

УДК 524.3–337, 524.35

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ СР-ЗВЕЗД В АССОЦИАЦИИ ОРИОН ОВ1. IV. ЗВЕЗДЫ ПОДГРУППЫ (В)

© 2021 И. И. Романюк^{1*}, Е. А. Семенко¹,
А. В. Моисеева¹, И. А. Якунин^{1,2}, Д. О. Кудрявцев¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

Поступила в редакцию 4 августа 2020 года; после доработки 23 октября 2020 года; принята к публикации 23 октября 2020 года

В статье представлены результаты измерений магнитных полей химически пекулярных звезд подгруппы (b) ассоциации Ori¹ OVI. Мы нашли, что доля звезд с магнитными полями среди пятнадцати СР-звезд подгруппы (b) почти в два раза больше, чем в подгруппе (a). При этом возраст подгруппы (b) оценивается в 2 млн. лет, а возраст подгруппы (a) — порядка 10 млн. лет. Средняя величина среднеквадратического магнитного поля $\langle B_e \rangle$ в подгруппе (b) в 2.3 раза выше аналогичной величины для звезд подгруппы (a). Полученные выводы в целом укладываются в рамки реликтовой теории образования крупномасштабных магнитных полей В- и А-звезд, однако темп ослабления поля с возрастом оказался аномально большим. Мы предлагаем наши результаты в качестве важного наблюдательного теста для калибровки теории формирования и эволюции звездных магнитных полей.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие теории формирования и эволюции магнитных полей звезд нуждается в надежных наблюдательных тестах, сравнение с которыми может продемонстрировать достоверность теоретических выводов. В отличие от Солнца, где процесс формирования и развития поля наблюдается непосредственно на поверхности, в случае магнитных химически пекулярных (СР) звезд все намного сложнее. Здесь структуру поля в деталях наблюдать невозможно, и поэтому остается лишь сравнивать результаты наблюдений с магнито-гидродинамическими расчетами, которые должны учитывать многие параметры, часто не имеющие точного количественного выражения.

Вопрос о существовании зависимости величины магнитного поля от возраста звезды в области исследований магнитных полей горячих Ар/Вр-звезд является одним из важнейших. Не вдаваясь в подробности отдельных работ, отметим, что исследователи в основном сходятся во мнении о том, что наблюдается тренд ослабления поля и упрощения его геометрии с возрастом. Однако эти выводы часто оказываются недостаточно надежными из-за сложностей с определением возраста одиночных звезд. Отсюда и повышенный интерес к магнитным звездам в скоплениях и ассоциациях.

В нашем исследовании было решено измерить магнитное поле всех химически пекулярных звезд в ассоциации Ori¹ OVI с надежно определенным возрастом отдельных ее подгрупп. Цели этого исследования были представлены в работе Romanyuk et al. (2013), а описание методики наблюдений и анализа данных содержится в работах Romanyuk et al. (2014; 2015; 2017). Настоящая статья также является продолжением серии работ Romanyuk et al. (2014; 2015; 2019; 2013; 2017) по комплексному изучению магнитных химически пекулярных звезд в Орионе.

С момента публикации статьи Romanyuk et al. (2013) в мире было накоплено много новой информации о свойствах ассоциации Ori¹ OVI. В первую очередь следует отметить результаты миссии GAIA, позволившие установить точное расстояние до отдельных звезд ассоциации. Эти данные во многом подтвердили правильность наших оценок расстояния до тех членов ассоциации, для которых измерения параллакса либо отсутствовали, либо его значения расходились с другими наблюдаемыми характеристиками.

Конечным итогом нашего исследования является ответ на вопросы о том, зависит ли от возраста частота встречаемости пекулярных звезд относительно нормальных звезд в ассоциации Ori¹ OVI и как изменяется в зависимости от возраста частота встречаемости магнитных СР-звезд. К настоя-

*E-mail: roman@sao.ru

щему времени мы закончили изучение самой старой подгруппы (а), средний возраст звезд которой составляет около 10 млн. лет (Romanuk et al. 2019). В новой работе цикла мы приводим результаты измерений магнитных полей СР-звезд подгруппы (b) ассоциации. Схема изложения результатов аналогична работе Romanuk et al. (2019).

Подгруппа (b) ассоциации Orión OB1 почти целиком формирует астеризм пояса Ориона. Все ранее проведенные многочисленные исследования показывают, что эта область созвездия относится к наиболее молодой в ассоциации. Средний возраст звезд в ней оценивается в 2 млн. лет. Точность и надежность таких оценок намного выше, чем в случае определение возраста по спектральным данным и эволюционным трекам.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

2.1. Выбор объектов для наблюдений

По методике, предложенной в работе Romanuk et al. (2013), для наблюдений в подгруппе (b) ассоциации Orión OB1 нами было отобрано шестнадцать СР-звезд. Информация об отдельных объектах представлена в таблице 1. В ее колонках содержатся номер объекта в каталоге HD, тип пекулярности согласно каталогу Renson and Manfroid (2009), галактические координаты l и b , параллакс π , полученный GAIA, расстояние d до звезды в парсеках, блеск m_V в полосе V и полное межзвездное или около звездное поглощение A_V в направлении на звезду (Romanuk et al. 2013).

Из таблицы 1 следует, что отобранные нами для наблюдений объекты в пространстве расположены достаточно компактно в пределах галактических координат $l = 203^\circ 2' - 206^\circ 9'$ и $b = [-16^\circ 3'; -18^\circ 6']$ на расстоянии от 315 до 440 пк. Исключение может составлять только двойная звезда HD 37321, параллакс которой мог быть определен ошибочно. Таким образом, область, занимаемая звездами подгруппы, в картинной плоскости имеет размер примерно 30×15 пк и не более 100 пк в глубину вдоль луча зрения.

2.2. Результаты измерений

Для всех отобранных звезд программы в период с 2015 по 2019 гг. на Основном звездном спектрографе (ОЗСП) (Ranchuk et al. 2014) 6-м телескопа

БТА с зеемановским анализатором (Chountonov 2004) нами было получено не менее пяти спектров. Техника наблюдений и обработки данных полностью аналогична применявшейся ранее (см. работу Romanuk et al. (2019)).

Результаты измерения магнитных полей приведены в таблице 2. В колонках таблицы представлены: номер звезды в каталоге HD, юлианская дата наблюдений, значения продольного магнитного поля в гауссах, полученные модифицированным методом Бэбкока $B_e(z)$, методом регрессии $B_e(r)$ и по водородной линии $H\beta$ — $B_e(h)$, σ — среднеквадратичные ошибки измерений. Приведено также отношение S/N для каждого полученного спектра. Техника измерения магнитного поля в деталях описана в предыдущих работах (Romanuk et al. 2014; 2015; 2019; 2017). Таким образом, для шестнадцати звезд суммарно мы получили 110 измерений магнитного поля, не менее пяти для каждого объекта.

В настоящей работе для статистических исследований аналогично тому, как мы сделали это в исследовании Romanuk et al. (2019), будем использовать среднеквадратичное поле $\langle B_e \rangle$ (см. формулы (1)–(3) для определения величины поля, его ошибки σ и значения χ^2/n , характеризующего уверенность обнаружения поля на фоне ошибок измерений (Thompson et al. 1987)). Мы будем считать звезду магнитной в том случае, если $\chi^2/n > 5$.

$$\langle B_e \rangle = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{ei}^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$\langle \sigma \rangle = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\chi^2/n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{B_{ei}}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3)$$

Результаты измерений для каждой звезды мы прокомментируем ниже. Кроме того, сведения о звездах мы дополним результатами наших измерений лучевой скорости V_R и скорости вращения $v_e \sin i$, а также приведем соответствующие значения из астрономических баз данных.

Таблица 1. Сводная информация о CP-звездах подгруппы Орион ОВ1 (b), включенных в программу исследований

| Номер HD | Пекулярность | l , град. | b , град. | π , mas | d , пк | m_V , зв. вел. | A_V , зв. вел. |
|----------|--------------|-------------|-------------|-------------|----------|------------------|------------------|
| 36046 | He-wk | 203.74 | -18.57 | 2.91 | 343 | 8.06 | 0.15 |
| 36313 | He-wk, Si | 203.77 | -18.05 | 3.17 | 315 | 8.20 | 0.12 |
| 36485 | He-r | 203.84 | -17.73 | 2.57 | 389 | 6.85 | 0.12 |
| 36526 | He-wk, Si | 205.08 | -18.31 | 2.44 | 410 | 8.29 | 0.18 |
| 36668 | He-wk, Si | 203.18 | -16.98 | 2.36 | 424 | 8.07 | 0.01 |
| 36955 | CrEu | 205.25 | -17.58 | 2.29 | 437 | 9.58 | — |
| 37140 | He-wk | 204.39 | -16.79 | 2.43 | 412 | 8.56 | 0.69 |
| 37149 | He-wk | 205.62 | -17.42 | 2.38 | 420 | 8.02 | 0.05 |
| 37235 | He-wk | 204.84 | -16.84 | 2.51 | 398 | 8.13 | 0.06 |
| 37321 | He-wk | 205.58 | -17.04 | 1.56 | 640 | 7.09 | 0.17 |
| 37333 | Si | 206.54 | -17.50 | 2.85 | 350 | 8.51 | 0.22 |
| 37479 | He-r | 206.81 | -17.32 | 2.28 | 438 | 6.34 | 0.25 |
| 37525 | He-wk | 206.89 | -17.29 | 2.29 | 436 | 8.06 | 0.17 |
| 37633 | EuSi | 207.01 | -17.14 | 2.40 | 417 | 9.01 | 0.44 |
| 37776 | He-r | 206.07 | -16.34 | 2.28 | 438 | 6.99 | 0.28 |
| 290665 | CrEuSr | 204.74 | -17.29 | 2.48 | 403 | 9.44 | 0.19 |

Таблица 2. Результаты измерений магнитных полей CP-звезд подгруппы (b) ассоциации Орион ОВ1

| Звезда | JD, (2450000+) | S/N | $B_e(z) \pm \sigma$, Гс | $B_e(r) \pm \sigma$, Гс | $B_e(h)$, Гс |
|----------|----------------|-------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| HD 36046 | 6640.320 | 220 | -750 ± 1410 | -100 ± 90 | — |
| | 7740.416 | 200 | 910 ± 790 | 180 ± 460 | 100 |
| | 8125.437 | 250 | -50 ± 1200 | -150 ± 260 | -400 |
| | 8151.199 | 210 | -1690 ± 610 | -70 ± 150 | -1200 |
| | 8446.449 | 260 | -1170 ± 1570 | -30 ± 110 | -250 |
| HD 36313 | 5554.321 | 400 | 120 ± 120 | 560 ± 180 | -1800 |
| | 5842.500 | 350 | 160 ± 160 | 480 ± 190 | 1600 |
| | 5843.542 | 350 | 40 ± 130 | 250 ± 270 | 1100 |
| | 6995.325 | 250 | -160 ± 400 | 280 ± 210 | 2000 |
| | 7288.512 | 350 | -480 ± 370 | 340 ± 150 | — |
| | 7288.528 | 400 | -300 ± 300 | -70 ± 190 | 600 |
| | 7289.492 | 300 | 280 ± 160 | -40 ± 120 | -500 |
| | 7290.483 | 300 | -60 ± 290 | 20 ± 180 | -1500 |
| | 8830.358 | 220 | 340 ± 150 | 280 ± 130 | 1900 |

