

УДК 524.3-337

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НОВЫХ СР-ЗВЕЗД, ОТКРЫТЫХ ПО ДАННЫМ МИССИИ KEPLER

© 2023 И. А. Якунин^{1,2*}, Е. А. Семенко^{3,2},
И. И. Романюк², А. В. Моисеева², В. Н. Аитов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Национальный институт астрономических исследований Таиланда, Чиангмай, 50180 Таиланд

Поступила в редакцию 29 ноября 2022 года; после доработки 20 марта 2023 года; принята к публикации 21 марта 2023 года

В статье представлены первые результаты продолжающегося спектрополяриметрического мониторинга магнитного поля звезд, чья химически пекулярная природа была ранее выявлена на 1-м телескопе SAO РАН. Отбор кандидатов выборки осуществлялся по фотометрическим данным космических миссий Kepler и TESS. Подтверждена эффективность метода поиска новых СР-звезд на основе фотометрических кривых блеска. Представлены результаты измерения магнитного поля, дана оценка параметров атмосферы исследуемых объектов.

Ключевые слова: *звезды: химически пекулярные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Химически пекулярные (СР) звезды верхней части главной последовательности (ГП) характеризуются аномальным содержанием отдельных химических элементов в фотосфере, часто неравномерно распределенных по поверхности звезды. Среди них выделяется группа магнитных химически пекулярных (mСР) звезд, которая состоит из классических Ap/Bp (СР2) звезд и He-weak/rich (СР4) звезд (Preston, 1974; Maizten, 1984). демонстрируют строго периодические вариации блеска, спектральных профилей и магнитного поля, которые могут быть объяснены в рамках модели наклонного ротатора — твердотельно вращающейся звезды со стабильными пятнами структурами на поверхности и устойчивым глобальным магнитным полем, которое играет стабилизирующую роль (Deutsch, 1970).

Аномалии содержания химических элементов таких объектов возникают в результате долговременных процессов, происходящих во внешних спокойных атмосферных слоях. Наблюдаемые вариации блеска вызваны перераспределением потока в пятенных структурах вследствие покровного эффекта в линиях и континууме. На фотометрических кривых блеска наличие пятен химических аномалий обычно проявляется в виде усиления блеска в оптическом диапазоне и ослабления в дальнем

УФ, поскольку в данной области находится множество связанно-связанных и связанно-свободных переходов ряда элементов (преимущественно Si, Fe и редкоземельных элементов; подробности см. в работе Krtićka et al. (2012) и ссылки в ней).

Несмотря на то что mСР-звезды обнаруживаются в довольно широком диапазоне параметров диаграммы Герцшпрунга—Рассела (ГР), частота встречаемости объектов с детектированным магнитным полем остается практически постоянной и небольшой для всех классов — около 10%, а свойства поля не демонстрируют ярко выраженных зависимостей от массы, светимости или вращения (Wade et al., 2016; Schöllerr et al., 2017). Магнитное поле детектируется как в объектах еще не вышедших на ГП (Kholtygin et al., 2019), так и на конечных стадиях эволюции звезды (Landstreet and Bagnulo, 2019). Признаки эволюционных изменений магнитного поля у объектов ГП были обнаружены Semenکو et al. (2022) при изучении СР-звезд в подгруппах разного возраста ассоциации Орион OB1. К сожалению, к настоящему моменту число известных химически пекулярных звезд с детальным описанием структуры магнитного поля недостаточно для того, чтобы построить полную модель его возникновения и последующей эволюции.

Данная задача, на взгляд авторов, чрезвычайно интересна. Для ее решения необходимо применять эффективные критерии отбора кандидатов в mСР-

*E-mail: elias@sao.ru

звезды для последующих наблюдений на современных наземных спектрополяриметрах.

До настоящего времени большинство СР-звезд идентифицировались как таковые при помощи спектроскопических методов или, реже, с помощью $\Delta\alpha$ -фотометрии (Raunzen et al., 2005). Для измерения величины магнитного поля использовалась спектрополяриметрия. Как правило, фотометрические наблюдения ранее выполняли вспомогательную роль, в основном для уточнения периода вращения.

Ситуация изменилась после публикации открытых архивов фотометрии космических миссий Kepler, TESS и др. Высокая точность, достаточная полнота временных рядов и покрытия неба обзоров позволяют использовать эти данные для решения широкого спектра астрономических задач помимо обнаружения экзопланет, включая астросейсмологические исследования и вращательную модуляцию mCP-звезд (Hümmerich et al., 2018; David-Uraz et al., 2019; Mikulcšek et al., 2019). Хотя амплитуда фотометрической переменности таких звезд очень мала и обычно не превышает 0^m12 в полосе V , временные ряды более подходят для определения периода вращения, нежели спектры. Кривые блеска mCP-звезд являются гладкими и хорошо описываются одиночной или двойной волной (Mathys and Manfroid, 1985; Dukes and Adelman, 2018; Mikulcšek et al., 2018). Они хорошо аппроксимируются полиномом второго порядка, что соответствует модели вращающейся звезды с одним или двумя большими фотометрическими пятнами. Форма и период кривых блеска СР-звезд сохраняются десятилетиями (Žižňovský, 1994).

В работе Hümmerich et al. (2018) на основе фотометрии со спутника Kepler было найдено несколько новых СР-звезд и показано неожиданное разнообразие форм их кривых блеска. Используя спектры, полученные на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН, наблюдения на 60-см телескопе обсерватории Стара Лесна (Словакия) и архив обзора LAMOST, авторы цитируемой работы классифицировали тип пекулярности объектов выборки и идентифицировали 39 новых СР-звезд из 46 фотометрических кандидатов (85%). Полученный список СР-звезд стал основой для спектрополяриметрического мониторинга, который проводится на Основном звездном спектрографе (ОЗСП) САО РАН с 2019 года.

В настоящей работе мы представляем первые результаты сравнительного анализа переменности ряда СР-звезд, отобранных нами на основе фотометрических данных спутника Kepler для спектрополяриметрического мониторинга на 6-м телескопе БТА, и даем оценку их фундаментальных параметров.

2. ВЫБОРКА ОБЪЕКТОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Критерии отбора

Выбор кандидатов для спектрополяриметрических наблюдений проводился по фотометрическим данным со спутников Kepler по методике, предложенной коллегами из Университета Масарика, Брно (Hümmerich et al., 2018). При анализе кривых блеска прежде всего необходимо отделить интересующую нас вращательную переменность от переменной, связанной с пульсациями типа γ Dor, β Cep, медленнопульсирующих В-звезд, а также с орбитальным движением звезды, поэтому при составлении выборки мы применяли следующие критерии:

- 1) спектральный тип от ранних B до ранних F с соответствующим показателем цвета или эффективной температурой (при наличии данных);
- 2) период вращения больше 0.5 дня;
- 3) наличие на периодограммах одной единственной частоты и соответствующих ей гармоник;
- 4) кривая блеска стабильна или незначительно изменяется в течение всего времени наблюдений;
- 5) амплитуда переменности не превышает нескольких сотых величины.

Из итогового списка нами было отобрано десять кандидатов для последующего спектрополяриметрического мониторинга на телескопе БТА. Данная выборка включает в себя как новые кандидаты в СР-звезды, так и хорошо известные mCP-звезды для контроля методики.

