Meeting Stellar Magnetism* (Nauka, St.-Petersburg, 1992), p.60.
8. V. D. Bychkov, V. G. Elkin, V. G. Shtol, in *Proc. of Intern. Meeting Stellar Magnetism* (Nauka, St.-Petersburg, 1992), p.211.
9. V. G. Elkin, I. I. Romanyuk, and V. G. Shtol, *Peculiar Newsletter* **29**, 29 (1991).
10. E. Gerth (private communication).
11. G. Hildebrandt, G. Scholz, and H. Lehmann, *Astron. Nachr.* **321**, 115 (2000).
12. E. Gerth, *Astron. Nachr.* **305**, 329 (1984).
13. H. Lehmann, *Astron. Nachr.* **308**, 333 (1987).
14. E. Gerth, Yu. V. Glagolevskij, *ASP Conference Series* **305**, 221 (2003).
15. S. J. Adelman, R. J. Dukes, and D. M. Pyper, *Astronom. J.* **104**, 314 (1992).
16. S. J. Adelman, *Baltic Astronomy* **11**, 475 (2002).
17. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova and J. Madej, *Astronom. and Astrophys.* **430**, 1143 (2005).
18. V. D. Bychkov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 83 (2008).
19. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 15 (2003).
20. V. Tsymbal, *ASP Conference Series* **108**, 198 (1996).
21. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
22. V. D. Bychkov, V. P. Romanenko, and L. V. Bychkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **49**, 147 (2000).
23. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **365**, 585 (2006).
24. A. Slettebak, G. W. Collins, T. D. Parkinson, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **29**, 137 (1975).
25. D. W. N. Stibbs, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **110**, 395 (1950).
26. L. Lipski and K. Stepień, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **385**, 841 (2008).
27. G. W. Preston, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **83**, 571 (1971).
28. M. Landi Degl’Innocenti, G. Calamai, E. Landi Degl’Innocenti, and P. Patriarchi, *Astrophys. J.* **249**, 228 (1981).
29. S. Bagnulo, E. L. Degl’Innocenti, M. Landolfi and J. L. Leroy, *Astronom. and Astrophys.* **295**, 459 (1995).
30. J. L. Leroy, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **114**, 79 (1995).
31. R. B. Leighton, *Astrophys. J.* **130**, 366 (1959).
32. O. C. Wilson, *Astrophys. J.* **226**, 379 (1978).
33. T. J. Henry, D. R. Soderblom, R. A. Donahue, and S. L. Baliunas, *Astronom. J.* **111**, 439 (1996).
34. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **394**, 1338 (2009).
35. R. Arlt and G. Ruediger, arXiv:1010.3899 (2010).
36. C. W. Allen, *Astrophysical Quantities* (Athlone Press, London, 1973).

**MAGNETIC FIELD OF THE AP STAR 52 HER****V. D. Bychkov, L. B. Bychkova, J. Madej, A. A. Panferov**

We investigate the variability of the magnetic field of a well-known Ap star 52 Her. The 15-year long magnetic monitoring and analysis of the literature data demonstrates the lack of a long-period variability of the stellar magnetic field, and an absence of precession of the rotation axis of the binary's main component. We refined the period of variability of the K Ca II line intensity, presumably being the rotation period of the main component. These measurements allowed to specify the parameters of the mean magnetic phase curve, obtained from the lines of metals, and to detect a significant difference from the phase curve, built from the hydrogen lines. Possible causes of the unusual variability of the stellar magnetic field are discussed.

Keywords: *stars: magnetic field—stars: stars: binaries—stars: individual: 52 Her*