Таблица 2. (Продолжение)

| Звезда | JD, (2450000+) | S/N | $B_e(z) \pm \sigma$, Гс | $B_e(r) \pm \sigma$, Гс | $B_e(h)$, Гс |
|----------|----------------|-------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| | 8830.452 | 240 | 110 ± 290 | -200 ± 210 | -2700 |
| | 8830.507 | 180 | 20 ± 190 | -200 ± 150 | -2000 |
| | 8834.479 | 140 | 760 ± 170 | 370 ± 180 | 700 |
| HD 36485 | 5553.247 | 330 | -2350 ± 250 | -2310 ± 120 | -2100 |
| | 5553.480 | 330 | -2330 ± 220 | -2210 ± 180 | -1900 |
| | 5554.263 | 300 | -2400 ± 210 | -2270 ± 120 | -2300 |
| | 5554.481 | 300 | -2700 ± 230 | — | -3100 |
| | 5555.253 | 330 | -2830 ± 260 | -2470 ± 160 | -2600 |
| | 5555.486 | 270 | -2830 ± 320 | -2370 ± 120 | -2400 |
| | 5582.279 | 370 | -2310 ± 240 | -2350 ± 120 | -2500 |
| | 5583.280 | 320 | -3030 ± 260 | -2250 ± 120 | -2600 |
| | 5873.540 | 300 | -3440 ± 320 | -2220 ± 140 | -2700 |
| | 5962.381 | 390 | -2860 ± 320 | -2160 ± 50 | — |
| | 5963.427 | 320 | -2670 ± 210 | -2070 ± 40 | — |
| HD 36526 | 5553.335 | 250 | 2730 ± 320 | 2180 ± 170 | 3200 |
| | 5842.532 | 280 | 1500 ± 400 | -290 ± 210 | -2700 |
| | 5963.292 | 280 | — | 2790 ± 50 | — |
| | 6589.530 | 320 | 2150 ± 220 | 1970 ± 130 | 5700 |
| | 7289.570 | 200 | 2730 ± 380 | 1120 ± 80 | 3200 |
| | 7290.525 | 210 | 4600 ± 600 | 750 ± 90 | 1000 |
| HD 36668 | 5582.396 | 240 | -1040 ± 250 | -540 ± 140 | -1350 |
| | 5583.310 | 310 | -1540 ± 220 | -1430 ± 150 | -3300 |
| | 5842.475 | 300 | -1170 ± 350 | -1140 ± 50 | -3400 |
| | 5962.323 | 300 | 2170 ± 180 | 1140 ± 50 | — |
| | 5963.272 | 300 | -1010 ± 780 | -920 ± 60 | — |
| | 7288.565 | 200 | 2060 ± 350 | 1030 ± 80 | 1700 |
| | 7289.554 | 240 | -3370 ± 650 | -500 ± 140 | -1900 |
| | 7290.513 | 230 | 1420 ± 430 | 450 ± 110 | 5500 |
| HD 36955 | 3273.529 | 160 | -820 ± 190 | — | — |
| | 3274.512 | 180 | -410 ± 200 | — | — |
| | 3275.510 | 140 | -1300 ± 380 | — | — |
| | 4015.546 | 280 | -480 ± 210 | — | 50 |
| | 6233.412 | 110 | -750 ± 110 | -760 ± 60 | -2100 |
| | 8447.419 | 170 | -970 ± 105 | -660 ± 110 | -700 |

Таблица 2. (Продолжение)

| Звезда | JD, (2450000+) | S/N | $B_e(z) \pm \sigma$, Гс | $B_e(r) \pm \sigma$, Гс | $B_e(h)$, Гс |
|----------|----------------|-----|--------------------------|--------------------------|---------------|
| HD 37140 | 5555.297 | 310 | -590 ± 90 | -350 ± 90 | — |
| | 5962.400 | 230 | 220 ± 210 | 220 ± 50 | — |
| | 5963.440 | 200 | 140 ± 210 | -210 ± 60 | — |
| | 8125.504 | 120 | -900 ± 170 | -460 ± 120 | -600 |
| | 8151.227 | 200 | -720 ± 220 | -80 ± 140 | -100 |
| | 8447.484 | 150 | 560 ± 290 | 50 ± 130 | -400 |
| HD 37149 | 6643.344 | 200 | 5 ± 1200 | -320 ± 120 | — |
| | 8008.545 | 190 | — | -180 ± 190 | 0 |
| | 8446.475 | 200 | -700 ± 1800 | -160 ± 170 | 800 |
| | 8512.408 | 240 | -3100 ± 3100 | 170 ± 190 | -400 |
| | 8799.384 | 250 | -1800 ± 2400 | 150 ± 180 | 200 |
| HD 37235 | 6643.321 | 200 | — | 260 ± 120 | -300 |
| | 8126.173 | 200 | 9100 ± 4500 | 170 ± 170 | -900 |
| | 8151.252 | 180 | -700 ± 3800 | 190 ± 130 | 200 |
| | 8153.219 | 190 | 1370 ± 1330 | 60 ± 210 | -500 |
| | 8447.509 | 220 | 1800 ± 2200 | 380 ± 160 | 400 |
| | 8550.243 | 160 | 90 ± 660 | 180 ± 210 | -800 |
| HD 37321 | 6643.366 | 280 | -590 ± 470 | -580 ± 260 | — |
| | 7825.209 | 200 | 380 ± 650 | -160 ± 210 | -400 |
| | 8116.420 | 260 | -250 ± 280 | 10 ± 140 | — |
| | 8153.247 | 270 | -590 ± 460 | -180 ± 200 | -200 |
| | 8446.498 | 400 | 80 ± 210 | -150 ± 180 | 200 |
| HD 37333 | 7762.470 | 120 | 50 ± 310 | -150 ± 110 | -600 |
| | 7823.188 | 150 | 560 ± 310 | 70 ± 110 | 1300 |
| | 8116.445 | 140 | -1290 ± 270 | -440 ± 130 | 800 |
| | 8446.525 | 230 | -1030 ± 150 | -670 ± 110 | -1200 |
| | 8512.215 | 160 | -890 ± 190 | -430 ± 160 | -1700 |
| | 8512.240 | 140 | -850 ± 200 | -530 ± 100 | -700 |
| HD 37479 | 5555.324 | 350 | -1050 ± 1080 | 140 ± 330 | -200 |
| | 5582.343 | 310 | 4350 ± 540 | 1630 ± 270 | 4800 |
| | 5583.350 | 280 | -3400 ± 1150 | -1860 ± 480 | -4300 |
| | 5963.347 | 400 | 2320 ± 360 | 830 ± 70 | — |
| HD 37525 | 5963.360 | 280 | 2390 ± 2770 | -20 ± 90 | — |
| | 5555.337 | 270 | 670 ± 1670 | 20 ± 290 | — |

Таблица 2. (Продолжение)

| Звезда | JD, (2450000+) | S/N | $B_e(z) \pm \sigma$, Гс | $B_e(r) \pm \sigma$, Гс | $B_e(h)$, Гс |
|-----------|----------------|-----|--------------------------|--------------------------|---------------|
| | 7764.361 | 260 | -780 ± 1080 | 270 ± 250 | -300 |
| | 8446.553 | 250 | 620 ± 930 | -20 ± 100 | 1500 |
| | 8514.409 | 100 | -1460 ± 2130 | -100 ± 140 | -1700 |
| HD 37633 | 6643.421 | 200 | 400 ± 60 | 320 ± 80 | -400 |
| | 7740.496 | 500 | 180 ± 170 | 100 ± 110 | - |
| | 8006.568 | 140 | 194 ± 190 | 160 ± 150 | -100 |
| | 8126.455 | 130 | 810 ± 100 | 660 ± 80 | 400 |
| | 8447.365 | 180 | 740 ± 80 | 460 ± 63 | 400 |
| | 8758.511 | 160 | 440 ± 70 | 300 ± 80 | -400 |
| HD 37776 | 8777.441 | 320 | 15700 ± 3900 | -140 ± 155 | 6600 |
| | 8777.553 | 370 | -2900 ± 2200 | -460 ± 140 | -3100 |
| | 8778.460 | 350 | 6400 ± 1800 | 70 ± 200 | 7000 |
| | 8778.578 | 400 | -10100 ± 2900 | -580 ± 160 | 1500 |
| | 8799.396 | 310 | -2200 ± 2200 | 210 ± 180 | 7000 |
| | 8801.555 | 290 | -800 ± 4000 | 150 ± 160 | 7800 |
| | 8805.369 | 350 | -7500 ± 1000 | -1140 ± 120 | -5300 |
| | 8805.559 | 350 | 1300 ± 3000 | -60 ± 190 | 12300 |
| | 8830.315 | 300 | -3800 ± 2600 | -200 ± 150 | 10700 |
| | 8830.478 | 360 | -6700 ± 600 | -1240 ± 110 | -4800 |
| HD 290665 | 8007.527 | 130 | 3910 ± 120 | 3200 ± 40 | 2800 |
| | 8151.336 | 180 | 830 ± 90 | 570 ± 80 | 1300 |
| | 8447.442 | 150 | 1050 ± 100 | 840 ± 50 | - |
| | 8448.392 | 150 | -3700 ± 140 | -2670 ± 50 | -2500 |
| | 8534.209 | 190 | 3450 ± 110 | 2960 ± 50 | 3000 |
| | 8535.178 | 90 | 1068 ± 120 | 960 ± 60 | 400 |
| | 8550.287 | 130 | 3210 ± 120 | 2660 ± 40 | 2700 |
| | 8551.250 | 170 | -2990 ± 130 | -2240 ± 40 | -1800 |
| | 8579.179 | 100 | -2800 ± 150 | -1720 ± 60 | -300 |
| | 8581.176 | 150 | 3410 ± 130 | 2810 ± 50 | 1600 |

2.3. Комментарии результатов исследования отдельных звезд

2.3.1. HD 36046 = BD -00°964
= Renson 9290 = Brown 007b

В каталогах переменных звезд ассоциации Orion OB1 HD 36046 не представлена. В спек-

тре звезды в области 4400–4970 Å имеются несколько линий, уширенных вращением ($v_e \sin i = 100 \text{ км с}^{-1}$). В базе SIMBAD лучевая скорость указана как $V_R = 34.6 \text{ км с}^{-1}$, однако по нашим измерениям она систематически оказывается несколько меньше, что может свидетельство-

вать о возможной двойственности звезды. Наблюдаемый спектр HD 36046 соответствует звезде с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 15000 \pm 250$ К и ускорением силы тяжести $\lg g = 4.0 \pm 0.3$.

В работе Romanuk et al. (2013) приведены ссылки на исследования, в которых делались попытки определить массу звезды. Получены две величины: 2.4 и 3.8 M_{\odot} . Второе значение близко к нашим данным.

Согласно работе Bagnulo et al. (2015), звезда наблюдалась на VLT инструментом FORS с целью поиска магнитного поля, но результат оказался отрицательным. Наши наблюдения на БТА также не показывают признаков магнитного поля сильнее 500 Гс.

Звезда включена в список объектов Ae/Be Хербига в близких OB-ассоциациях (Hernández et al. 2005), однако в наших спектрах в области 4450–4950 Å признаки эмиссий не выявлены.

2.3.2. HD 36313 = V1093 Orion = BD –00°977
= Renson 9370 = Brown 014b

Эта двойная звезда является переменной. Спутник слабее главного компонента на 0.5 зв. вел. и находится на расстоянии 0"1 (Catalano and Renson 1998). North (1984) нашел периодическую переменность с элементами

$$\text{HJD}(\text{min}) = 2444976.985 + 0.58933 E.$$

Потоки во всех фильтрах меняются в фазе в виде двойной волны.

Первым магнитное поле звезды обнаружил Ворга (1981). По наблюдениям на бальмеровском магнитометре пределы изменения продольной компоненты магнитного поля составляют от –1520 до 1110 Гс. Наша попытка измерить поле по линиям металлов закончилась неудачей (Romanuk et al. 2016). Более внимательный анализ данных показал, что в спектре звезды присутствуют два набора линий, по-разному уширенных вращением. Узких линий, принадлежащих холодному спутнику, в спектре намного больше. По всей видимости, этот компонент системы не имеет крупномасштабного поля. Зато по линии водорода $H\beta$ успешно обнаруживается магнитное поле главного компонента. Нулевой вклад спутника уменьшает величину суммарного поля примерно на 30%, что находится в пределах ошибок измерений. По этой причине мы решили использовать оригинальные результаты измерений, полученные по линии $H\beta$, для вычисления величины $\langle B_e \rangle$ для этой звезды:

$$\langle B_e \rangle = 1337 \text{ Гс}, \sigma = 500, \chi^2/n = 7.2.$$

Мы считаем, что ошибка измерения поля σ по одной линии составляет 500 Гс.

Фотометрическая кривая блеска звезды, полученная спутником TESS, имеет вид двойной волны. При более детальном рассмотрении кривой оказалось, что она содержит компоненты как минимум трех периодических процессов. Наибольшая амплитуда соответствует колебаниям блеска с периодом $P_{\text{magn}} = 0.58913$ сут. (рис. 1), который почти совпадает с данными North (1984). Два других процесса с существенно меньшими амплитудами имеют периоды $P_1 = 3^{\text{d}}6729$ и $P_2 = 2^{\text{d}}987$. По всей видимости, P_1 соответствует периоду вращения холодного компонента, линии которого доминируют в наблюдаемом спектре HD 36313.

Рисунок 2 дает представление о характере изменения продольного магнитного поля в наших измерениях. В качестве периода взято значение, полученное из фотометрии TESS, $T_0 = 2444976.985$. Величины B_e демонстрируют большое рассеяние, но измерения, полученные классическим методом и по линии водорода, хорошо коррелируют между собой. Обращает на себя внимание фазовый сдвиг фотометрической и магнитной кривых.

Уширение линий в спектре соответствует $v_e \sin i_1 = 160$ км с^{–1} для главного компонента и $v_e \sin i_1 = 30$ км с^{–1} — для вторичного. Мы определяем физические параметры главного компонента следующим образом: $T_{\text{eff}} = 13000 \pm 480$ К, $\lg g = 4.0 \pm 0.3$.