2.2. Фотометрические данные

В настоящей работе нами были использованы данные из архива MAST¹, полученные космическим телескопом TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) (Ricker et al., 2015), который был запущен с целью поиска экзопланет транзитным методом. В течение двухлетнего периода выполнения основной программы миссия покрыла 85% всего неба, производя наблюдения в перекрывающихся секторах размером $96^\circ \times 24^\circ$. Это позволило получить фотометрические ряды для более чем 470 миллионов точечных источников. В зависимости от положения на небе объекты наблюдались на различных временных диапазонах: от 27.4 дня до почти 1 года. TESS был запущен 18 апреля 2018 года, а уже в декабре того же года данные первых двух секторов стали общедоступными.

¹<https://archive.stsci.edu/>

Временные ряды фотометрических наблюдений мы анализировали при помощи метода Лафлера–Кинмана (Lafler and Kinman, 1965). Предварительно исключались долговременные тренды, связанные с техническими особенностями характера наблюдений космического телескопа.

Найденные нами по данным TESS значения периода вращения находятся в хорошем соответствии с опубликованными ранее в работе Hümmerich et al. (2018), где для поиска использовались фотометрические ряды миссии Kepler. Небольшие отличия в четвертом либо пятом знаке неизбежны при использовании разных наборов данных и методов поиска периода, их исследование выходит за рамки данной статьи.

2.3. Спектрополяриметрия

Наблюдения выполнялись на спектрографе ОЗСП (Panchuk et al., 2014) 6-м телескопа БТА с анализатором круговой поляризации (Chountonov, 2016), оснащенный поворотной фазовой пластинкой $\lambda/4$. В качестве светоприемника использовалась ПЗС-матрица E2V CCD42-90 размером 4600×2000 элементов. Каждое наблюдение предполагает получение пары зеемановских спектров с поворотом пластинки на 90° . Такая процедура позволяет исключить инструментальную поляризацию и другие технические причины, которые могут вызвать ложное обнаружение магнитного поля. Время экспозиции выбиралось таким образом, чтобы отношение S/N на спектрах было не менее 100. В каждую наблюдательную ночь дополнительно к основным объектам исследования снимались спектры звезд-стандартов: звезды с хорошо известной магнитной фазовой кривой, а также звезды с нулевым магнитным полем.

Экстракция спектров производилась в пакете программ, написанных для среды ESO MIDAS в CAO РАН (Kudryavtsev, 2000). Ширина наблюдаемого диапазона составляла 600 \AA в интервале $4400\text{--}4900 \text{ \AA}$. Выбор диапазона обусловлен тем, что внутри него почти всегда можно найти достаточное количество линий для измерения магнитного поля с приемлемой точностью.

Магнитное поле измерялось по методике, предложенной Wagnulo et al. (2002). Погрешность измерения величины продольного поля довольно сильно чувствительна к отношению S/N , полуширине и профилю измеряемых спектральных линий.

Параметры атмосферы оценивались при помощи программы расчета синтетических спектров SME (Piskunov and Valenti, 2017). Варьируя эффективную температуру T_{eff} , ускорение силы тяжести на поверхности $\lg g$, лучевую скорость V_R , проекцию скорости вращения на луч зрения $v_e \sin i$ и, при

необходимости, металличность $[M/H]$, мы добивались наилучшего соответствия наблюдаемой бальмеровской линии $H\beta$ и синтетического спектра. Для построения последнего использовались сетка моделей `LLmodels` (одномерная плоскопараллельная атмосфера, ЛТР-приближение, «line-by-line»-подход к расчету профилей спектральных линий) (Shulyak et al., 2004) и список линий, полученный из базы данных VALD (Piskunov et al., 1995). Отметим, что детальное моделирование химического состава объектов находится за рамками данной статьи, здесь мы ограничимся лишь приблизительной оценкой параметров по имеющимся у нас спектрам.

Для построения фазовой кривой измерений магнитного поля мы использовали значения найденного фотометрического периода, после чего полученные кривые аппроксимировались одной или суммой двух синусоид. Нулевая фаза фотометрической кривой блеска соответствует максимуму звездной величины серии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗД

Достоверность обнаружения у исследуемых звезд магнитного поля мы оценивали с помощью критерия приведенной статистики χ^2/n , вычисляемой по формуле:

$$\chi^2/n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{B_i}{\sigma_i} \right)^2,$$

где B_i и σ_i — единичные измерения магнитного поля и соответствующие ошибки. Традиционно для нашей методики (см., например, статью Romanuk et al. (2019)) будем считать, что магнитное поле достоверно обнаружено при $\chi^2/n > 5$.

Результаты индивидуальных магнитных измерений объектов выборки приведены в Таблице 1, где JD — юлианская дата наблюдений, $B_e \pm \sigma$ — оценка продольного магнитного поля и соответствующая среднеквадратичная ошибка.

Ниже приведены комментарии к результатам, полученным в ходе исследования.

3.1. KIC 4180396 = HD 225728

Анализ фотометрических данных TESS показал, что наилучшим образом наблюдения объекта описываются следующей эфемеридой:

$$JD = 2455684.20056 + 3.68435E.$$

Полученная кривая блеска представлена на рис. 1а. Она демонстрирует двойную волну с главным максимумом и минимумом в фазах периода вращения $\phi = 0.0$ и $\phi = 0.28$. За ними идут вторичные максимум и минимум в фазах $\phi = 0.52$ и $\phi = 0.78$ соответственно. Полная амплитуда изменения блеска равна $\Delta m = 0^{\text{m}}013$.

Таблица 1. Величины продольного магнитного поля звезд выборки по нашим измерениям

Звезда	JD 2450000+	$B_e \pm \sigma$, Гс
KIC 4180396	8578.553	-544 ± 70
	8603.478	-650 ± 75
	8777.274	-578 ± 70
	8802.198	-250 ± 80
	8805.222	1517 ± 80
	9033.494	1400 ± 70
	9099.448	1520 ± 70
KIC 5264818	8597.496	1004 ± 65
	8621.370	-995 ± 70
	8624.414	227 ± 70
	8777.211	-810 ± 80
	8778.165	940 ± 70
	8921.519	300 ± 50
	9001.340	960 ± 50
	9006.387	101 ± 65
	9032.509	-566 ± 50
	9061.482	-629 ± 50
9097.388	-757 ± 55	
KIC 5473826	8600.401	-701 ± 203
	8801.276	99 ± 205
	8805.194	-286 ± 120
	9031.340	-479 ± 180
	9096.346	-147 ± 143
KIC 6065699	8577.541	650 ± 80
	8620.381	563 ± 50
	8621.438	550 ± 122
	8624.481	463 ± 80
	8777.330	731 ± 60
	8778.336	676 ± 70
	8799.281	781 ± 63
	8802.254	720 ± 46
	8805.149	820 ± 60
	9006.424	539 ± 70
	9060.308	445 ± 70
9061.535	691 ± 74	
9102.403	845 ± 90	
KIC 6278403	8601.473	-220 ± 90
	8603.420	-179 ± 90
	8620.434	-130 ± 90
	8621.411	171 ± 90
	8624.453	63 ± 90
	9006.365	10 ± 90
	9097.367	-20 ± 90
	9431.500	100 ± 100
KIC 6864569	8758.312	-195 ± 70
	8778.297	16 ± 80
	8830.141	-305 ± 85

