

УДК 524.35-337

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД. II: МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВРАЩЕНИЕ ЗВЕЗД С СИЛЬНЫМИ И СЛАБЫМИ АНОМАЛИЯМИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЭНЕРГИИ В КОНТИНУУМЕ

© 2009 И. И. Романюк*, Д. О. Кудрявцев, Е. А. Семенко

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 12 февраля 2009 г.; принята в печать 11 марта 2009 г.

Проведен сравнительный анализ магнитных полей и параметров вращения магнитных CP-звезд с сильными и слабыми аномалиями в распределении энергии в спектре. Показано, что звезды, имеющие сильную депрессию на в континууме 5200 \AA , обладают значимо большими полями (средняя величина продольной компоненты $\langle B_e \rangle = 1341 \pm 98 \text{ Гс}$), чем объекты со слабой депрессией ($\langle B_e \rangle = 645 \pm 58 \text{ Гс}$). Обнаружено также, что звезды с большими депрессиями значительно чаще встречаются среди медленных ротаторов. В среднем, периоды их вращения имеют величину около 10 суток, что в три раза больше периодов звезд со слабыми депрессиями (около 3 суток). Это указывает на уменьшение степени аномальности непрерывного спектра магнитных звезд с ростом скорости их вращения. Получено еще одно доказательство того, что медленное вращение является одним из важнейших факторов, способствующих возникновению феномена магнитных химически пекулярных звезд.

Магнитные CP-звезды со слабой депрессией на 5200 \AA занимают промежуточное положение между звездами с сильной депрессией и нормальными A- и B-звездами как по величине поля, так и по скорости вращения.

Ключевые слова: *звезды — переменные и пекулярные*

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье [1] настоящей серии представлен каталог магнитных CP-звезд, насчитывающий 355 объектов. В дальнейшем мы предполагаем провести всесторонний комплексный анализ различных физических и кинематических характеристик объектов нашего каталога.

В этой статье серии мы рассматриваем взаимосвязь между тремя фундаментальными параметрами, отличающими нормальные звезды от химически пекулярных: магнитным полем, скоростью вращения и аномалиями в распределении энергии. Нами выбран следующий подход — изучение магнитных полей и вращения магнитных CP-звезд, имеющих разную степень аномальности в распределении энергии в континууме и, основываясь на полученных данных, поиск различных зависимостей.

Первые указания на существование связей между величиной поля на поверхности CP-звезды

и степенью аномальности континуума были получены Крамером и Мидером [2], однако дальнейшие исследования дали противоречивые результаты. Поэтому вопрос нуждается в более подробном рассмотрении.

После обнаружения Бэбкоком магнитных полей у CP-звезд [3] и последующих многолетних наблюдений, показавших, что поля глобальной структуры — это редкое явление и встречается практически только у CP-звезд (см., например, обзор [4]), исследователи неоднократно пытались найти различия между физическими параметрами этих объектов и нормальных звезд.

Надо признать, что достижений в этой области не так много — надежно установлено лишь то, что: (1) скорости вращения магнитных CP-звезд в 3–4 раза меньше, чем у нормальных звезд Главной последовательности тех же спектральных классов, (2) распределение энергии в непрерывном спектре магнитных звезд аномально по сравнению с нормальными звездами.

Работа основана на наблюдениях, полученных на 6-м телескопе САО РАН

*E-mail: roman@sao.ru

2. ДЕПРЕССИИ КОНТИНУУМА МАГНИТНЫХ CP-ЗВЕЗД

Аномалии в распределении энергии в континууме магнитных звезд были обнаружены еще в 60-е годы XX века: уменьшение бальмеровского скачка [5] и наличие нескольких депрессий, наиболее выраженной из которых является особенность на длине волны 5200 \AA [6]. Очень широкие (до $200\text{--}300 \text{ \AA}$) и мелкие (глубиной несколько процентов) депрессии наблюдаются только у магнитных CP-звезд, находящихся в температурном интервале $8000\text{--}14000 \text{ K}$, за пределами которого эти депрессии исчезают. Их максимальная величина достигается у объектов с эффективной температурой $10000\text{--}11000 \text{ K}$. Такие мелкие и широкие аномалии континуума не могли быть выявлены ранее на фотографических спектрах. Они были обнаружены уже после внедрения фотоэлектрических методов регистрации, позволивших резко повысить точность астрономических наблюдений.

Скоро выяснилось, что депрессия на 5200 \AA может эффективно использоваться для выделения и классификации магнитных звезд путем фотоэлектрической фотометрии, поэтому специально для таких наблюдений были разработаны и изготовлены наборы фильтров для области спектра в районе 5200 \AA .