2.3.3. HD 36485 = δ Orion C = BD –00°982
= Renson 9440 = Brown 020b

Система δ Ориона состоит из четырех звезд: первичный компонент А (HR 1852 = HD 36486) сам является спектрально-двойной звездой с $m_V = 2.23$ зв. вел., компонент В находится в 33"0 от первичного и имеет величину $m_V = 14.0$. Звезда С (HR 1851 = HD 36485) с усиленными линиями гелия находится на расстоянии 51"7 от А и имеет величину $m_V = 6.85$.

HD 36485 — давно известная магнитная звезда, ее подробному изучению посвящена работа Bohlender (1989). Результаты измерения магнитного поля звезды в основном опубликованы в работе Bohlender et al. (1987). Данные показывают пределы изменения B_e от –3800 до –3100 Гс. Mathys and Hubrig (1997) по одному измерению по линиям металлов нашли продольное поле –1850 Гс, но объяснить расхождение с результатами Болендера не смогли.

Мы выполнили собственные наблюдения звезды. Одиннадцать наших измерений показали, что по линиям металлов поле меняется от –3400 до –2300 Гс, а по линии $H\beta$ — от –3100 до –1900 Гс. Соответствующие значения среднеквадратического продольного поля по методу Бэбкока и по водороду получаются следующими:

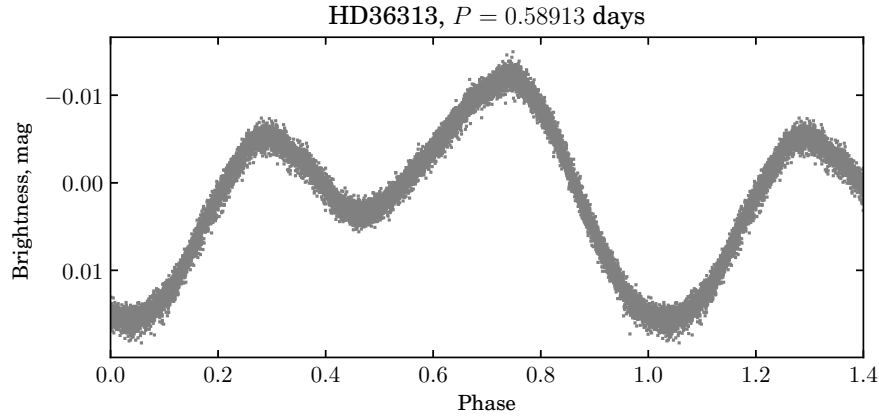


Рис. 1. Фотометрическая кривая блеска магнитного компонента в системе HD 36313 по наблюдениям TESS.

- $\langle B_e \rangle = 2724$ Гс, $\sigma = 261$, $\chi^2/n = 113$ (по методу Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle = 2156$ Гс, $\sigma = 132$, $\chi^2/n = 635$ (по методу).

Известно, что HD 36485 является спектрально-двойной системой, однако наблюдения методами спекл-интерферометрии обнаруживают еще один компонент. Tokovinin (2008) находит на расстоянии $\rho = 0''.327$ спутник слабее главной звезды на $\Delta m_V = 1.5$ зв. вел. Таким образом, HD 36485 — сложная кратная система, главный компонент которой обладает сильным магнитным полем переменной полярности.

По нашим спектрам мы определили основные параметры магнитной звезды: $v_e \sin i = 40$ км с⁻¹, $T_{\text{eff}} = 18000 \pm 250$ К, $\lg g = 4.0 \pm 0.3$.

В направлении на звезду наблюдается достаточно сильная межзвездная линейная поляризация $P = 0.18\%$.

Звезда наблюдалась на спутнике TESS, однако из-за сложной конфигурации системы разделить периодические сигналы в имеющейся составной кривой блеска не представляется возможным.

2.3.4. HD 36526 = BD -01° 933 = V 1099 Orion = Renson 9460 = Brown 023b

Магнитное поле звезды с экстремумами B_e от -1000 до +3500 Гс обнаружил Vogt (1981). В статье Romanjuk et al. (2016) представлены результаты наших измерений ее продольного поля. North (1984) нашел фотометрическую переменность звезды. Согласно этой работе, переменность наблюдается во всех фильтрах со слабо выраженным вторичным минимумом и элементами

$$\text{HJD}(\text{min}) = 2444978.825 + 1.5405 E.$$

Кривая блеска, полученная на TESS, показывает присутствие двух периодов: $1^{\text{d}}54170$ и $1^{\text{d}}7073$. Как видно, первое значение близко к тому, что приводит North (1984), и является периодом вращения магнитной звезды. Кривая блеска звезды, фазированная с периодом $1^{\text{d}}54170$ и $T_0 = 2444978.825$, приведена на рис. 3, а на рис. 4 с теми же элементами представлены наши измерения продольного магнитного поля.

Характер спектральной переменности HD 36526 в наших данных говорит о возможном присутствии линий как минимум еще одного компонента. Таким компонентом может быть спутник, обнаруженный Valega et al. (2012) на расстоянии $0''.15$. Разница блеска Δm_V между двумя звездами составляет всего 1.3 зв. вел. Таким образом, спектр спутника может оказать существенное влияние на наши измерения, а также на форму кривой блеска магнитной звезды. По нашим измерениям среднеквадратическое поле $\langle B_e \rangle$ HD 36526 получается следующим:

- $\langle B_e \rangle = 2801$ Гс, $\sigma = 384$, $\chi^2/n = 56.8$ (по методу Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle = 1695$ Гс, $\sigma = 137$, $\chi^2/n = 539.3$ (по методу регрессии).

Предварительный анализ спектров дает следующие значения фундаментальных параметров магнитной звезды: $T_{\text{eff}} = 16000 \pm 210$ К, $\lg g = 4.0 \pm 0.3$. Вращательное уширение линий соответствует $v_e \sin i = 50$ км с⁻¹. Результатов измерений лучевой скорости в литературе нет. Измерения спектров, полученных на БТА, дают значение $V_R = 30$ км с⁻¹.

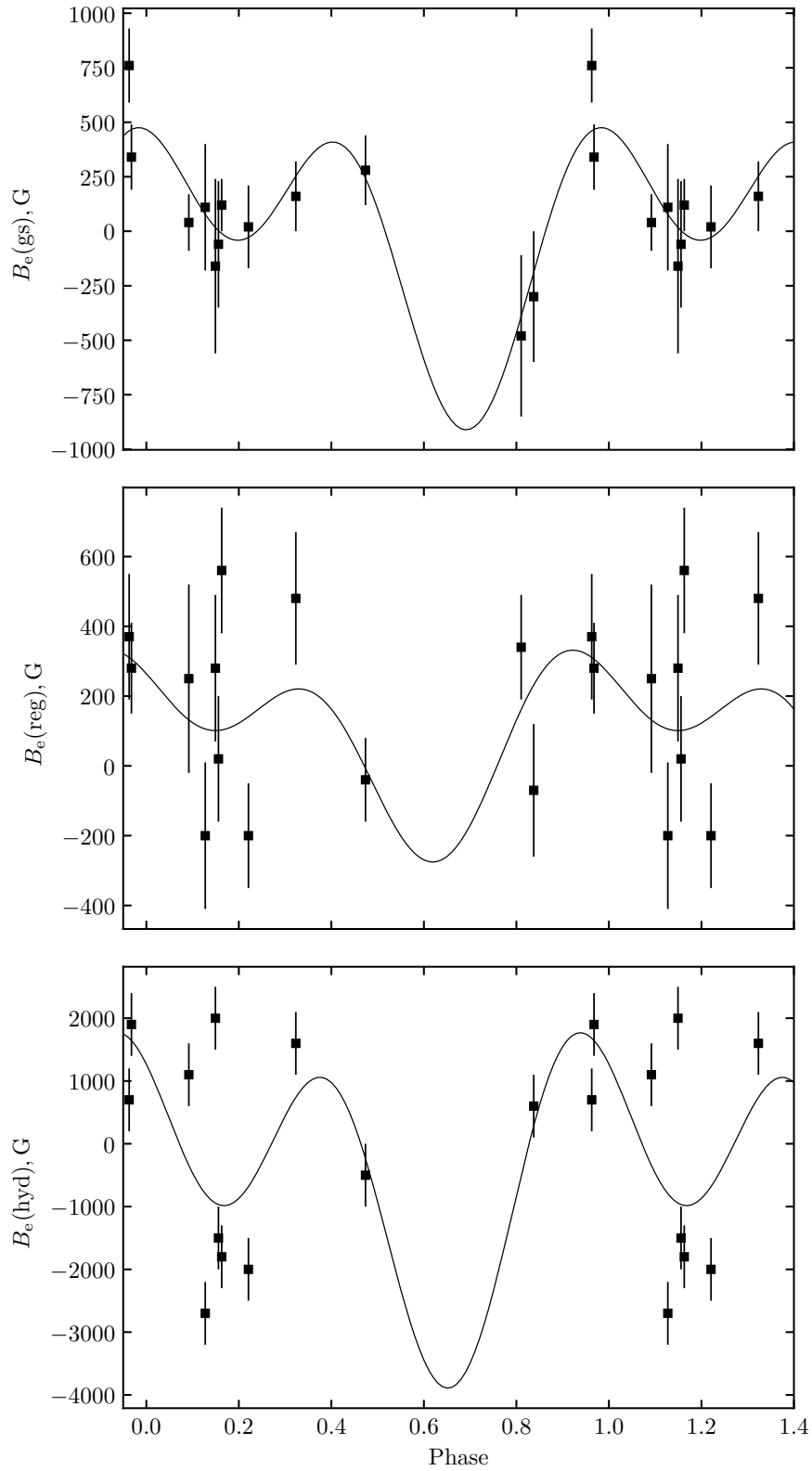


Рис. 2. Кривые переменности продольного магнитного поля HD 36313, построенные по нашим наблюдениям.

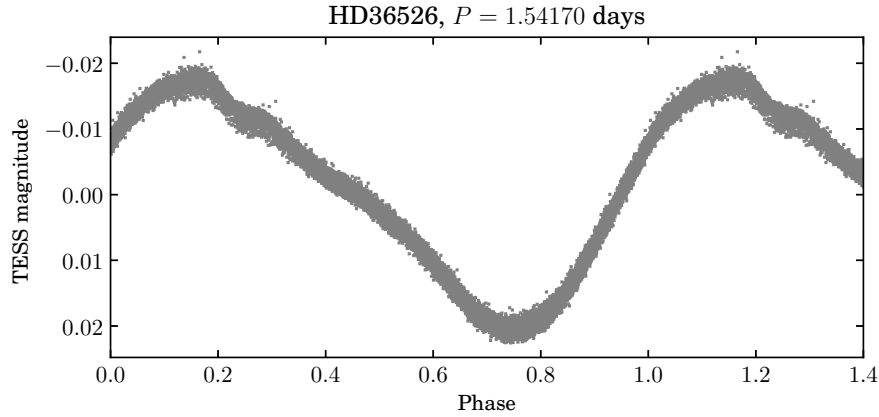


Рис. 3. Фотометрическая кривая блеска HD 36526 по наблюдениям TESS.

2.3.5. HD 36668 = BD +00°1113 = V1107 Orion = Renson 9560 = Brown 031b

Впервые магнитное поле звезды измерил Вогга (1981) по наблюдениям на бальмеровском магнитометре. Полученные значения B_e находились в пределах от -2100 до $+2000$ Гс. Мы провели восемь наблюдений звезды. По измерениям эффекта Зеемана в линиях металлов и водорода подтверждается наличие сильного поля, но пределы его изменения существенно больше опубликованных Romanyuk et al. (2017).

С учетом имеющихся данных среднеквадратичные значения поля получаются следующие:

- $\langle B_e \rangle = 1892$ Гс, $\sigma = 451$, $\chi^2/n = 37.6$ (по методу Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle = 953$ Гс, $\sigma = 105$, $\chi^2/n = 203.5$ (по методу регрессии).

Данная звезда является фотометрической переменной. North (1984) дает следующие элементы кривой блеска:

$$\text{HJD}(\text{min}) = 2444988.496 + 2.1211 E.$$

Изменение блеска происходит в виде двойной волны, в которой вторичный максимум почти такой же глубокий, как и главный. Звезда наблюдалась на спутнике TESS, но ее фотометрия была сделана отдельно в обзоре CDIPS (Bouta et al. 2019). Анализ данных, очищенных от инструментальных трендов, дает значение периода переменности $P = 2^{\text{d}}1204$, близкое к приведенному выше из работы North (1984). Итоговая кривая блеска звезды имеет сложную форму и приведена на рис. 5.