Таблица 1. (Продолжение)

Звезда	JD 2450000+	$B_e \pm \sigma$, Гс
	9060.502	-403 ± 53
	9455.439	177 ± 91
KIC 8161798	8600.490	-50 ± 100
	8802.151	-55 ± 100
	8830.205	250 ± 100
	9032.464	240 ± 100
	9060.416	-157 ± 100
	9096.433	118 ± 100
	9336.542	210 ± 100
9455.347	-105 ± 100	
KIC 8324268	8577.516	135 ± 90
	8600.558	-7 ± 90
	8601.559	-11 ± 90
	8620.353	-450 ± 90
	8624.504	-185 ± 90
	8777.352	0 ± 90
	8778.360	460 ± 90
	8799.233	-190 ± 90
	8801.326	-170 ± 90
	8805.305	-227 ± 90
	9000.368	-117 ± 90
9021.410	-20 ± 90	
9096.534	-150 ± 90	
KIC 10324412	8620.323	50 ± 55
	8621.336	2 ± 70
	8624.377	-101 ± 70
	8799.259	-103 ± 90
	8801.153	-5 ± 60
	8976.335	-65 ± 70
	9061.456	-23 ± 170
	9097.416	-164 ± 122
9099.397	-72 ± 80	
9455.276	-138 ± 127	
KIC 11560273	8758.257	0 ± 100
	8777.375	-48 ± 90
	8778.387	-17 ± 100
	8830.260	40 ± 100
	9061.532	56 ± 100

Максимум положительной полярности магнитного поля $B_e(\max) = 1520 \pm 52$ Гс соответствует фотометрическому максимуму. Максимум отрицательного поля слегка сдвинут относительно вторичного максимума фотометрии в сторону первичного минимума и находится в фазе $\phi = 0.2$. Лучше поле аппроксимируется двойной синусоидой

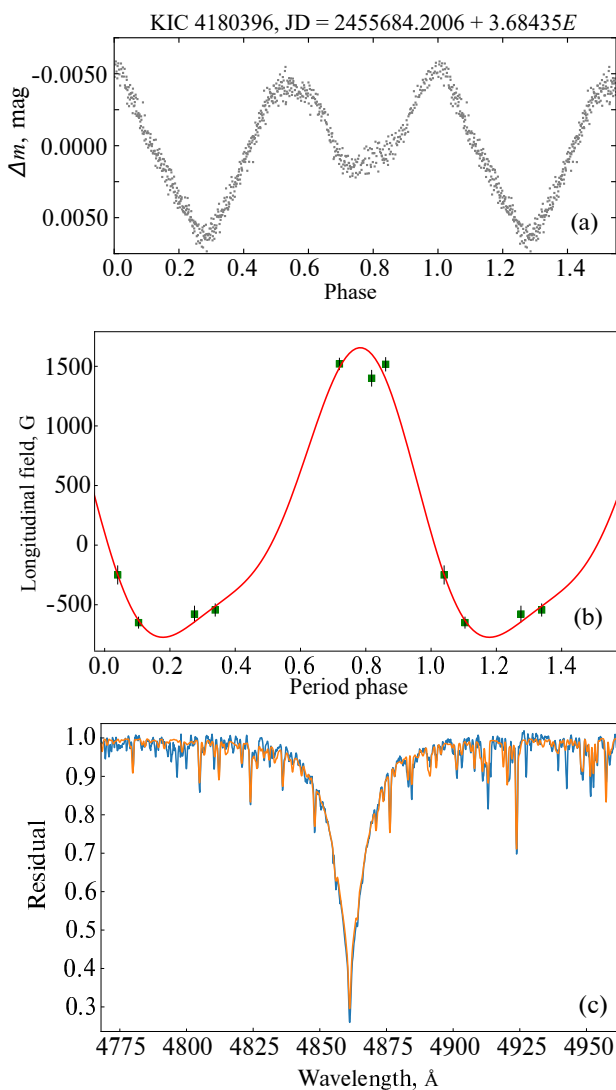


Рис. 1. Результаты анализа звезды KIC 4180396. Панель (a) — кривая блеска по данным спутника TESS; панель (b) — фазовая кривая магнитного поля; панель (c) — результат моделирования линии $H\beta$, синим цветом показаны наблюдения, оранжевым — результат моделирования.

(рис. 1b), при этом вторичные гармоники практически незаметны. Значение $\chi^2/n = 319.8$ подтверждает достоверное обнаружение магнитного поля.

В результате аппроксимации спектра (рис. 1c) определены следующие параметры атмосферы: $T_{\text{eff}} = 11\,283\text{ K}$, $\lg g = 3.80$, $v_e \sin i = 28.67\text{ км с}^{-1}$, $V_R = -8.65\text{ км с}^{-1}$, $[M/H] = -0.096$.

3.2. KIC 5264818 = HD 180374

Наилучшая эфемерида, полученная нами в результате анализа фотометрических рядов:

$$\text{JD} = 2458683.9789 + 1.90291E.$$

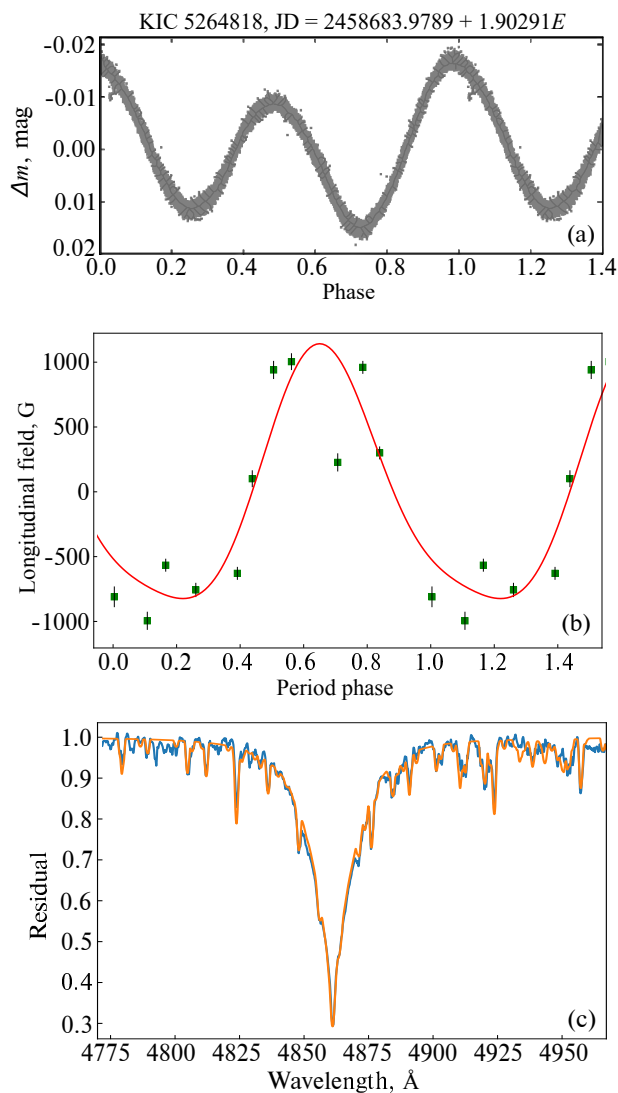


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для KIC 5264818.