Наибольшее количество наблюдательных данных получено в двух среднеполосных фотометрических системах, разработанных в Женевской и Венской обсерваториях. В качестве количественной меры в них предложены либо величина Z -параметра (в женевской фотометрической системе [2, 7]), либо параметр Δa [8] в системе, разработанной в Вене, — оба параметра позволяют определить величину депрессии на 5200 \AA . Центры полос пропускания фильтров в обеих системах немного различаются, методика определения параметров также неодинакова, но на практике это не играет существенной роли: величины Δa и Z хорошо коррелируют между собой [9].

Изучение депрессий принесло новые неожиданные результаты. Оказалось, что их наличие можно использовать не только для выделения и классификации магнитных CP-звезд.

Еще в 1980 г. Крамер и Мидер [2, 7] нашли положительную корреляцию между силой поля на поверхности магнитной звезды (B_s) и величиной Z -параметра женевской системы. Хотя использованная ими для калибровки выборка была небольшой (насчитывала около 20 звезд), тем не менее, найденная корреляция впервые указала на существование связи между величиной поля и другими физическими параметрами магнитных CP-звезд.

Более того, появилась возможность измерять магнитные поля не только трудоемким зеемановским способом на крупных телескопах, но и оценивать величину магнитных полей с помощью среднеполосной фотометрии на широко доступных малых инструментах. В случае успеха это позволило бы резко увеличить количество известных магнитных CP-звезд.

Используя калибровку из работы [7], Норт и Крамер [10] нашли так называемые “женевские поля” у 708 химически пекулярных звезд. Но эти данные не получили широкого распространения ввиду недоказанности их надежности. Причины такого недоверия будут рассмотрены ниже. Здесь лишь укажем, что нами, по результатам наблюдений на 6-м телескопе, было неоднократно показано, что применение среднеполосной фотометрии исключительно эффективно для поисков новых магнитных звезд, однако ею нельзя заменить прямые зеемановские измерения звездных магнитных полей [11–13].

Рассмотрим подробнее различные механизмы, обсуждаемые в литературе, которые могли бы привести к возникновению аномалий в распределении энергии в спектре магнитных звезд, и эволюцию этих аномалий. Для объяснения природы депрессий предлагались разные физические механизмы и процессы: скачки свободно-связанных переходов в условиях повышенного содержания химических элементов [14], автоионизация Si II [15], усиление линий металлов [16]. Романюк [17] предложил объяснить корреляцию между Z -параметром женевской системы и величиной магнитного поля CP-звезд магнитным усилением спектральных линий, но в 1984 г. рассчитать это корректно не представлялось возможным.

Современная точка зрения состоит в том, что депрессия — это локальное сгущение линий металлов (в основном, железа). Не все аномалии континуума одинаковы. Наблюдения показывают, что наиболее известная депрессия на 5200 \AA имеет строение и состоит, по крайней мере, из двух компонент: (1) более узкой и глубокой с центром на 5175 \AA и (2) широкой и более мелкой — с центром на 5275 \AA . Это наглядно демонстрирует работа Майтцена [18], в которой приведен обзор наблюдаемых профилей депрессии на 5200 \AA для 17 Ar-звезд: у всех объектов, описанных выше, двухкомпонентная структура четко видна.

Адельман [19] еще в 1995 г. при расчетах синтетического спектра получил такую двухкомпонентную структуру особенности на 5200 \AA и пришел к выводу, что, по крайней мере, часть депрессии — есть результат бланкетирования линий (“magnetic line blanketing”). Своими расчетами синтетического фотометрического индекса Δa Купка и др. [20]

подтверждают этот вывод. Кроме того, они показывают, что индекс Δa увеличивается с металличностью и предсказывают, что, в среднем, величина Δa для CP-звезд в Магеллановых Облаках должна быть на 0.003 величины ниже, чем в окрестностях Солнца, т.к. металличность у них ниже ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5 \text{ dex}$). Магнитное поле в этих расчетах во внимание не принималось.

Учет магнитного бланкетирования линий методами решения обратной задачи был выполнен Кочуховым и Пискуновым ([21] и ряд других исследований). Например, в работе Кочухова и др. [22] рассчитан аномальный эффект Зеемана при полях от 1 до 40 кГс и векторе поля, перпендикулярном лучу зрения (поперечный Зееман-эффект).