Мы оценили фундаментальные параметры звезды: $v_e \sin i = 60$ км с $^{-1}$, $T_{\text{eff}} = 13500 \pm 250$ К, $\lg g = 4.0 \pm 0.4$. Исходя из этих данных, а также из положения звезды в пространстве, можно

найти светимость и массу звезды. Для HD 36668 эти значения равны соответственно $\lg \frac{L}{L_{\odot}} = 2.4$

и $\frac{M}{M_{\odot}} = 3.7$. В работе Romanyuk et al. (2013)

приведены две оценки массы HD 36668, равные $3.8 M_{\odot}$, что совпадает с данными результатами.

В работе Bouy and Alves (2015) утверждается, что HD 36668 не принадлежит ассоциации, а относится к звездному потоку в Орионе и находится ближе к наблюдателю. Однако параллакс, полученный в ходе миссии GAIA, опровергает это утверждение. Величина $\pi = 2.36$ mas соответствует расстоянию $d = 424$ пк, а это расстояние до центра подгруппы (b) ассоциации (Romanyuk et al. 2013).

Hernández et al. (2005) включили HD 36668 в каталог звезд Ae/Be Херbiga в близких OB-ассоциациях, но в наших спектрах в области 4450–4950 Å не обнаружено никаких признаков, характерных для Ae/Be-звезд.

2.3.6. HD 36955 = BD -01°955 = Renson 9740 = Brown 052b

Магнитное поле этой звезды было обнаружено нами на БТА (Kudryavtsev et al. 2006). В базе данных SIMBAD указано, что HD 36955 — двойная или кратная система. О наличии спутника с блеском $m_V = 11$ зв. вел. на расстоянии 1"5 говорится в работе Rastegaev et al. (2014).

Oelkers et al. (2018) нашли период вращения звезды $P = 2^{\text{d}}284965$. Кривая блеска, построенная по фотометрии, выполненной на спутнике TESS, имеет простую форму (рис. 6). Уточненное значение фотометрического периода переменности равно $2^{\text{d}}283506$. Оба этих значения плохо согласуются с величинами продольного магнитного поля. Анализ наших измерений B_e свидетельствует

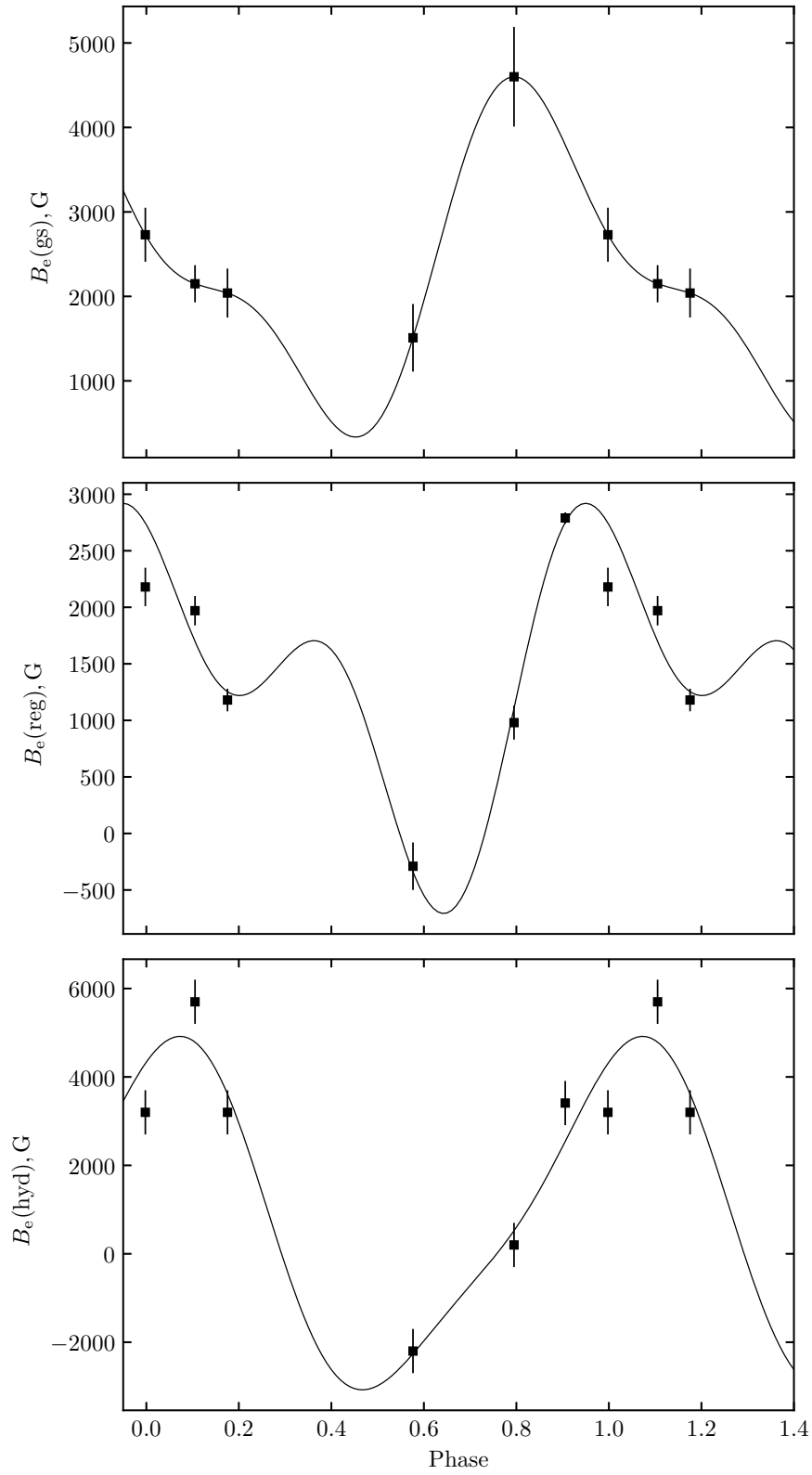


Рис. 4. Кривые переменности продольного магнитного поля HD 36526, построенные по нашим наблюдениям.

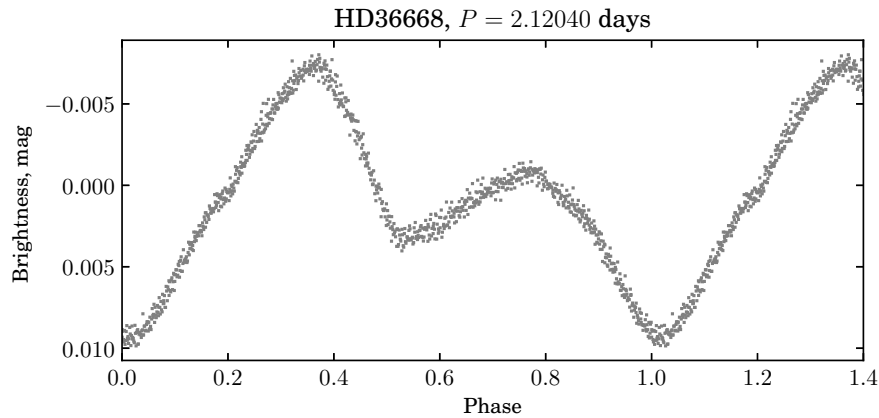


Рис. 5. Фотометрическая кривая блеска HD 36668 по наблюдениям TESS.

в пользу несколько более длинного периода — $2^{\text{d}}875108$ (рис. 7). В причинах таких расхождений еще предстоит разобраться.

Среднеквадратичное продольное магнитное поле звезды, измеренное по методу Бэбкока и по регрессии, получается следующим:

- $\langle B_e \rangle = 842$ Гс, $\sigma = 219$, $\chi^2/n = 28.2$,
- $\langle B_e \rangle = 708$ Гс, $\sigma = 90$, $\chi^2/n = 93.9$.

Фундаментальные параметры HD 36995, определенные нами, следующие: $v_e \sin i = 26$ км с $^{-1}$, $T_{\text{eff}} = 10800 \pm 250$ К, $\lg g = 4.2 \pm 0.5$.

2.3.7. HD 37140 = V1130 Orion = BD −00° 1018
= Renson 9910 = Brown 063b

Магнитное поле звезды обнаружил Ворга (1981). В его измерениях продольная компонента поля менялась от −1050 до +400 Гс. North (1984) нашел фотометрическую переменность звезды с элементами

$$\text{HJD}(\text{min}) = 2444978.036 + 2.7088 E.$$

Кривые блеска во всех фильтрах синусоидальные. Однако в литературе имеется и другое вероятное значение периода вращения — $0^{\text{d}}611465$ (Oelkers et al. 2018).

Фотометрия звезды по снимкам TESS выполнялась в проекте CDIPS. Очищенная от трендов кривая блеска прекрасно фазируется с периодом $P = 2^{\text{d}}704179$, что близко к значению Норта. Rastegaev et al. (2014) утверждают, что HD 37140 — тройная система с компонентами спектральных классов A7 и F–K на расстояниях $d = 23$ а.е и 50 а.е. Более горячий спутник может оказаться пульсирующей звездой типа δ Sct, поскольку следы характерных пульсаций малой

амплитуды присутствуют в фотометрии TESS (см. рис. 8).

Звезда HD 37140 — магнитная, наши измерения продольного поля двумя методами представлены нарис. 9. Среднеквадратичские величины магнитного поля по нашим данным в зависимости от метода (модифицированный метод Бэбкока, регрессия) следующие:

- $\langle B_e \rangle = 585$ Гс, $\sigma = 207$, $\chi^2/n = 14.0$,
- $\langle B_e \rangle = 270$ Гс, $\sigma = 107$, $\chi^2/n = 9.6$.

По результатам анализа спектров мы нашли следующие параметры звезды: $v_e \sin i = 30$ км с $^{-1}$, $T_{\text{eff}} = 13500 \pm 240$ К, $\lg g = 3.7 \pm 0.4$.

2.3.8. HD 37149 = HIP 26319 = Renson 9920
= Brown 065b

В каталоге химически пекулярных звезд (Renson and Manfroid 2009) HD 37149 обозначена как He-wk, но классификация может быть ошибочной: в литературе имеются сведения, что HD 37149 — Be-звезда. Хотя в наших спектрах, полученных в области 4450–4950 Å, признаков эмиссии не видно, мы будем считать ее немагнитной Be-звездой. В пользу этого предположения говорят и безрезультатные попытки обнаружить магнитное поле звезды (соответственно методом Бэбкока и по регрессии):

- $\langle B_e \rangle = 1826$ Гс, $\sigma = 2238$, $\chi^2/n = 0.4$,
- $\langle B_e \rangle = 205$ Гс, $\sigma = 170$, $\chi^2/n = 2.1$.

Фотометрия звезды, выполненная на спутнике TESS, показывает наличие мультипериодической малоамплитудной переменности (рис. 10). Возможные периоды колебаний ($P_1 = 0^{\text{d}}3196$ и $P_2 = 0^{\text{d}}3245$) также являются типичными для

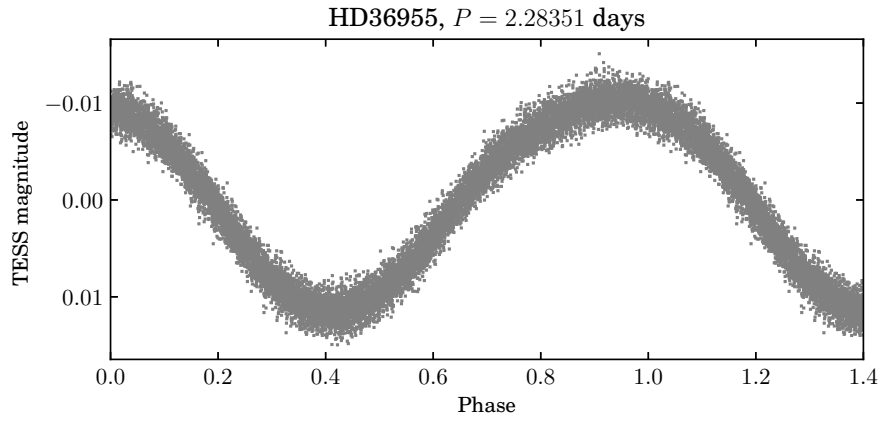


Рис. 6. Фотометрическая кривая блеска HD 36955 по наблюдениям TESS.