Кривая блеска (рис. 2a) представляет собой более выраженную двойную волну. За первичным максимумом следуют вторичные минимум и максимум в фазах $\phi = 0.25$ и $\phi = 0.50$. Далее первичный минимум в районе фазы $\phi = 0.73$. Полная амплитуда равна $\Delta m = 0^{\text{m}}037$.

Максимум положительного магнитного поля лежит в районе первичного минимума кривой блеска, слегка сдвинут относительно него в фазу $\phi = 0.61$. Максимум поля отрицательной полярности пологий, расположен между первичным максимумом и вторичным минимумом фотометрии в диапазоне фаз $\phi: 0.0-0.22$. Магнитное поле лучше всего аппроксимируется двойной синусоидой (см. рис. 2b). Звезда KIC 5264818 достоверно является магнитной ($\chi^2/n = 146.9$).

При аппроксимации спектра, показанной на рис. 2c, получены следующие параметры атмосферы:

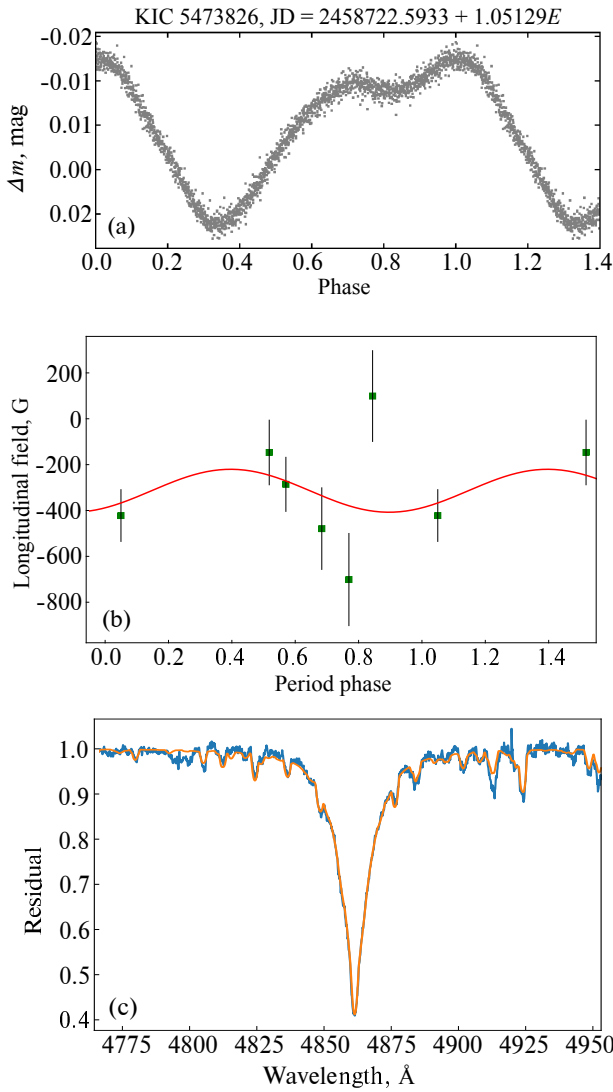


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для KIC 5473826.

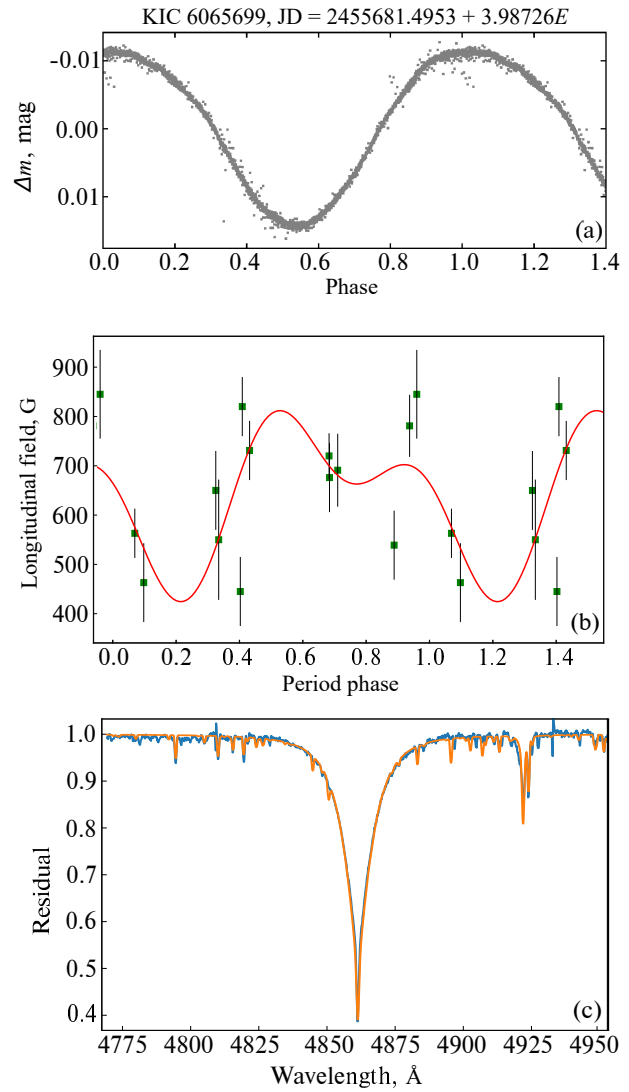


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но для KIC 6065699.

ры: $T_{\text{eff}} = 9348 \text{ K}$, $\lg g = 3.59$, $v_e \sin i = 57.37 \text{ км с}^{-1}$, $V_R = -14.29 \text{ км с}^{-1}$, $[M/H] = -0.000$.

3.3. KIC 5473826 = HD 226339

Наилучшим образом подобранная эфемерида:

$$\text{JD} = 2458722.5933 + 1.05129E.$$

Полученная кривая блеска (рис. 3а) характеризуется слабо выраженными вторичными экстремумами, по величине сравнимыми с первичным максимумом. Первичный минимум находится в фазе $\phi = 0.34$, вторичные максимум и минимум — в фазах $\phi = 0.70$ и $\phi = 0.80$ соответственно. Полная амплитуда изменения блеска $\Delta m = 0^{\text{m}}042$.

Несмотря на то что статистический критерий указывает на достоверное обнаружение ($\chi^2/n = 6.62$), магнитное поле определяется с

большой ошибкой вследствие широких и негауссовых профилей линий в спектре. Единственное измерение поля с положительным знаком находится в районе вторичного минимума кривой блеска. Притом совсем рядом, в фазе вторичного максимума, находится отрицательный экстремум поля. Для более уверенной аппроксимации магнитной кривой недостаточно наблюдательных данных. Изучение этого объекта будет продолжено.

При аппроксимации спектра (рис. 3с) получены следующие параметры атмосферы: $T_{\text{eff}} = 12479 \text{ K}$, $\lg g = 3.82$, $v_e \sin i = 83.39 \text{ км с}^{-1}$, $V_R = 5.69 \text{ км с}^{-1}$.

