

УДК 524.35-337

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СР-ЗВЕЗД, ВЫПОЛНЕННЫХ НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ. I. НАБЛЮДЕНИЯ 2009–2011 ГОДОВ

© 2019 А. В. Моисеева\*, И. И. Романюк, Е. А. Семенко, Д. О. Кудрявцев, И. А. Якунин

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

Поступила в редакцию 18 октября 2018 года; после доработки 14 декабря 2018 года;  
принята к публикации 14 декабря 2018 года

В статье приводятся результаты определения фундаментальных параметров (эффективной температуры, ускорения силы тяжести, светимости, массы, радиуса, скорости вращения, лучевой скорости) 146 звезд, наблюдавшихся на 6-м телескопе БТА с помощью ОЗСП в 2009–2011 гг., 124 из которых — магнитные или потенциально магнитные объекты. Было получено и проанализировано более 500 пар спектров циркулярно-поляризованного излучения. Для оценки фундаментальных параметров использовались различные методы и подходы.

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле — звезды: химически пекулярные — звезды: фундаментальные параметры*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа открывает цикл публикаций о результатах измерений фундаментальных параметров СР-звезд, наблюдения которых выполнены на 6-м телескопе. В основе исследования лежат опубликованные ранее [1–3] материалы по поиску магнитных полей у различных химически пекулярных звезд. Целью этой работы является оценка фундаментальных параметров этих СР-звезд. Для их определения использовались различные методы и подходы. Контроль результатов проводился по звездам-стандартам.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Настоящая работа посвящена анализу спектров поляризованного излучения, полученных в 2009–2011 гг. с помощью Основного звездного спектрографа (ОЗСП) [4], который установлен в фокусе Нэсмит-2 телескопа БТА. В течение 66 ночей наблюдений [1–3] было получено более 500 пар спектров циркулярно-поляризованного излучения для 146 звезд. Описание оптической системы и инструментальных возможностей прибора можно найти на WEB-странице прибора<sup>1</sup>. Данный прибор оснащен поворотной фазовой пластинкой  $\lambda/4$  и анализатором круговой поляризации с резателем

изображений конструкции Г. А. Чунтонова [5]. Итоговые спектры представляют собой средний профиль двух кадров, полученных при разном положении фазовой пластинки. Это позволяет учесть возможную инструментальную поляризацию.

Часть наблюдений (2009 г., январь и февраль 2010 г.) была проведена с использованием ПЗС-матрицы E2V CCD42 размером 2048×2048 элементов. С 25 марта 2010 г. в наблюдениях используется новая ПЗС-матрица E2V CCD42 размером 4600×2048 элементов, что позволило расширить регистрируемый диапазон спектра от 250 Å до 550 Å. Основной рабочий спектральный диапазон — от 4450 Å до 5000 Å. Разрешение спектров  $R \sim 15000$  и сигнал/шум  $S/N \sim 250$  позволяют определять фундаментальные параметры звезд с достаточно высокой точностью.

Для контроля получаемых результатов дополнительно определялись параметры звезд-стандартов, которые подразделяются на два типа: хорошо изученные магнитные звезды с большим количеством линий (53 Cam,  $\alpha^2$  CVn,  $\gamma$  Equ, 52 Her) и немагнитные (o Uma, HD 169161).

Первичный анализ спектрального материала проводился при помощи пакетов системы ESO MIDAS, с использованием контекста ZEEMAN [6]. Основные этапы обработки спектрального материала:

1) вычитание токов смещения матрицы bias;

\*E-mail: amoiseeva@sao.ru

<sup>1</sup><https://www.sao.ru/hq/lizm/mss/en/index.html>

- 2) учет рассеянного света;
- 3) привязка к длинам волн;
- 4) экстракция спектров;
- 5) учет гелиоцентрической поправки;
- 6) проведение континуума и нормировка спектров.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

К фундаментальным параметрам звезды можно отнести: скорость вращения  $v_e \sin i$ , лучевую скорость  $V_R$ , эффективную температуру  $T_{\text{eff}}$ , ускорение силы тяжести на поверхности  $\lg g$ , массу  $M/M_{\odot}$  и радиус  $R/R_{\odot}$ .

Скорость вращения звезды для химически пекулярных звезд мы оценивали двумя способами: 1) исходя из связи скорости вращения с полушириной линии  $FWHM$ , а именно,  $v_e \sin i = 43.47FWHM - 11.04$  [7]; и 2) используя метод моделей атмосфер, при помощи которых строится синтетический спектр. Для визуализации этого процесса использовалась программа BINMAG [8], в которой путем варьирования параметров  $v_e \sin i$  и  $V_R$  можно провести сравнение теоретического и наблюдаемого спектров.