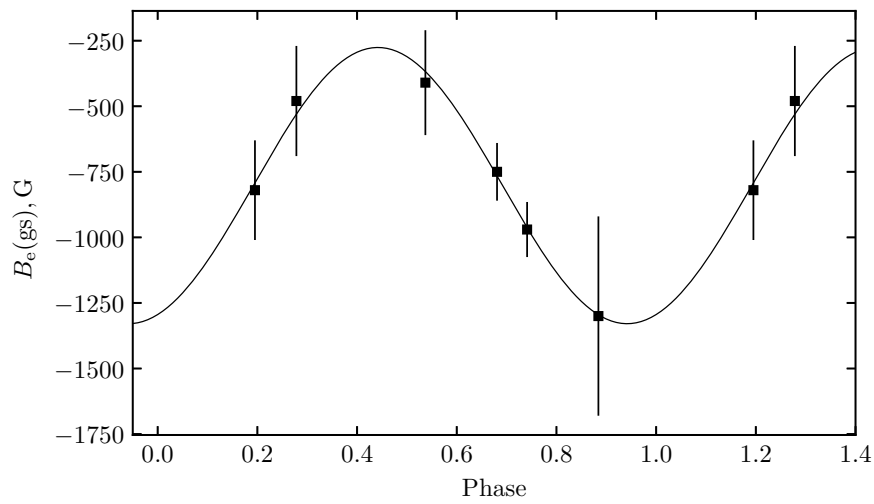


Рис. 7. Кривая переменности продольного магнитного поля HD 36955, полученная по измерениям линий металлов.

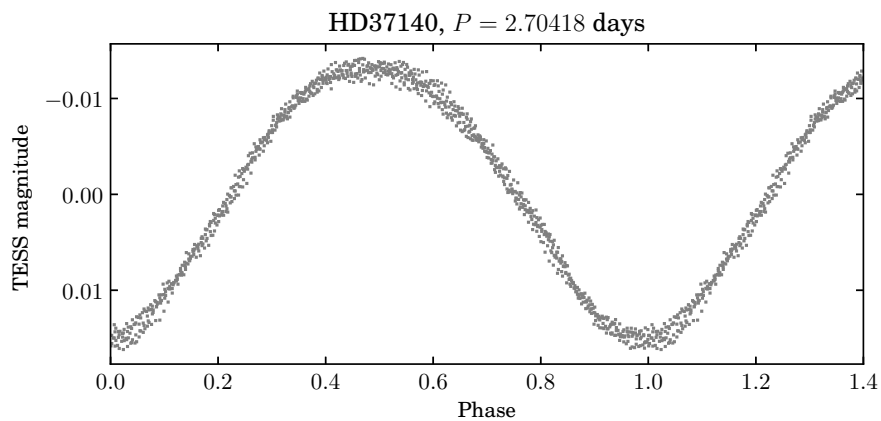


Рис. 8. Фотометрическая кривая блеска HD 37140 по наблюдениям TESS.

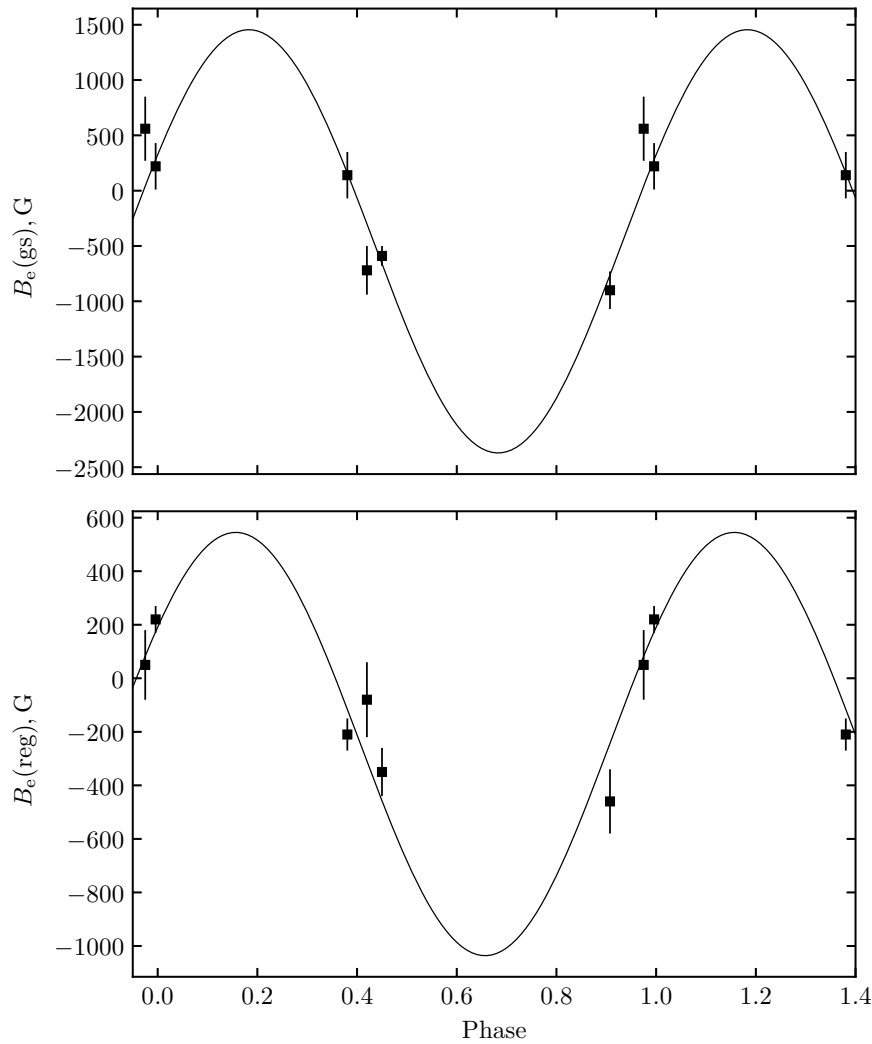


Рис. 9. Кривые переменности продольного магнитного поля HD 37140, полученные по измерениям линий металлов методом Бэбкока и по регрессии.

Be-звезд (Neiner and Hubert 2009). Ввиду того, что HD 37149 — не химически пекулярная звезда, мы ее исключаем из дальнейшего рассмотрения.

*2.3.9. HD 37235 = BD −00°1023 = Renson 9960
= Brown 069b*

Эта звезда ранее на предмет поисков магнитного поля не изучалась. В имеющихся спектрах наблюдаются три более-менее сильные линии, уширенные вращением. По этой причине точность измерения продольного магнитного поля очень низкая. Результаты измерений шести зеемановских спектров говорят об отсутствии продольного магнитного поля сильнее 1 кГс. Признаки зеемановской сигнатуры не наблюдаются ни в линиях металлов, ни в водороде. Среднеквадратичное магнитное поле в зависимости от метода получается следующим:

- $\langle B_e \rangle = 4204$ Гс, $\sigma = 2889$, $\chi^2/n = 1.2$ (модифицированный метод Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle = 227$ Гс, $\sigma = 170$, $\chi^2/n = 2.3$ (метод регрессии).

Отрицательный результат поисков магнитного поля HD 37235 нельзя рассматривать как признак того, что звезда не является химически пекулярной. Фотометрическая кривая блеска HD 37235 доступна в материалах обзора CDIPS, основанного на анализе снимков, полученных спутником TESS. В периодограмме отчетливо выделяется сигнал, соответствующий периоду переменности звезды $P = 0^d48469$. По этому параметру HD 37235 — один из самых быстрых ротаторов с фотометрической переменностью. Блеск звезды меняется

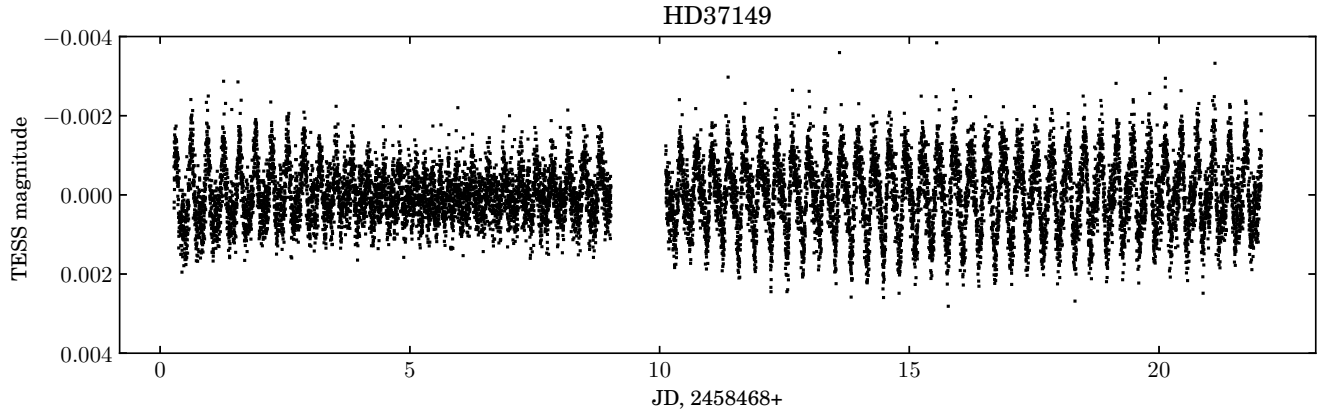


Рис. 10. Фотометрическая кривая блеска HD 37149 по наблюдениям TESS.

в небольших пределах в форме двойной волны, типичной для СР-звезд (рис. 11).

Нами определены физические параметры звезды: $v_e \sin i = 320 \text{ км с}^{-1}$, $T_{\text{eff}} = 13500 \pm 300 \text{ К}$, $\lg g = 4.0 \pm 0.3$.

2.3.10. *HD 37321 = HIP 26439 = Renson 10000 = Brown 075b*

Эта массивная звезда ($5.2 M_{\odot}$) является главным компонентом двойной системы ADS 4222AB со спутником на расстоянии $0''.8$ (Romanuk et al. 2013). В диапазоне длин волн спектров, полученных нами, наблюдается небольшое количество линий. Быстрое вращение звезды не только приводит к уширению ее линий, но и существенно снижает точность измерения магнитного поля.

Ни одно из пяти измерений продольного поля не показало значимый результат: магнитное поле нам найти не удалось. Среднеквадратичные величины $\langle B_e \rangle$, найденные нами модифицированным методом Бэбкока и методом регрессии, следующие:

- $\langle B_e \rangle = 426 \text{ Гс}$, $\sigma = 439$, $\chi^2/n = 0.9$,
- $\langle B_e \rangle = 290 \text{ Гс}$, $\sigma = 202$, $\chi^2/n = 1.4$.

Наша оценка физических параметров звезды: $v_e \sin i = 130 \text{ км с}^{-1}$, $T_{\text{eff}} = 15000 \pm 350 \text{ К}$, $\lg g = 4.1 \pm 0.4$, $\lg \frac{L}{L_{\odot}} = 3.3$, $\frac{M}{M_{\odot}} = 5.8$, $\frac{R}{R_{\odot}} = 4.6$.

Значение массы хорошо согласуется с оценкой из работы Romanuk et al. (2013). В фотометрии TESS (обзор CDIPS) звезда демонстрирует слабую мультипериодическую переменность, характерную для массивных пульсирующих звезд.

2.3.11. *HD 37333 = BD -02° 1319 = Renson 10010 = Brown 077b*

HD 37333 — новая магнитная звезда, член скопления σ Orion. В спектре звезды усилены линии кремния.

Bagnulo et al. (2015) наблюдали HD 37333 на FORS1 VLT, но магнитное поле не обнаружили. Впервые магнитное поле было найдено нами, но результаты ранее не публиковались. Среднеквадратичное продольное поле $\langle B_e \rangle$ по нашим шести наблюдениям следующее:

- $\langle B_e \rangle = 869 \text{ Гс}$, $\sigma = 246$, $\chi^2/n = 19.4$,
- $\langle B_e \rangle = 433 \text{ Гс}$, $\sigma = 120$, $\chi^2/n = 14.6$.

Как обычно, величина среднеквадратического поля, измеренная методом регрессии, получается меньше, чем при измерениях классическим методом.

В каталоге Heinze et al. (2018) приведен период вращения звезды $P = 5^{\text{d}}.612112$, но наши измерения B_e с ним не согласуются. Анализ кривой блеска, полученной в обзоре CDIPS на основе наблюдений TESS, показывает, что настоящий период вращения — $1^{\text{d}}.68339$. С этим периодом изменение блеска звезды происходит в виде двойной волны с двумя минимумами одинаковой глубины (рис. 12). Фазируемые с указанным фотометрическим периодом магнитные измерения попадают в диапазон фаз 0.45–0.85. Этих данных недостаточно для каких-либо выводов о характере магнитной переменности.

Исходя из имеющихся данных, мы нашли следующие фундаментальные параметры звезды: $v_e \sin i = 50 \text{ км с}^{-1}$, $T_{\text{eff}} = 12000 \pm 370 \text{ К}$, $\lg g = 4.5 \pm 0.3$.