3.4. KIC 6065699 = HD 188101

Наилучшая эфемерида:

$$\text{JD} = 2455681.4953 + 3.98726E.$$

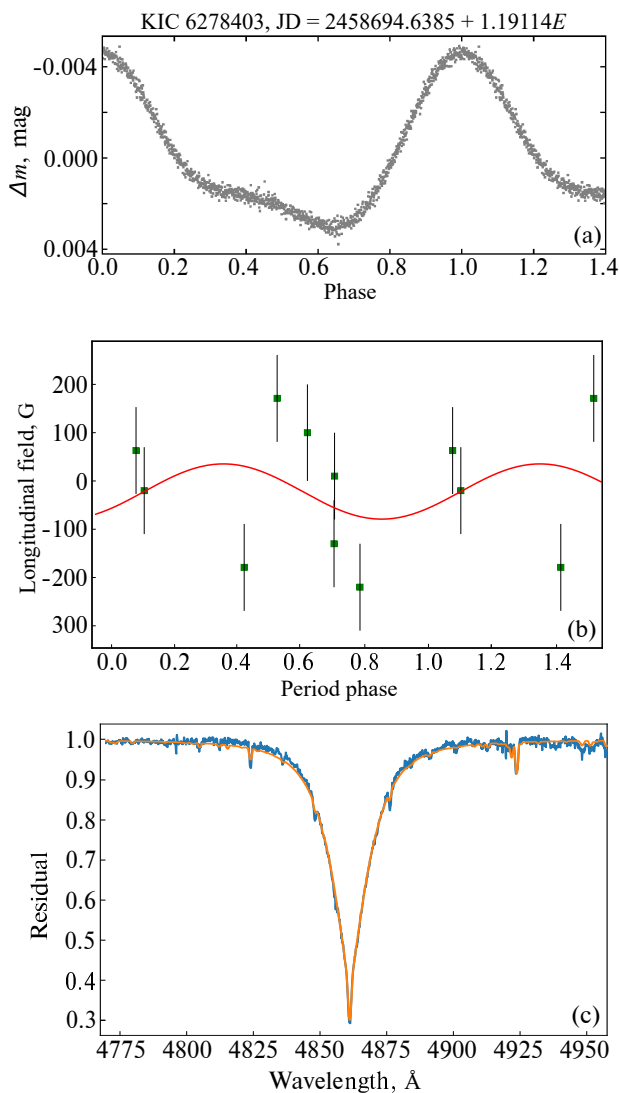


Рис. 5. То же, что на рис. 1, но для KIC 6278403.

Кривая блеска представляет собой плавную, практически гармоническую, синусоиду с максимумом в районе фазы $\phi = 0.0$ и минимумом в фазе $\phi = 0.55$ (рис. 4а). Полная амплитуда изменения блеска $\Delta m = 0^m022$.

Величины магнитного поля, наоборот, показывают большой разброс и слабо поддаются аппроксимации, несмотря на большое число измерений, которые имеют только положительную полярность (см. рис. 4б). Эти особенности могут быть объяснены тем фактом, что положительный полюс диполя слабо отклонен от оси вращения звезды и направлен на наблюдателя. В пользу такого объяснения говорят узкие спектральные профили линий, которые по сути являются инструментальными. По значению $\chi^2/n = 103.75$ звезда KIC 6065699 является магнитной.

На основе аппроксимации спектра, которая по-

казана на рис. 4с, получены следующие параметры: $T_{\text{eff}} = 14771$ К, $\lg g = 3.83$, $v_e \sin i = 33.40$ км с⁻¹, $V_R = -1.93$ км с⁻¹, $[M/H] = -0.006$ (см. рис. 4).

В процессе аппроксимации наблюдаемого спектра синтетическим возникло две проблемы. Первая связана с невозможностью аппроксимировать линии Si II, Si III моделью с одной температурой. Для хорошей аппроксимации Si II требовалась модель с температурой $T_{\text{eff}} = 15200$ К, а для Si III — $T_{\text{eff}} = 17200$ К. Скорее всего эта разница вызвана стратификацией данного элемента в атмосфере звезды. Вторая проблема — невозможность аппроксимации запрещенной линии He I λ 4471. В данном случае сложности возникают из-за того, что данную линию нельзя описать при помощи ЛТР-подхода, который мы использовали в процессе работы. Для корректной аппроксимации этой линии необходим расчет не-ЛТР модели.

3.5. KIC 6278403 = HD 181436

Наилучшая эфемерида по фотометрическим данным:

$$JD = 2458694.6385 + 1.19114E.$$

Кривая блеска пологая, как видно на рис. 5а, затухание блеска длится дольше, чем поярчение. Фаза максимума — $\phi = 0.0$, минимума — $\phi = 0.6$. Некоторый излом наблюдается на стадии ослабления яркости в районе $\phi = 0.25$. Амплитуда кривой составляет $\Delta m = 0^m008$.

Вследствие больших ошибок измерений мы не можем говорить о достоверном обнаружении поля ($\chi^2/n = 1.21$). По нашим данным оно меняется слабо и не превышает нескольких сотен гаусс по абсолютной величине. Ошибки измерений также не позволяют уверенно провести аппроксимацию. Максимум полученной магнитной кривой, которая показана на рис. 5б, положителен и сдвинут относительно фотометрического минимума.

При аппроксимации (см. рис. 5с) наилучшее соответствие наблюдательного и синтетического спектров достигается с параметрами $T_{\text{eff}} = 11261$ К, $\lg g = 4.12$, $v_e \sin i = 46.5$ км с⁻¹, $V_R = -12.1$ км с⁻¹.

3.6. KIC 6864569 = BD+42° 3356

Наилучшая эфемерида:

$$JD = 2455682.4726 + 2.32517E.$$

По форме кривая блеска KIC 6864569 (см. рис. 6а) удивительно похожа на кривую блеска KIC 6278403, однако амплитуда и период отличаются. Для KIC 6864569 амплитуда составляет $\Delta m = 0^m03$, а величина периода переменности

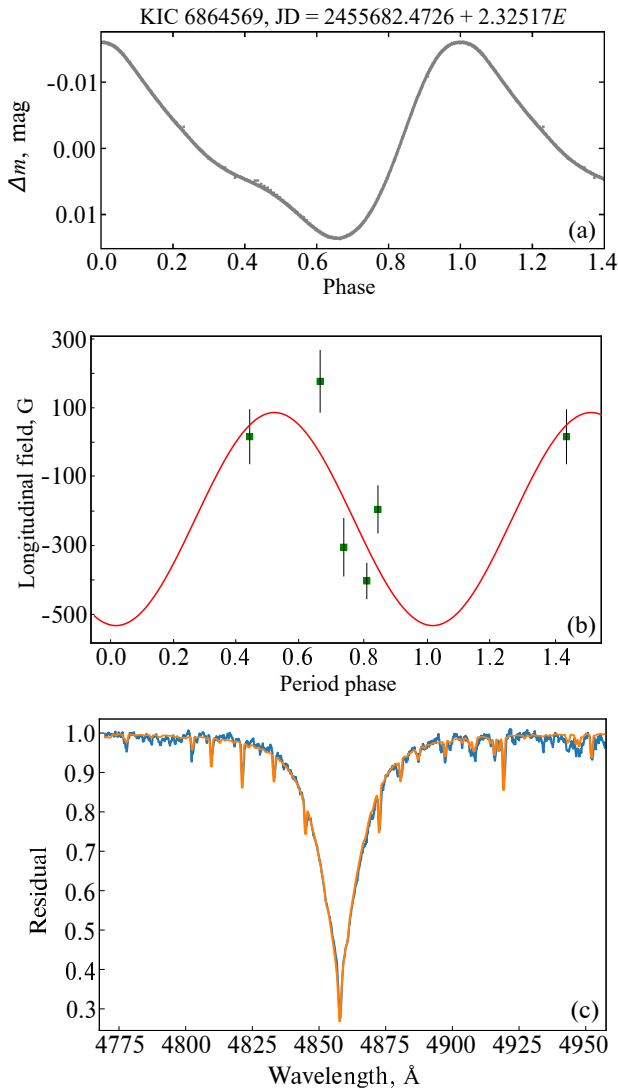


Рис. 6. То же, что на рис. 1, но для KIC 6864569.