При определении этих параметров стоит учитывать то, что исследуемые звезды являются химически пекулярными, а большинство из них обладают глобальными магнитными полями. Таким образом, чтобы уменьшить величину ошибки получаемых параметров, мы использовали линии с низким фактором Ланде, которые были взяты из работы [9].

Определение эффективной температуры и ускорения силы тяжести также выполнялось двумя методами. В первом использовались фотометрические индексы системы Стремгрена [10, 11]. Расчеты мы проводили, используя калибровки, которые реализованы в программе UVBYBETA\_NEW (см. [12, 13]) и TempLogG\_TNG [14]. Во втором методе — по спектральным данным с привлечением моделей атмосфер — наблюдаемый профиль водородной линии  $H\beta$  сравнивался с сеткой синтетических профилей с различными величинами эффективной температуры и ускорения силы тяжести. Для подбора подходящего синтетического спектра с искомыми параметрами применялся критерий  $\chi^2$ .

Светимость определялась по стандартной формуле:

$$\lg \frac{L}{L_{\odot}} = -\frac{M_V + BC - M_{\text{bol } \odot}}{2.5}, \quad (1)$$

где  $M_V = m_V + 5 + 5 \lg \pi - A_V$  — абсолютная звездная величина,  $A_V = 3.1E_{(B_V)}$  — коэффициент межзвездного поглощения [15],  $BC$  — болометрическая поправка, которая была посчитана методом интерполяции данных из работы [16].

Массы и радиусы мы оценивали, используя фундаментальные законы:

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad (2)$$

$$\lg g = \lg M - 2 \lg R + 4.437 \quad (3)$$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4. \quad (4)$$

Дополнительно использовались эмпирические зависимости, которые были получены для звезд Главной последовательности в работе [17].

Для контроля сперва были оценены параметры некоторых хорошо известных химически пекулярных звезд:  $\gamma$  Eri,  $\alpha^2$  CVn, 53 Cam. Результаты представлены в таблице 1, где для сравнения приведены и данные из литературных источников. Можно увидеть, что полученные оценки параметров хорошо согласуются с литературными данными.

Типичные величины ошибок определения параметров:

- проекции скорости вращения  $v_e \sin i \sim 20\text{--}40\%$ ;
- лучевой скорости  $\sigma(V_R) \sim 3\text{--}5 \text{ км с}^{-1}$ ;
- эффективной температуры по фотометрическим данным  $T_{\text{eff}} \sim 300\text{--}800 \text{ К}$ , по спектроскопическим —  $T_{\text{eff}} \sim 200\text{--}350 \text{ К}$ ;
- ускорения силы тяжести по спектроскопическим данным  $\lg g \sim 0.2\text{--}0.4$ ;
- светимости зависят от точности оценки расстояния и учета межзвездного поглощения и составляют  $\lg(L/L_{\odot}) \sim 0.2\text{--}0.6$ ;
- радиусов и масс звезд примерно одинаковы  $M/M_{\odot}, R/R_{\odot} \sim 0.6\text{--}1.0$ .

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений фундаментальных параметров представлены в сводной таблице 2<sup>2</sup>. Ее колонки содержат: сведения о (1) названиях звезд в порядке возрастания номера в каталогах HD и BD, (2) юлианской дате наблюдения, (3) лучевой скорости  $V_R$ , (4) скорости вращения  $v_e \sin i$  с ошибками измерений  $\sigma$ , (5) отношения  $S/N$  результирующего спектра, (6) эффективных температурах  $T_{\text{eff}}$ ,

<sup>2</sup>Полную версию можно найти по адресу <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/cat/J/other/AstBu/74.62>

**Таблица 1.** Оценки фундаментальных параметров звезд-стандартов. В скобках указаны литературные данные, взятые из разных источников

| Звезда         | $T_{\text{eff}}$ , К | $\lg g$    | $\lg (L/L_{\odot})$ | $M/M_{\odot}$ | $R/R_{\odot}$ |
|----------------|----------------------|------------|---------------------|---------------|---------------|
| $\gamma$ Equ   | 7500 (7450)          | 3.7 (3.9)  | 1.1 (1.3)           | 1.7 (1.84)    | 2.4 (2.16)    |
| 53 Cam         | 8100 (8290)          | 4.0 (3.82) | 1.5 (1.45)          | 1.9 (2.08)    | 2.3 (2.88)    |
| $\alpha^2$ CVn | 11300 (11190)        | 3.8 (3.9)  | 2.1                 | 2.8           | 3.5 (3.9)     |