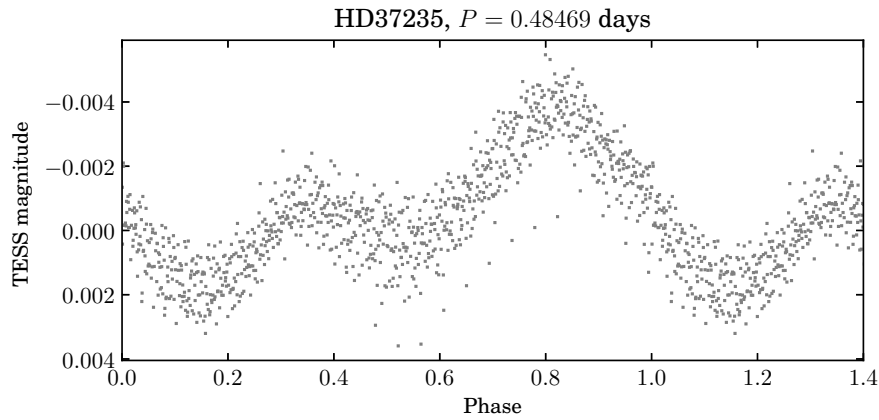


Рис. 11. Фотометрическая кривая блеска HD 37235 по наблюдениям TESS.

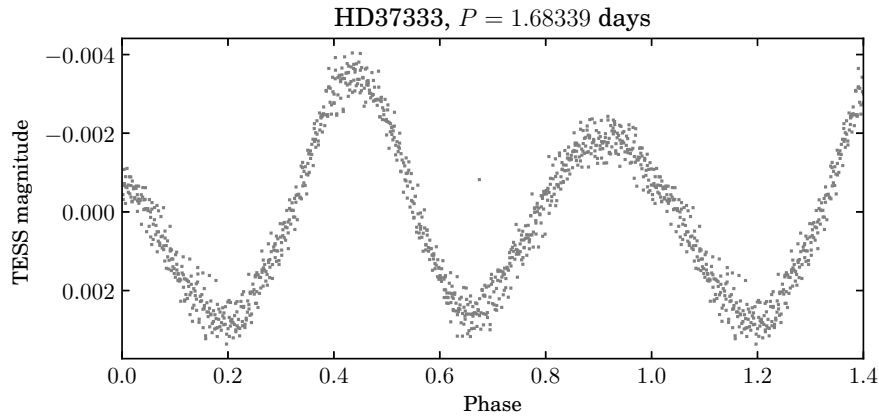


Рис. 12. Фотометрическая кривая блеска HD 37333 по наблюдениям TESS.

2.3.12. HD 37479 = σ Orion E = BD -02°1327
= Renson 10080 = Brown 086b

HD 37479 — хорошо изученная магнитная пекулярная звезда с усиленными линиями гелия. Bohlender et al. (1987) выполнили 22 измерения продольного магнитного поля звезды на бальмеровском магнитометре Ландстрита. Авторами была получена более-менее синусоидальная кривая. Цель наших измерений — получить данные для всех магнитных звезд единообразным способом в однородной системе, для того чтобы можно было сравнивать результаты, полученные по линии водорода $H\beta$ и по линиям металлов. Другие детали нашего исследования приведены в работе Romanuyuk et al. (2013).

Мы подтверждаем тот факт, что звезда имеет очень сильное магнитное поле. Среднеквадратичские величины продольного поля по методу Бэбкока и по регрессии получаются следующими:

- $\langle B_e \rangle = 3040$ Гс, $\sigma = 853$, $\chi^2/n = 29.2$,

- $\langle B_e \rangle = 1307$ Гс, $\sigma = 324$, $\chi^2/n = 46.6$.

В результатах, полученных двумя разными методами, заметна очень большая разница.

Фундаментальные параметры звезды следующие: $v_e \sin i = 150$ км с⁻¹, $T_{\text{eff}} = 21000 \pm 550$ К, $\lg g = 3.5 \pm 0.4$.

2.3.13. HD 37525 = BD -02°1328 = Renson 10110
= Brown 088b

В базе SIMBAD эта звезда представлена как молодой звездный объект. Двойная система HD 37525AB входит в скопление σ Orion. В каталоге Renson and Manfroid (2009) звезда классифицирована как пекулярная с ослабленным содержанием гелия, однако в спектре линия гелия 4471 Å существенно сильнее линии Mg II 4481 Å. Это значит, что содержание гелия не так уж и мало. Не исключено, что HD 37525 — нормальная звезда соответствующего спектрального класса.

В литературе нет сведений о каких-либо изменениях магнитного поля звезды. В пяти наблюдениях на БТА с зеемановским анализатором продольное поле с верхним пределом 500 Гс также не было найдено. Среднеквадратическое поле $\langle B_e \rangle$ в наших измерениях получается следующим:

- $\langle B_e \rangle = 1362$ Гс, $\sigma = 1845$, $\chi^2/n = 0.5$ (по методу Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle = 127$ Гс, $\sigma = 192$, $\chi^2/n = 0.3$ (по методу регрессии).

Фундаментальные параметры HD 37525, определенные нами, следующие: $v_e \sin i = 160$ км с⁻¹, $T_{\text{eff}} = 17000 \pm 270$ К, $\lg g = 4.1 \pm 0.3$.

2.3.14. HD 37633 = BD -02°1332 = Renson 10130 = Brown 093b

Магнитное поле этой звезды было найдено нами в 2013 г., однако результаты измерений ранее не публиковались. Vagnulo et al. (2015) получили одно измерение продольного поля на FORS1 VLT: $B_z = 440 \pm 200$ Гс.

North (1984) нашел периодическую фотометрическую переменность с элементами

$$\text{HJD}(\text{min}) = 2444983.923 + 1.5718 E.$$

Кривая блеска звезды по наблюдениям TESS имеет две гармоники с более плоским минимумом (рис. 13). Период переменности практически совпадает с периодом из работы North (1984): $P = 1^{\text{d}}57305$. Наши измерения продольного магнитного поля хорошо согласуются с этим значением (рис. 14).

Величина среднеквадратичного продольного магнитного поля свидетельствует о том, что звезда является магнитной:

- $\langle B_e \rangle = 520$ Гс, $\sigma = 121$, $\chi^2/n = 41.2$ (по методу Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle = 382$ Гс, $\sigma = 97$, $\chi^2/n = 25.5$ (по методу регрессии).

По разным источникам звезда входит в скопления σ Orion и Collinder 70.

Мы нашли следующие параметры звезды: $v_e \sin i = 35$ км с⁻¹, $T_{\text{eff}} = 13000 \pm 250$ К, $\lg g = 4.0 \pm 0.4$.

2.3.15. HD 37776 = V901 Orion = BD -01°1005 = Renson 10190 = Brown 104b

HD 37776 — хорошо известная магнитная химически пекулярная звезда, которая многократно изучалась разными авторами, в том числе и авторами настоящей статьи на протяжении десятков лет. Звезда имеет экстремально сильное поле сложной не дипольной конфигурации (Kochukhov et al. 2011). Несмотря на безусловные успехи в изучении этого уникального объекта, на наш взгляд, удовлетворительная магнитная модель HD 37776 до настоящего времени так и не построена. Новые высокоточные фотометрические наблюдения миссии TESS поставили скорее новые вопросы, чем приблизили исследователей к разгадке феномена HD 37776.

В течение зимнего сезона 2019/2020 гг. мы выполнили четырнадцать наблюдений звезды с зеемановским анализатором. Линии в спектре HD 37776 имеют очень сложную форму, наблюдается исключительно сильная круговая поляризация в линиях, вызванная эффектом Зеемана. При этом линии разных химических элементов ведут себя по-разному, что приводит к сильному разбросу результатов измерений поля. Применение метода регрессии оказалось неэффективным по причине сильного поля сложной геометрии.

Среднеквадратичная величина $\langle B_e \rangle$, найденная по измерениям линий металлов и по водороду, следующая:

- $\langle B_e \rangle = 7285$ Гс, $\sigma = 2686$, $\chi^2/n = 17.2$ (по методу Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle = 8644$ Гс, $\sigma = 500$, $\chi^2/n = 298.9$ (по водороду).

В таблице 3 мы приводим результаты измерений продольного поля по четырем элементам: H β , Mg II (4481 Å), He I (4471, 4713, 4922 Å) и Si III (4552, 4567, 4574 Å). Для гелия и кремния взяты средние значения по указанным трем линиям.

Продольное магнитное поле в зависимости от элемента показывает очень разное поведение. В качестве периода вращения мы взяли значение $1^{\text{d}}539494$, определенное из фотометрии TESS (рис. 15). Изменение продольного магнитного поля в зависимости от фазы периода вращения показано на рис. 16.

Профили линий в имеющихся спектрах часто раздваиваются, указывая на зеемановское расщепление в поле порядка 70 кГс. Совершенно отчетливо видно, что экстремумы блеска совпадают с экстремумами магнитного поля. При этом поле по разным элементам меняется по-разному. Например, поле по линиям гелия и кремния меняется в

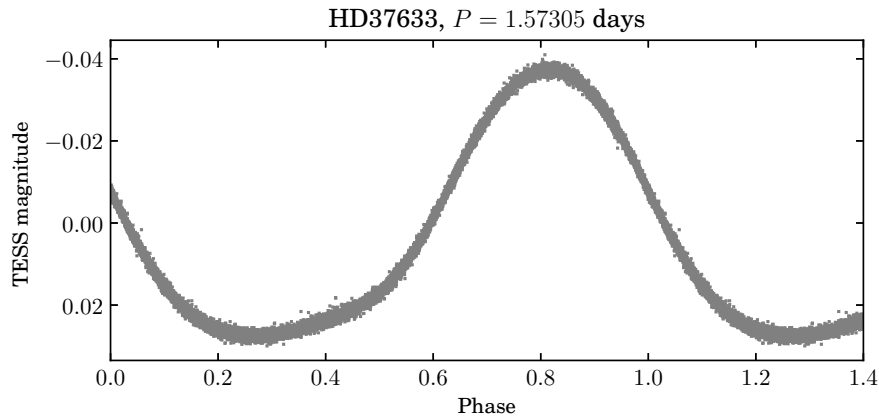


Рис. 13. Фотометрическая кривая блеска HD 37633 по наблюдениям TESS.

Таблица 3. Результаты измерений продольного поля B_e звезды HD 37776 по отдельным элементам

| JD, (2450000+) | $B_e(\text{H}\beta)$, кГс | $B_e(\text{Mg II})$, кГс | $B_e(\text{He I})$, кГс | $B_e(\text{Si III})$, кГс |
|----------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 8777.441 | 6.6 | -12.2 | 11.1 ± 4.0 | 30.5 ± 3.0 |
| 8777.553 | -3.1 | -9.0 | -6.8 ± 1.9 | -5.3 ± 2.2 |
| 8778.460 | 7.0 | - | 5.2 ± 5.1 | - |
| 8778.578 | 1.5 | -10.9 | 0.8 ± 1.1 | -20.8 ± 3.0 |
| 8799.396 | 6.9 | -5.0 | 9.0 ± 1.2 | -15.5 ± 1.4 |
| 8801.555 | 7.8 | -9.5 | 7.1 ± 9.3 | -18.5 ± 1.6 |
| 8805.369 | -5.3 | -4.8 | -5.3 ± 0.8 | -7.2 ± 0.1 |
| 8805.559 | 12.3 | - | 16.0 ± 11.5 | -5.5 ± 2.2 |
| 8830.315 | 10.8 | -7.4 | 4.7 ± 7.3 | -13.9 ± 2.3 |
| 8830.478 | -4.8 | -6.8 | -5.8 ± 1.1 | -7.6 ± 1.2 |
| 8834.418 | 4.3 | -11.5 | 4.5 ± 2.2 | 27.6 ± 0.9 |
| 8834.511 | -2.5 | -4.6 | -4.6 ± 0.4 | -5.2 ± 3.5 |
| 8855.184 | -0.7 | -4.9 | -2.9 ± 0.5 | -7.1 ± 1.0 |
| 8857.255 | -15.6 | 12.7 | -6.7 ± 7.7 | 20.0 ± 2.8 |

противофазе. В этой статье мы публикуем только первые результаты. Более детальный анализ поля HD 37776 еще предстоит, однако наличие очень большого (многие десятки кГс) и сложного, не имеющего аналогов, поля очевидно.

Звезда имеет следующие физические параметры: $v_e \sin i = 80 \text{ км с}^{-1}$, $T_{\text{eff}} = 22000 \pm 350 \text{ К}$, $\lg g = 3.7 \pm 0.6$. Найденная нами эффективная температура хорошо согласуется с многочисленными литературными данными. Масса звезды по данным разных источников находится в пределах от 6.4 до $10 M_{\odot}$ (Romanjuk et al. 2013).

2.3.16. HD 290665 = BD -00°1008 = Renson 9760 = Brown 128b

Магнитное поле этой звезды было найдено нами на БТА. Продольная компонента поля меняется от -3700 до 3900 Гс. Еще одно измерение поля этой звезды было сделано авторами работы Vagnulo et al. (2006) на VLT: $B_l = -1664 \pm 44$ Гс.