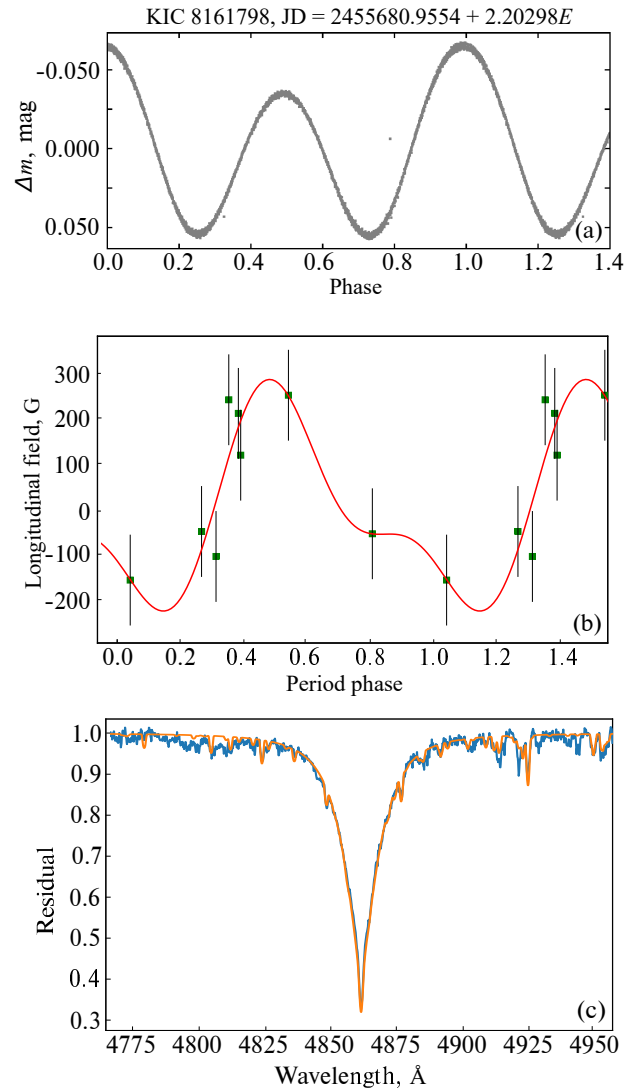


Рис. 7. То же, что на рис. 1, но для KIC 8161798.

блеска $P = 2^d 32517$, что примерно в два раза больше, чем у KIC 6278403.

Как и у KIC 6278403, величина магнитного поля KIC 6864569 не превышает нескольких сотен гаусс и меняется слабо по мере вращения (рис. 6b). Небольшое число наблюдательных точек не позволяет уверенно характеризовать магнитную кривую. Однако полученное значение критерия, $\chi^2/n = 16.45$, свидетельствует в пользу достоверного обнаружения поля.

Аппроксимация наблюдаемого спектра звезды (рис. 6c) дает следующие значения параметров: $T_{\text{eff}} = 10\,612\text{ K}$, $\lg g = 4.03$, $v_e \sin i = 37.02\text{ км с}^{-1}$, $V_R = -17.30\text{ км с}^{-1}$.

3.7. KIC 8161798 = BD +43 3223

Наилучшая эфемерида:

$$\text{JD} = 2455680.9554 + 2.20298E.$$

Свернутая по фазе кривая блеска KIC 8161798 показана на рис. 7a. Она представляет собой ярко выраженную двойную волну с практически совпадающими по величине первичным и вторичным минимумами. За первичным максимумом следует первый минимум в фазе $\phi = 0.25$, после — вторичный максимум в фазе $\phi = 0.5$, за ним еще один минимум в фазе $\phi = 0.73$. Амплитуда блеска сравнительно высокая — $\Delta m = 0^m 124$.

Значение критерия $\chi^2/n = 2.75$, магнитное поле достоверно не обнаруживается, однако наблюдается его переменность. Положительный максимум магнитного поля соответствует по фазе вторичному

максимуму блеска, отрицательный максимум слегка сдвинут относительно первого минимума блеска.

Параметры, полученные на основе аппроксимации спектра: $T_{\text{eff}} = 11\,664$ К, $\lg g = 4.00$, $v_e \sin i = 49.37$ км с⁻¹, $V_R = -37.3$ км с⁻¹ (см. рис. 7с).

3.8. KIC 8324268 = HD 189160

Наилучшая эфемерида по данным спутника TESS:

$$\text{JD} = 2458734.7007 + 2.00912E.$$

Полученная кривая блеска KIC 8324268 показана на рис. 8, где также представлены фазовая кривая магнитного поля и результат моделирования линии H β в спектре объекта. По форме кривая блеска является одиночной волной, практически гармонической синусоидой. Отметим ее сходство с кривой блеска KIC 6065699. Интервал поярчания немного длиннее, чем интервал ослабления яркости. Максимум и минимум блеска соответствуют фазам $\phi = 0.0$ и $\phi = 0.45$. Амплитуда блеска составляет $\Delta m = 0^{\text{m}}026$.

Измерения магнитного поля демонстрируют большой разброс (см. рис. 8b), что затрудняет аппроксимацию одиночной волной, но величина критерия $\chi^2/n = 5.88$ говорит о его достоверном обнаружении.

Аппроксимация спектра (рис. 8с) дает следующие параметры: $T_{\text{eff}} = 12\,996$ К, $\lg g = 3.85$, $v_e \sin i = 26.0$ км с⁻¹, $V_R = -17.5$ км с⁻¹.

3.9. KIC 10324412 = HD 176436

При анализе временных рядов со спутника TESS получена эфемерида

$$\text{JD} = 2455680.7844 + 1.73150E.$$

Кривая блеска объекта представляет собой двойную волну с первичным и вторичным максимумами вблизи фаз $\phi = 0.0$ и $\phi = 0.6$ соответственно. Минимум блеска находится вблизи фазы $\phi = 0.3$, амплитуда изменения блеска $\Delta m = 0^{\text{m}}03$ (см. рис. 9а).

Магнитное поле очень слабое, практически на пределе детектирования, показывает одиночную синусоиду с минимумом вблизи первичного максимума кривой блеска и с максимумом вблизи вторичного (рис. 9b). Значение $\chi^2/n = 0.89$ не позволяет утверждать о достоверном обнаружении магнитного поля.