**Таблица 2.** Результаты определения фундаментальных параметров для 146 СР-звезд по наблюдениям за 2009–2011 гг. (фрагмент)

| Звезда   | HJD (+2450000) | $S/N$ | $v_e \sin i$ , км с <sup>-1</sup> | $V_R$ , км с <sup>-1</sup> | $T_{\text{eff}}$ , К | $\lg g$ | $\lg (L/L_0)$ | $M/M_0$ | $R/R_0$ |
|----------|----------------|-------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------|---------|---------------|---------|---------|
| HD 653   | 5488.445       | 200   | $80.6 \pm 13.2$                   | $+30.2 \pm 2.6$            | 10000                | 3.8     | 1.4           | 2.4     | 3.2     |
|          | 5554.220       | 220   |                                   | $-17.0 \pm 3.4$            |                      |         |               |         |         |
| HD 965   | 5017.511       | 200   | $20.3 \pm 3.5$                    | $-3.5 \pm 1.7$             | 8000                 | 3.6     | 1.1           | 1.8     | 3.5     |
|          | 5075.438       | 200   |                                   | $9.8 \pm 2.9$              |                      |         |               |         |         |
|          | 5431.458       | 170   |                                   | $-1.0 \pm 1.8$             |                      |         |               |         |         |
|          | 5459.492       | 200   |                                   | $-4.5 \pm 2.6$             |                      |         |               |         |         |
|          | 5461.462       | 230   |                                   | $-3.4 \pm 2.9$             |                      |         |               |         |         |
|          | 5553.174       | 200   |                                   | $-1.3 \pm 1.0$             |                      |         |               |         |         |
|          | 5555.139       | 140   |                                   | $-3.2 \pm 2.4$             |                      |         |               |         |         |
|          | 5583.148       | 120   |                                   | $+1.5 \pm 2.8$             |                      |         |               |         |         |
|          | 5842.411       | 120   |                                   | $+1.4 \pm 2.3$             |                      |         |               |         |         |
|          | 5843.397       | 120   |                                   | $-1.7 \pm 2.2$             |                      |         |               |         |         |
| 5871.176 | 120            |       | $-1.8 \pm 2.6$                    |                            |                      |         |               |         |         |
| HD 2453  |                | 320   |                                   | $-16.4 \pm 2.2$            | 8600                 | 3.5     | 1.8           | 2.0     | 4.2     |

(7) ускорений силы тяжести  $\lg g$ , (8) массах  $M/M_{\odot}$  и (9) радиусах  $R/R_{\odot}$ .

Для оценки средних величин параметров магнитных СР-звезд по данным таблицы 2 были построены гистограммы распределения параметров для 124 магнитных или потенциально магнитных объектов (рис. а–е).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены фундаментальные параметры 146 звезд. Построены распределения параметров 124 магнитных или потенциально магнитных объектов.

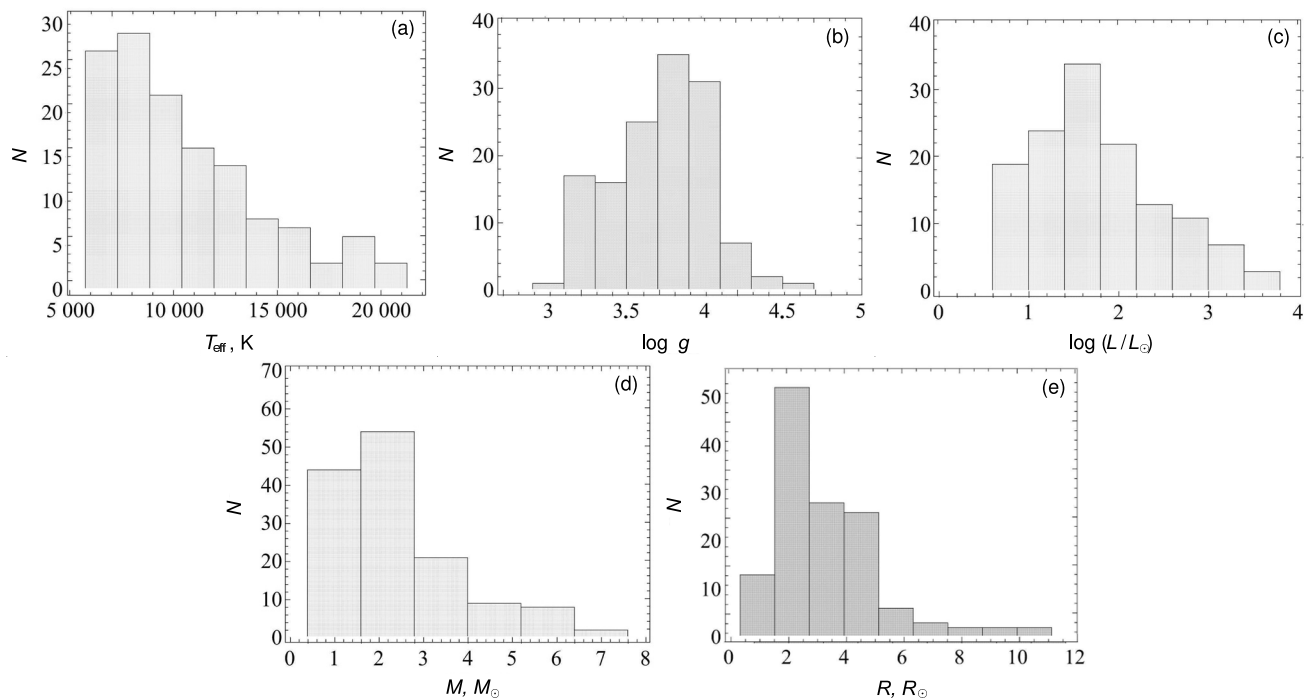
В результате оказалось, что магнитные Ар/Вр звезды исследованной выборки распределены в достаточно узком интервале:

скорости вращения — от 20 до 40 км с<sup>-1</sup>;

эффективные температуры — от 7000 до 23000 К; ускорения силы тяжести — от 3.2 до 4.5; светимости — от 0.6 до 3.8; массы — от 1.5 до 6  $M_{\odot}$ ; радиусы — от 1.8 до 2.2  $R_{\odot}$ .

Полученные результаты, в целом, соответствуют нормальным звездам ГП, за исключением скорости вращения. Подтверждается хорошо известный ранее результат — магнитные звезды вращаются медленнее нормальных в 3–4 раза: более половины исследуемых звезд имеют скорости  $v_e \sin i < 50$  км с<sup>-1</sup>.

Для большинства звезд (70–80%) фундаментальные параметры были определены впервые.



Гистограммы распределения параметров химически peculiar звезд: (a) эффективных температур, (b) ускорений силы тяжести  $\lg g$ , (c) светимостей, (d) масс, (e) радиусов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Российский научный фонд за финансовую поддержку работы (грант РФФ 14-50-00043).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, and A. V. Moiseeva, *Astrophysical Bulletin* **71**, 327 (2016).
2. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 391 (2017).
3. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **73**, 178 (2018).
4. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 339 (2014).
5. G. A. Chuntunov, in *Proc. Intern. Conf. on Magnetic Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij, D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk (Nizhnij Arkhyz, 2004), p. 286.
6. D. O. Kudryavtsev, *Baltic Astronomy* **9**, 649 (2000).
7. A. Slettebak, G. W. Collins, P. B. Boyce, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **29**, 137 (1975).
8. O. Kochukhov, *Astrophysics Source Code Library* (2018).
9. I. I. Romanyuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 64 (2005).
10. E. Paunzen, A. Schnell, and H. M. Maitzen, *VizieR Online Data Catalog* **344** (2005).
11. P. Renson, and J. Manfroid, *Astron. and Astrophys.* **498**, 961 (2009).
12. R. Napiwotzki, D. Schoenberner, and V. Wenske, *Astron. and Astrophys.* **268**, 653 (1993).
13. T. T. Moon and M. M. Dworetzky, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **217**, 305 (1985).
14. A. Kaiser, *ASP Conf. Ser.* **349**, 257 (2006).
15. P. B. Lucke, *Astron. and Astrophys.* **64**, 367 (1978).
16. P. J. Flower, *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996).
17. Z. Eker, F. Soydugan, E. Soydugan, et al., *Astron. J.* **149**, 131 (2015).

**Fundamental Parameters of CP Stars Observed at the 6-m Telescope.  
I. Observations in 2009–2011**

**A. V. Moiseeva, I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, and I. A. Yakunin**

The paper presents the results of determination of fundamental parameters (effective temperature, surface gravity, luminosity, mass, radius, rotation velocity, and radial velocity) for 146 stars observed at the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences with the Main Stellar Spectrograph during 2009–2011; 124 of the stars are magnetic or potentially magnetic objects. We obtained and analyzed at least 500 pairs of circularly-polarized-emission spectra. Various methods and approaches were used in estimating the fundamental parameters.

Keywords: *stars: magnetic field—stars: chemically peculiar—stars: fundamental parameters*