Oelkers et al. (2018) в своей статье приводят период вращения звезды $P = 5^{\text{d}}162896$. Близкое значение периода мы получили из анализа кривой

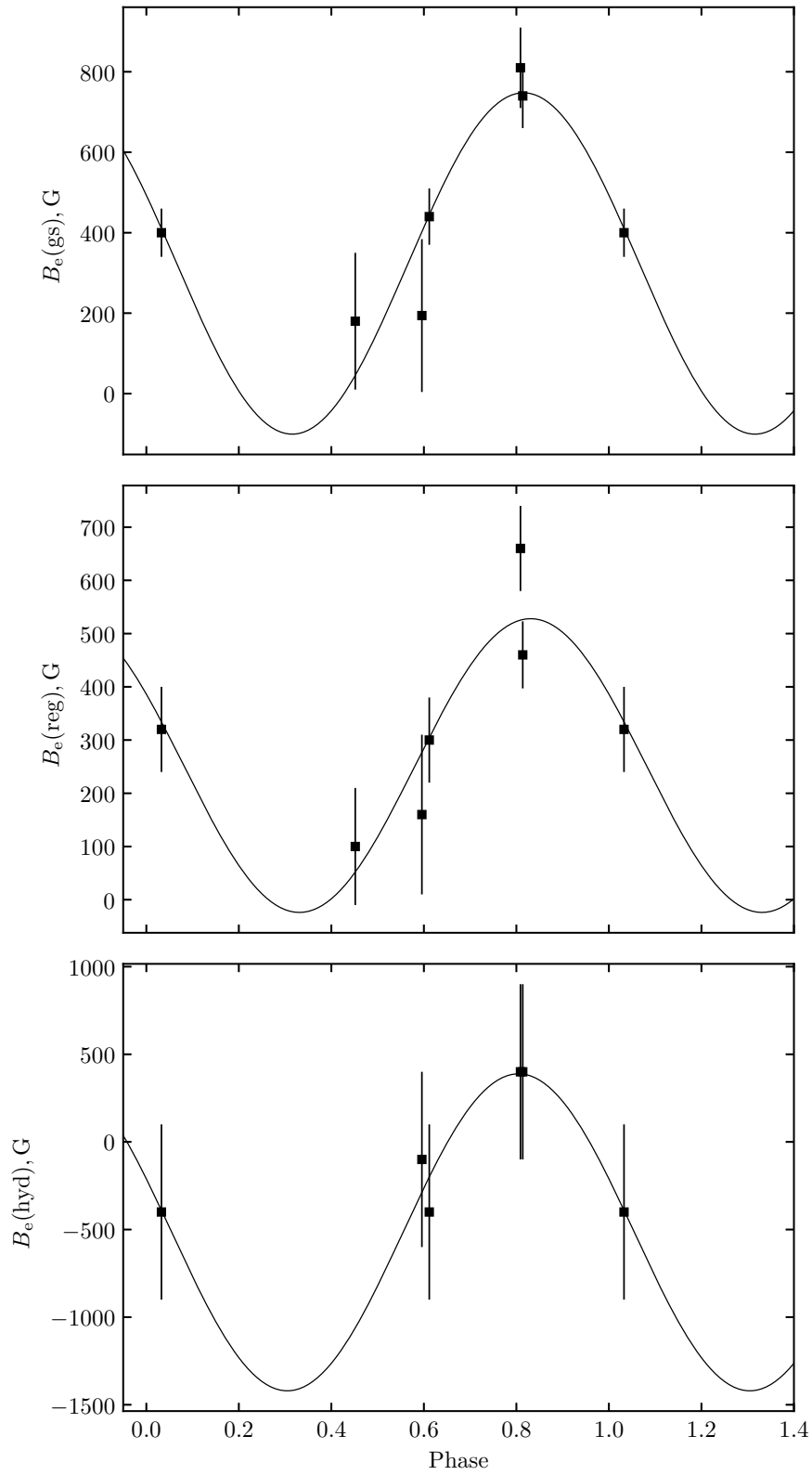


Рис. 14. Кривые переменности продольного магнитного поля HD 37633, полученные по измерениям линий металлов и водороду.

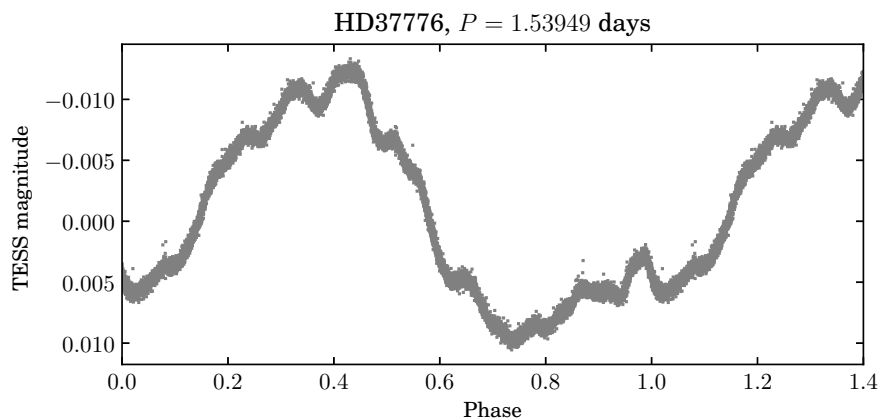


Рис. 15. Фотометрическая кривая блеска HD 37776 по наблюдениям TESS.

блеска HD 290665, полученного в обзоре CDIPS на основе снимков TESS: $P_{\text{TESS}} = 5^{\text{d}}.176873$.

Десять наблюдений звезды на БТА показывают, что период действительно близок к 5 суткам, но наши измерения лучше согласуются с периодом, опубликованным Oelkers et al. (2018). Среднеквадратичные величины продольного магнитного поля звезды следующие:

- $\langle B_e \rangle = 2871$ Гс, $\sigma = 121$, $\chi^2/n = 544.2$ (по методу Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle = 2260$ Гс, $\sigma = 54$, $\chi^2/n = 2343.4$ (по методу регрессии).

Фундаментальные параметры звезды, определенные нами, следующие: $T_{\text{eff}} = 10400 \pm 350$ К, $\lg g = 4.0 \pm 0.3$.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перед тем как перейти к сравнению магнитных свойств двух изученных нами подгрупп (а) и (b) ассоциации Орион OB1, еще раз напомним основные принципы, на которых базируется наше исследование.

Ассоциация OB1 в Орионе имеет явно выраженную неоднородную структуру. Vlaarw (1964) разделил всю область ассоциации на четыре подгруппы. Авторы работы Brown et al. (1994) выделили 814 объектов звездного населения ассоциации. Распределение этих звезд по подгруппам разного возраста выглядит следующим образом:

- Орион OB1 (а), средний возраст 10 млн. лет, содержит 311 звезд,
- Орион OB1 (b), возраст 2 млн. лет — 139 звезд,
- Орион OB1 (с), возраст 5 млн. лет — 350 звезд

Орион OB1 (d), совсем маленькая подгруппа, состоящая из 14 звезд, имеет возраст менее 1 млн. лет.

Почти все перечисленные объекты — это В- и А-звезды главной последовательности. Доля горячих звезд с эффективной температурой $T_{\text{eff}} > 10000$ К выше для внутренних подгрупп: (b) — 71.9% и (d) — 92.9%. Для внешних подгрупп (а) и (с) эта величина соответственно составляет 51.1% и 47.7% (Moiseeva et al. 2019, Romanyuk et al. 2013).

Схема отбора химически пекулярных звезд среди населения ассоциации детально описана нами в работе Romanyuk et al. (2013). В ней мы выделили 85 химически пекулярных звезд. В целом доля более горячих звезд среди химически пекулярных больше, чем среди нормальных.

Теперь сравним результаты измерений магнитных полей в подгруппах (а) и (b) ассоциации в Орионе. После исключения из рассмотрения непекулярной звезды HD 37149 в обеих подгруппах число СР-звезд оказывается равным — по пятнадцать. У всех этих звезд одинаковым образом было измерено магнитное поле. В подгруппе (а) семь из пятнадцати химически пекулярных оказались магнитными (46.7%), тогда как в подгруппе (b) таковых одиннадцать (73.3%). Критерием наличия магнитного поля мы считаем величину $\chi^2/n > 5$.

Таким образом, доля магнитных звезд в более молодой подгруппе (b) по отношению к химически пекулярным в 1.5 раза выше, чем в (а). Если же сравнить долю звезд с обнаруженным магнитным полем по отношению ко всем звездам соответствующей подгруппы ассоциации, то различия будут еще более разительными. Так, доля магнитных звезд по отношению ко всем ОВА-звездам в подгруппе (а) составляет 2.25% (7 из 311), а в

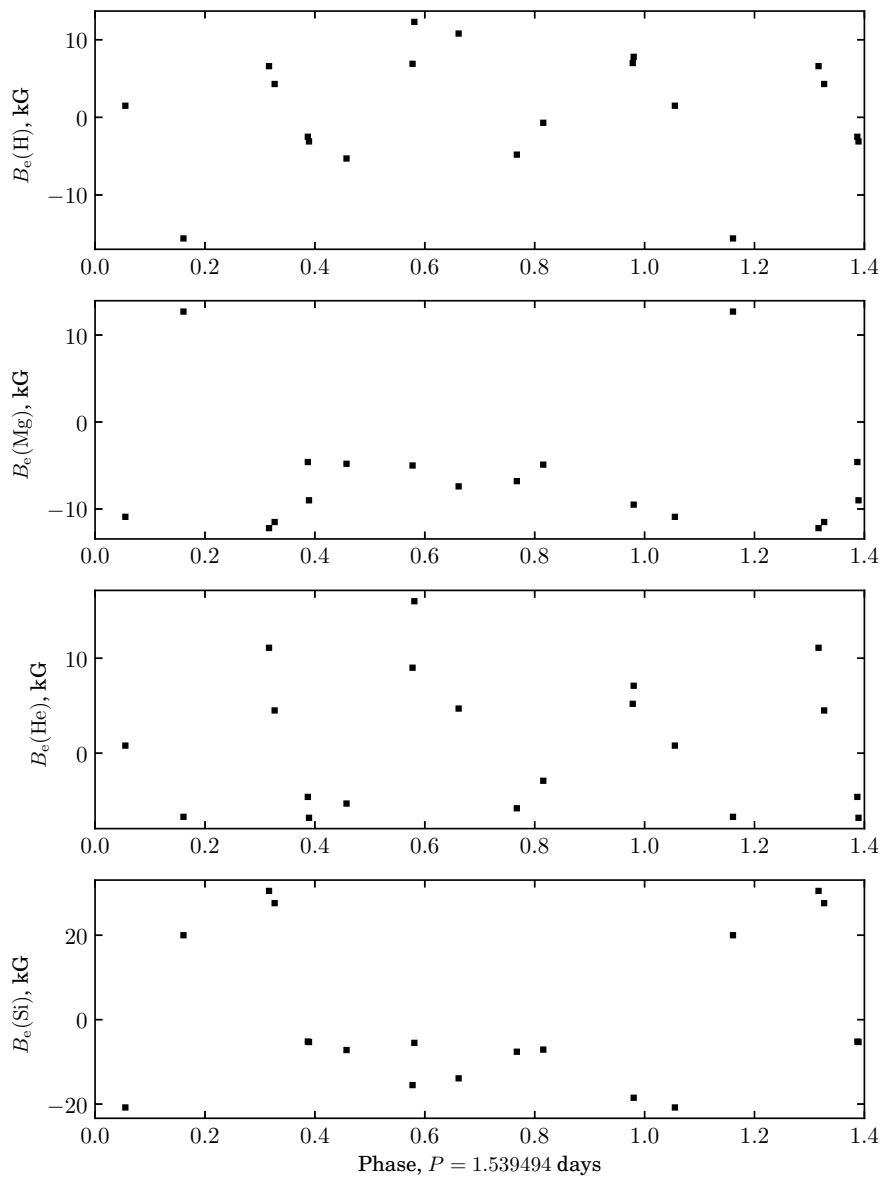


Рис. 16. Изменение с фазой вращения продольного магнитного поля HD 37776, измеренное по разным химическим элементам.

подгруппе (b) — уже 7.91% (11 из 139), или в 3.5 раза больше. Это значит, что с увеличением возраста звезд с 2 до 10 млн. лет в ассоциации Орион ОВ1 наблюдается очень резкое уменьшение доли магнитных звезд относительно общей выборки.