Параметры, определенные при аппроксимации спектра: $T_{\text{eff}} = 10\,142$ К, $\lg g = 3.99$, $[M/H] = 0.544$, $v_e \sin i = 77.73$ км с⁻¹, $V_R = 1.39$ км с⁻¹. Наблюдаемый и синтетический спектры показаны на рис. 9с.

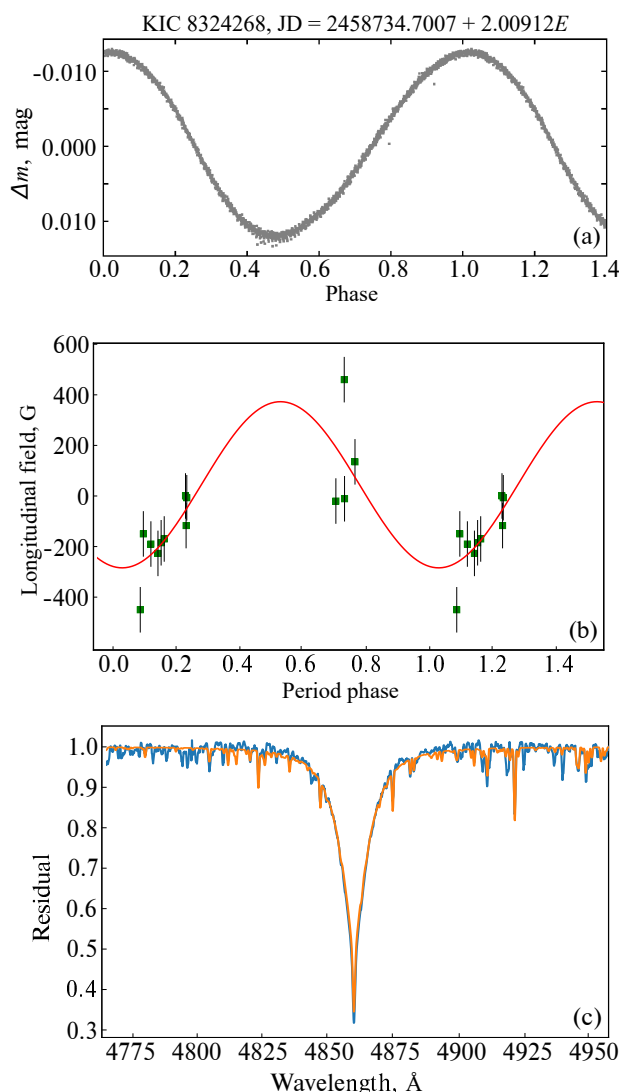


Рис. 8. То же, что на рис. 1, но для KIC 8324268.

3.10. KIC 11560273 = HD 184007

Наилучшая эфемерида:

$$\text{JD} = 2458685.1555 + 1.82769E.$$

Сфазированная кривая блеска объекта показана на рис. 10а. Ее форма является еще одним примером отмеченного ранее разнообразия кривых блеска кандидатов в mCP-звезды. Полная амплитуда изменения блеска $\Delta m = 0^{\text{m}}02$.

Измерения величины продольного магнитного поля отягощены большими ошибками (рис. 10b). Значение $\chi^2/n = 0.16$ указывает на то, что магнитное поле не зарегистрировано.

На рис. 10с мы приводим наблюдаемый спектр объекта и результат его аппроксимации синтетическим со следующими модельными параметрами: $T_{\text{eff}} = 9\,744$ К, $\lg g = 3.77$, $v_e \sin i = 73.8$ км с⁻¹, $V_R = -15.5$ км с⁻¹.

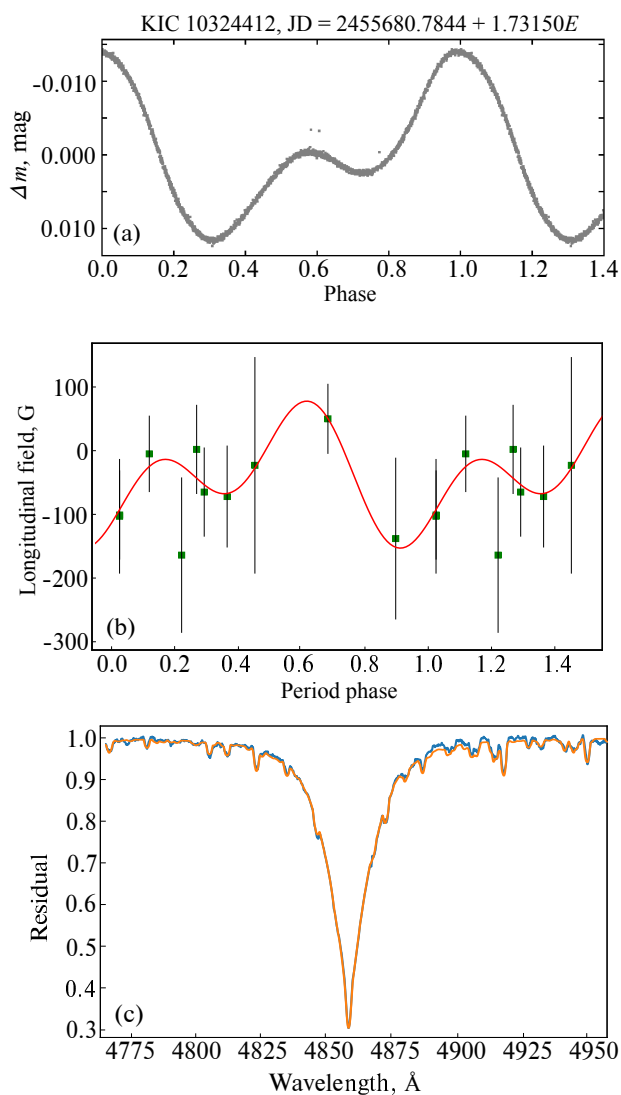


Рис. 9. То же, что на рис. 1, но для KIC 10324412.