Усиленное магнитным полем бланкетирование линий приводит к изменению структуры атмосферы и перераспределению энергии в спектре звезды, вследствие чего возникают аномалии в континууме. Основной вклад в депрессию на 5200 Å вносят линии Fe I и низковозбужденные Fe II. Авторы [20] вычислили синтетические величины Δa и Z -параметра женеvской системы. Оказалось, что величина этих фотометрических индексов возрастает с увеличением магнитного поля и с увеличением содержания металлов в звездной атмосфере (из-за магнитного усиления линий, подтверждая, таким образом, наше предположение [17]).

Несмотря на прогресс в исследованиях, нельзя не признать, что сделаны только первые шаги в выяснении механизмов, ответственных за происхождение аномалий в распределении энергии в спектрах магнитных звезд, а также связи степени аномальности континуума с величиной магнитного поля и другими физическими параметрами изучаемых объектов.

3. ЭМПИРИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ ДЕПРЕССИЕЙ НА 5200 Å И МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ. ПОИСКИ НОВЫХ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД

Хотя механизмы образования аномалий распределения энергии в континууме надежно не установлены, но эмпирически найденная корреляция между величиной магнитного поля и степенью аномальности континуума у магнитных CP-звезд, приведенная в работе Крамера и Мидера [7], позволила открыть новое направление работ, а именно — поиск магнитных звезд среди объектов с сильной депрессией на 5200 Å.

Очевидно, что звезды с большими фотометрическими индексами Δa и Z будут первоочередными кандидатами для зеемановских наблюдений. Поэтому важно знать, постоянны ли эти индексы для исследуемых объектов. Однозначного ответа

на этот вопрос нет. Пока еще немногочисленные наблюдения показали, что имеет место периодическая переменность интенсивности депрессии на 5200 Å, обусловленная вращением, по аналогии с хорошо изученной фотометрической, спектральной и магнитной переменностью (см., например, [23]). Это обстоятельство явным образом указывает на связь с аномальным и неоднородным химическим составом на поверхности.

Возникает закономерный вопрос — меняется ли вся депрессия целиком (например, ее эквивалентная ширина) в зависимости от магнитного поля, или только какая-то ее часть? Ответ на этот вопрос могли бы дать спектрофотометрические наблюдения в разные фазы периода вращения. К сожалению, таковых практически нет. Очевидно, что переменность депрессии внесет дополнительные сложности при поисках корреляций между ее интенсивностью и величиной магнитного поля на поверхности CP-звезды.

Поэтому после обнаружения зависимости Крамера-Мидера [7], несколько групп занялись ее проверкой на более широком наблюдательном материале. Однако довольно быстро выяснилось, что хорошей корреляции не наблюдается, возник определенный скепсис по поводу реальности найденной зависимости (например, [24, 25]).

Отметим, однако, что в качестве индикатора в большинстве случаев использовалось не поверхностное поле B_s (так как звезд с расщепленными зеемановскими компонентами очень мало), а лишь его продольная компонента B_e , и в этих случаях поверхностное поле вычислялось путем моделирования. Процедура оказалась крайне модельно зависимой, результаты получались неопределенными, поэтому интерес исследователей к поискам магнитных звезд путем анализа объектов с большими депрессиями значительно ослаб к середине 80-х годов прошлого века.

Исключение составила, пожалуй, лишь группа в SAO, работающая на 6-м телескопе. Мы использовали зависимость, полученную Крамером и Мидером для поиска новых магнитных звезд. В течение короткого промежутка времени с 1981 по 1984 г.г. нами были проведены наблюдения всех доступных для БТА объектов списка [7] с наибольшими Z -параметрами. Было обнаружено около 20 новых магнитных звезд ([26, 27] и др.).

Вероятно, число найденных нами магнитных звезд было бы больше, но многие из исследованных нами объектов оказались быстровращающимися и это не позволило выполнить измерения магнитных полей для них, так как применявшаяся в то время фотографическая методика была непригодной для анализа полей у звезд с широкими (более 1 Å) линиями.

К сожалению, в конце 80-х, в связи с окончанием фотографической эры в астрономии и исчерпанием доступных нам для наблюдений объектов из списка [7], мы были вынуждены на целое десятилетие прервать поиски новых магнитных звезд. И только в 1998 г., уже с новой аппаратурой (ПЗС-матрицами), возобновились регулярные зеемановские наблюдения CP-звезд с большими депрессиями. Так как список Крамера и Мидера [7] ранее был нами практически исчерпан, возникла проблема эффективного поиска кандидатов в магнитные звезды. Она была нами решена.