Рассмотрим теперь средние величины магнитных полей звезд в изученных областях ассоциации. Очевидно, что немагнитные звезды должны быть исключены из сравнения, иначе разные доли магнитных звезд приведут к искажению результатов. Среднеквадратичное продольное поле $\langle B_e \rangle$ для подгруппы в целом мы определим по формуле (1). Величины $\langle B_e \rangle$ для каждой звезды будут

использованы в качестве исходных данных. Значения среднеквадратичного поля звезд подгрупп (a) и (b) представлены в таблицах 4 и 5. Результаты измерений магнитных полей звезд таблицы 4 взяты из работы Romanuk et al. (2019). В рассматриваемом списке CP-звезд есть только три звезды (HD 35298, HD 35456 и HD 35502), у которых магнитное поле определяется абсолютно надежно ($\chi^2/n > 30$). В подгруппе (b) ассоциации для семи звезд $\chi^2/n > 30$. Для звезд HD 36313 и HD 37776 по причинам, указанным в комментариях к результатам их исследований, взяты данные из-

Таблица 4. Среднеквадратичные магнитные поля $\langle B_e \rangle$ звезд подгруппы (а) ассоциации Ог10п ОВ1

| Звезда | $\langle B_e(z) \rangle \pm \sigma$, Гс | χ^2/n | $\langle B_e(r) \rangle \pm \sigma$, Гс | χ^2/n |
|-----------|---|------------|---|------------|
| HD 34859 | 1138 ± 692 | 3.8 | 302 ± 120 | 9.9 |
| HD 35008 | 1530 ± 1440 | 3.8 | 258 ± 155 | 7.0 |
| HD 35177 | 1423 ± 1558 | 4.3 | 940 ± 275 | 12.4 |
| HD 35298 | 4600 ± 563 | 120.5 | 2323 ± 330 | 71.4 |
| HD 35456 | 447 ± 96 | 34.3 | 440 ± 80 | 37.7 |
| HD 35502 | 2221 ± 478 | 35.3 | 1647 ± 333 | 41.7 |
| HD 294046 | 2153 ± 1214 | 4.6 | 1496 ± 164 | 13.3 |

Таблица 5. Среднеквадратичные магнитные поля $\langle B_e \rangle$ звезд подгруппы (b) ассоциации Ог10п ОВ1

| Звезда | $\langle B_e(z) \rangle \pm \sigma$, Гс | χ^2/n | $\langle B_e(r) \rangle \pm \sigma$, Гс | χ^2/n |
|------------|---|------------|---|------------|
| HD 36313 * | 1338 ± 500(h) | 7.2 | | |
| HD 36485 | 2724 ± 261 | 113.8 | 2156 ± 132 | 635.1 |
| HD 36526 | 2801 ± 384 | 56.8 | 1695 ± 137 | 539.3 |
| HD 36668 | 1892 ± 451 | 37.6 | 953 ± 105 | 203.5 |
| HD 36955 | 843 ± 219 | 28.2 | 708 ± 90 | 93.9 |
| HD 37140 | 585 ± 207 | 14.0 | 270 ± 107 | 9.6 |
| HD 37333 | 870 ± 246 | 19.4 | 433 ± 120 | 14.6 |
| HD 37479 | 3040 ± 853 | 29.2 | 1307 ± 324 | 46.6 |
| HD 37633 | 520 ± 122 | 41.2 | 382 ± 97 | 25.5 |
| HD 37776 * | 7285 ± 2686 | 17.2 | 8644 ± 500(h) | 298.9 |
| HD 290665 | 2871 ± 121 | 544.2 | 2260 ± 54 | 2343.4 |

мерений поля только по линии $H\beta$ (указаны «*» в таблице 5).

Средняя величина $\langle B_e \rangle$ всех магнитных звезд подгруппы (а) равна:

- $\langle B_e \rangle(\text{all}) = 2286$ Гс, $\sigma = 1000$, $\chi^2/n = 16.8$ (по методу Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle(\text{all}) = 1286$ Гс, $\sigma = 229$, $\chi^2/n = 29.8$ (по методу регрессии).

Почти двукратные различия в значениях среднеквадратического поля в зависимости от метода

объясняются присутствием в выборке быстрых ротаторов со сложными профилями линий.

Аналогичным образом найдем среднеквадратическую величину магнитного поля $\langle B_e \rangle$ для всех звезд подгруппы (b) ассоциации:

- $\langle B_e \rangle(\text{all}) = 2911$ Гс, $\sigma = 893$, $\chi^2/n = 74.9$ (по методу Бэбкока),
- $\langle B_e \rangle(\text{all}) = 3014$ Гс, $\sigma = 211$, $\chi^2/n = 266.6$ (по методу регрессии).

Таким образом, оба метода измерений магнитных полей дают один и тот же результат: магнитное поле звезд в более молодой подгруппе (b) значительно сильнее, чем в подгруппе (a).

Ранее мы неоднократно показывали, что классические измерения по методу Бэбкока для горячих гелиевых звезд крайне затруднительны из-за малого количества пригодных для измерений спектральных линий и их сложных профилей. Более предпочтительным выглядит метод регрессии, но даже он в случаях сильного поля сложной структуры, например, как у звезды HD 37776, может занижать получаемую величину поля. Такие случаи требуют особого внимания, поэтому мы отдельно сравним измерения, выполненные методом регрессии.

Сравнив результат наших измерений магнитных CP-звезд в подгруппах (a) и (b) ассоциации Ог10п ОВ1, мы приходим к выводу, что в среднем величина поля в группировке из семи звезд возрастом около 2 млн. лет оказалась в 2.3 раза больше, чем в более старой группировке из одиннадцати звезд возрастом 10 млн. лет. Мы также видим, что величина χ^2/n , характеризующая степень надежности детектирования магнитного поля, для звезд подгруппы (b) на порядок выше, что тоже косвенно указывает на то, что магнитное поле звезд подгруппы (b) определяется намного лучше, чем в подгруппе (a). Не исключено, что некоторые звезды из наших списков в подгруппах (a) и (b) имеют слабые поля и мы их не зарегистрировали, но это ни коим образом не влияет на выводы, полученные нами в этой работе. Еще Бэбкок отмечал, что на уровне точности порядка 200 Гс магнитным полем обладает только каждая четвертая пекулярная звезда. С повышением точности измерений эта цифра увеличилась, но в любом случае не превышает и половины от всех измеренных CP-звезд. В ассоциации молодых звезд Ог10п ОВ1 во всех подгруппах доля CP-звезд с обнаруженным магнитным полем выше оценки Бэбкока, что также совпадает с нашими выводами о большей встречаемости магнитных звезд среди молодого населения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предварительный анализ изменений магнитных полей звезд в подгруппах (а) и (b) ассоциации Орион ОВ I свидетельствует о том, что с возрастом падает не только доля пекулярных звезд относительно нормальных, что было показано нами ранее в работе Romanyuk et al. (2013), но и существенно снижается доля магнитных звезд относительно всех пекулярных звезд подгруппы, а также величина магнитного поля. Скорость ослабления поля на промежутке времени от 2 до 10 млн. лет оказалась неожиданно большой.

В среднем температура звезд в подгруппе (а) оказывается несколько меньшей, чем в подгруппе (b) (Moiseeva et al. 2019, Romanyuk et al. 2013). Однако найденные нами зависимости не могут быть объяснены температурными эффектами. Ранее неоднократно проводились поиски зависимости величины поля от температуры, и в лучшем случае был виден слабый тренд к уменьшению поля с температурой (см., например, работу Landstreet et al. (2007)). Исходя из вышесказанного, мы считаем, что найденные нами закономерности имеют эволюционный смысл.

Не исключено, что у более молодых звезд имеется развитая мелкомасштабная структура поля, которая быстро распадается с возрастом, и ее вклад существенно уменьшается в результирующем поле. В наблюдательном плане это может проявиться в значительных различиях в величине поля, получаемого по линиям, образующимся на разной высоте в атмосфере. Это задача для будущих исследований. В целом наш результат говорит в пользу идеи о реликтовом происхождении магнитного поля СР-звезд. Также очевидно, что теория формирования магнитных полей горячих звезд нуждается в дальнейшем развитии. На данном этапе исследования мы получили данные, которые могут стать важным количественным наблюдательным тестом для калибровки различных механизмов образования и эволюции крупномасштабных звездных магнитных полей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопе БТА выполнены при поддержке Министерства образования и науки России. Авторы благодарят Национальный комитет по тематике российских телескопов за предоставление наблюдательного времени. Поляризационная аппаратура для наблюдений была изготовлена Г. А. Чунтоновым. В работе были использованы данные из астрономических баз SIMBAD, VIZIER и NASA/ADS.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за частичную финансовую поддержку работы (грант РФФИ 20-02-00233). АВМ и ИАЯ благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за частичную финансовую поддержку работы (гранты РФФИ 18-29-21030, 19-32-60007).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Bagnulo, L. Fossati, J. D. Landstreet, and C. Izzo, *Astron. and Astrophys.* **583**, A115 (2015).
2. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, E. Mason, et al., *Astron. and Astrophys.* **450** (2), 777 (2006).
3. Y. Y. Balega, V. V. Dyachenko, A. F. Maksimov, et al., *Astrophysical Bulletin* **67** (1), 44 (2012).
4. A. Blaauw, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **2**, 213 (1964).
5. D. A. Bohlender, *Astrophys. J.* **346**, 459 (1989).
6. D. A. Bohlender, D. N. Brown, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astrophys. J.* **323**, 325 (1987).
7. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **249**, L39 (1981).
8. L. G. Bouma, J. D. Hartman, W. Bhatti, et al., *Astrophys. J. Suppl.*, **245** 13 (2019).
9. H. Bouy and J. Alves, *Astron. and Astrophys.* **584**, A26 (2015).
10. A. G. A. Brown, E. J. de Geus, and P. T. de Zeeuw, *Astron. and Astrophys.* **289**, 101 (1994).
11. F. A. Catalano and P. Renson, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **127**, 421 (1998).
12. G. A. Chountonov, in *Proc. Int. Conf. on Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, Russia, 2003*, Ed. by Yu. Glagolevskij, D. Kudryavtsev, and I. Romanyuk (Nizhnij Arkhyz, 2004), pp. 286–291.
13. A. N. Heinze, J. L. Tonry, L. Denneau, et al., *Astron. J.* **156** (5), 241 (2018).
14. J. Hernández, N. Calvet, L. Hartmann, et al., *Astron. J.* **129** (2), 856 (2005).
15. O. Kochukhov, A. Lundin, I. Romanyuk, and D. Kudryavtsev, *Astrophys. J.* **726** (1), 24 (2011).
16. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Pautzen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372** (4), 1804 (2006).
17. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, V. Andretta, et al., *Astron. and Astrophys.* **470** (2), 685 (2007).
18. G. Mathys and S. Hubrig, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 475 (1997).
19. A. V. Moiseeva, I. I. Romanyuk, and E. A. Semenko, *ASP Conf. Ser.* **518**, 52 (2019).
20. C. Neiner and A.-M. Hubert, *Commun. Asteroseismology* **158**, 194 (2009).

21. P. North, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **55**, 259 (1984).
22. R. J. Oelkers, J. E. Rodriguez, K. G. Stassun, et al., *Astron. J.* **155** (1), 39 (2018).
23. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014).
24. D. A. Rastegaev, Y. Y. Balega, V. V. Dyachenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 296 (2014).
25. P. Renson and J. Manfroid, *Astron. and Astrophys.* **498** (3), 961 (2009).
26. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **69** (4), 427 (2014).
27. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **70** (4), 444 (2015).
28. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 55 (2019).
29. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **68** (3), 300 (2013).
30. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 436 (2016).
31. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 165 (2017).
32. I. B. Thompson, D. N. Brown, and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **64**, 219 (1987).
33. A. Tokovinin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **389** (2), 925 (2008).

Magnetic Fields of CP Stars in the Orion OB1 Association.

IV. Stars of Subgroup 1b

I. I. Romanyuk¹, E. A. Semenko¹, A. V. Moiseeva¹, I. Ya. Yakunin^{1,2}, and D. O. Kudryavtsev¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

The paper presents magnetic field measurements for 15 chemically peculiar (CP) stars of subgroup 1b in the Orion OB1 association. We have found that the proportion of stars with strong magnetic fields among these 15 CP stars is almost twice as large as in subgroup 1a. Along with this, the age of subgroup 1b is estimated as 2 Myr, and the age of subgroup 1a is in the order of 10 Myr. The average root-mean-square magnetic field $\langle B_e \rangle$ (all) for stars in subgroup 1b is 2.3 times higher than that for stars in subgroup 1a. The conclusions obtained fall within the concept of the fossil origin of large-scale magnetic fields in B and A stars, but the rate of field weakening with age appears anomalously high. We present our results as an important observational test for calibrating the theory of stellar magnetic field formation and evolution.

Keywords: stars: magnetic field—stars: chemically peculiar