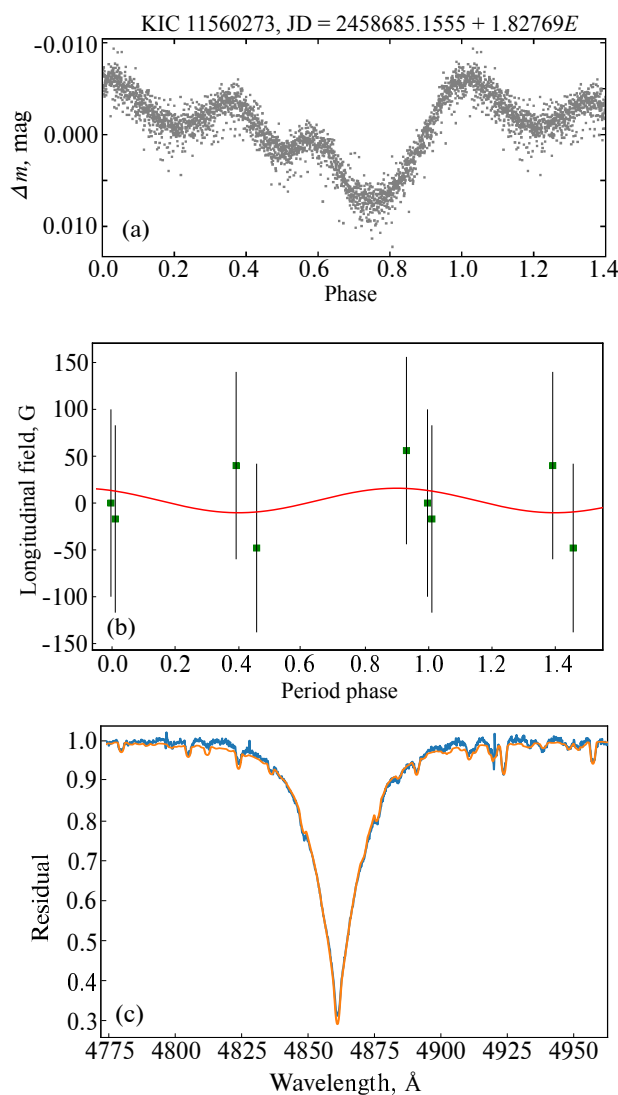


Рис. 10. То же, что на рис. 1, но для KIC 11560273.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены первые результаты исследования переменности части выборки кандидатов в mCP-звезды, сформированной нами при помощи анализа фотометрических данных со спутника Kepler. Предлагаемая методика отбора кандидатов демонстрирует свою эффективность: у всех звезд выборки спектры содержат пекулярные линии, что ранее было продемонстрировано в работе Nimmerich et al. (2018), наблюдения для которой получены на телескопе Цейсс-1000 САО РАН. Из десяти объектов, отобранных для мониторинга, магнитное поле уверенно детектируется у шести звезд: KIC 4180396, KIC 5264818, KIC 5473826, KIC 6065699, KIC 6864569, KIC 8324268. У остальных четырех объектов поле регистрируется на уровне инструментальных ошибок измерений при наблюдениях с ОЗСП БТА САО РАН.

Любопытно, что формы кривых блеска объектов демонстрируют чрезвычайное разнообразие. Вероятнее всего, это объясняется пятенной структурой поверхности, характерной для CP-звезд. В дальнейшем мы планируем изучить влияние пятен отдельных химических элементов на форму фотометрической кривой блеска.

На настоящем этапе сложно говорить о закономерностях в корреляции поведения магнитного поля и фотометрических кривых. Лишь у трех объектов (KIC 4180396, KIC 5264818, KIC 8161798) положительный либо отрицательный экстремумы магнитной кривой соответствуют фотометрическим экстремумам (первичным или вторичным). Чтобы исключить фактор случайности, необходима большая выборка объектов. Спектрополяриметрический мониторинг выборки фотометрических кандидатов будет продолжен.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Д. О. Кудрявцеву и Е. Г. Сендикасу за помощь в проведении наблюдений.

Авторы благодарны анонимным рецензентам за ценные замечания, позволившие улучшить содержание статьи и разъяснить некоторые критичные моменты.

Данная статья включает данные, собранные с помощью миссии TESS, полученные из архива данных MAST Научного института космического телескопа (STScI). Финансирование миссии TESS обеспечивается программой NASA Explorer. STScI находится в ведении Ассоциации университетов для исследований в области астрономии, в соответствии с контрактом НАСА NAS 5-26555.

В работе использовалась база данных VALD, действующая в Упсальском университете, Институте астрономии РАН в Москве и Венском университете.

Наблюдения на телескопах CAO РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдательная часть исследования и обработка данных (ИЯ) выполнялись при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-60007.

Анализ и построение фазовых кривых магнитного поля, определение физических параметров (ЕАС, ИИР и АВМ) выполнялись при частичной финансовой поддержке Российского Научного Фонда (РНФ) № 21-12-00147.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 489 (2016).
- S. Bagnulo, T. Szeifert, G. A. Wade, et al., *Astronomy and Astrophysics*, **389**, 191 (2002).
- A. David-Uraz, C. Neiner, J. Sikora, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (1), 304 (2019).
- A. J. Deutsch, *Astrophys. J.* **159**, 985 (1970).
- J. R. Dukes Jr. and S. J. Adelman, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **130** (986), 044202 (2018).
- S. Hümmerich, Z. Mikulášek, E. Paunzen, et al., *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A98 (2018).
- A. F. Kholtygin, O. A. Tsiopa, E. I. Makarenko, and I. M. Tumanova, *Astrophysical Bulletin* **74** (3), 293 (2019).
- J. Krtička, Z. Mikulášek, T. Lüftinger, et al., *Astron. and Astrophys.* **537**, id. A14 (2012).
- D. O. Kudryavtsev, *Baltic Astronomy* **9**, 649 (2000).
- D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Paunzen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 4, 1804-1828 (2006).
- J. Lafler and T. D. Kinman, *Astrophys. J. Suppl.* **11**, 216 (1965).
- J. D. Landstreet and S. Bagnulo, *Astron. and Astrophys.* **628**, id. A1 (2019).
- H. M. Maitzen, *Astron. and Astrophys.* **138**, 493 (1984).
- G. Mathys and J. Manfroid, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **60**, 17 (1985).
- Z. Mikulášek, J. Krtička, E. Paunzen, et al., *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **48** (1), 203 (2018).
- Z. Mikulášek, E. Paunzen, S. Hümmerich, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 117 (2019).
- V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014).
- E. Paunzen, C. Stütz, and H. M. Maitzen, *Astron. and Astrophys.* **441**, 631 (2005).
- N. Piskunov and J. A. Valenti, *Astron. and Astrophys.* **597**, id. A16 (2017).
- N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *ASP Conf. Ser.* **81**, 610 (1995).
- G. W. Preston, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **12**, 257 (1974).
- G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, et al., *J. Astron. Telescopes, Instruments, and Systems* **1**, id. 014003 (2015).
- E. Semenko, I. Romanyuk, I. Yakunin, D. Kudryavtsev, A. Moiseeva A., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515**, 998 (2022).
- I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 55 (2019).
- M. Schöller, S. Hubrig, L. Fossati, et al., *Astron. and Astrophys.* **599**, id. A66 (2017).
- D. Shulyak, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys.* **428**, 993 (2004).
- J. Žižňovský, in *Proc. Intern. Conf. on Chemically peculiar and magnetic stars, Tatranska Lomnica, Slovak Republic, 1993*, Ed. by J. Zverko and J. Žižňovský (Tatranska Lomnica, 1994), p. 155.
- G. A. Wade, C. Neiner, E. Alecian, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456** (1), 2 (2016).

Magnetic Fields of New CP Stars Discovered with Kepler Mission Data

I. A. Yakunin^{1,2}, E. A. Semenko^{2,3}, I. I. Romanyuk², A. V. Moiseeva², and V. N. Aitov²

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

²Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz 369167, Russia

³National Astronomical Research Institute of Thailand, Mae Rim, Chiang Mai 50180, Thailand

The paper presents the first results of the ongoing spectropolarimetric monitoring of magnetic fields of stars, whose chemically peculiar nature has been previously revealed with the 1-m SAO RAS telescope. We selected the sample candidates using the photometric data of the Kepler and TESS space missions. The efficiency of the method of searching for new CP stars based on photometric light curves has been confirmed. We present the measurement results of the magnetic fields and estimate the atmospheric parameters of the objects under study.

Keywords: *stars: chemically peculiar*