Основные результаты наблюдений на 6-м телескопе в 1999–2006 г.г. опубликованы в работе Кудрявцева и др. [13], в ней же приведен подробный анализ методики. Мы обнаружили 72 новые магнитные звезды из 96 наблюдавшихся кандидатов с сильными депрессиями, что демонстрирует высокую эффективность применявшегося подхода. Например, в наиболее полном каталоге магнитных CP-звезд Романиюка и Кудрявцева [1], объекты, обнаруженные по величине депрессии на 5200 \AA составляют более одной трети всего списка. У 24-х звезд, изученных в работе [13], поле оказалось ниже предела обнаружения, однако 17 из них являются быстровращающимися звездами с широкими линиями, поэтому с высокой точностью измерить поле у них не удалось. Нельзя исключить, что по крайней мере часть из них являются магнитными.

Таким образом, анализируя все полученные данные наблюдений, можно прийти к вполне определенному заключению: более чем у 75% всех химически пекулярных звезд спектральных классов A и B с сильными депрессиями из нашего списка [13] обнаружены магнитные поля.

Сравним эти цифры с данными о доле магнитных звезд, полученных без анализа депрессий в работах, выполненных до 1981–1982 г.г.

Так, в известном каталоге Бэбкока [28] представлены результаты измерений 338 звезд, из них только 89 оказались магнитными. В дальнейшем наличие поля было подтверждено лишь у 80-ти из них. В компилятивном каталоге Диделона [29] приведены результаты определений магнитных полей 755 звезд, опубликованные до 1981 г. (включая каталог Бэбкока). Примерно 500 объектов в нем — это A- и B-звезды Главной последовательности, магнитное поле найдено у 120 из них.

Таким образом, в старых работах, когда еще не было известно зависимости Крамера-Мидера [7], поля находили только примерно у одной четверти исследованных объектов. Поэтому, принцип отбора кандидатов среди звезд с большими депрессиями, предложенный в CAO [26, 27], безусловно эффективен.

В работах, выполненных в последние годы, доля найденных магнитных звезд выше: Баньюло и др. [30] нашли 37 новых магнитных из 97 наблюдавшихся горячих CP-звезд, принадлежащих скоплениям, а Хубриг и др. [31] из 105 наблюдавшихся более холодных Ap/Bp-звезд магнитное поле обнаружили у 57. Видим, что доля вновь обнаруженных магнитных звезд в этих наблюдениях, выполненных на приборе FORS1 8-м телескопа VLT составляет 40–50%. К сожалению, авторы не указывают каким образом производился отбор кандидатов для магнитных исследований.

Наблюдения доказывают, что при наличии реальной связи между величиной поля на поверхности CP-звезды и степенью аномальности ее континуума, все же не ясно, наблюдается ли простой линейный рост глубины депрессии с величиной поля. Корреляция между этими величинами достаточно слабая, наблюдаются большие отклонения от средней зависимости для отдельных объектов. На наш взгляд, одной из возможных причин этого является то, что наблюдаемые и измеряемые нами величины полей и депрессий усреднены по всей поверхности, и они не вполне адекватно отражают реальные физические условия в конкретной локальной области химически неоднородной звезды, к которой мы относим сравниваемые параметры.

Учитывая вышеизложенное, мы решили выяснить, различаются ли по своим физическим характеристикам магнитные CP-звезды с сильными и слабыми депрессиями на 5200 \AA .

4. ФОРМИРОВАНИЕ ВЫБОРОК МАГНИТНЫХ CP-ЗВЕЗД С СИЛЬНЫМИ И СЛАБЫМИ ДЕПРЕССИЯМИ

Для сравнительного анализа необходимо сформировать выборки объектов. В данной статье будем рассматривать только магнитные CP-звезды, представленные в нашем каталоге [1], который в настоящее время является наиболее полным из всех имеющихся. Анализироваться будут только те объекты, для которых были измерены фотометрические индексы Z и/или Δa и эффективная температура находится в пределах от 8000 К до 14000 К. Как отмечено выше, за пределами указанного температурного интервала интенсивность депрессий резко уменьшается независимо от величины поля. Так как определения эффективных температур выполнены не для всех звезд нашего каталога, то иногда основанием для включения звезды в выборку был ее спектральный класс.

Сведения о температурах и других параметрах взяты из нашей базы данных магнитных CP-звезд, описанной в диссертации Романиюка [32].

Будем считать, что звезда имеет сильную депрессию на 5200 \AA в случае, если хотя бы один из описывающих ее фотометрических индексов (Z или Δa) превышает или равен 0.035^m . Объекты с $Z < 0.035^m$ и $\Delta a < 0.035^m$ считаются имеющими слабую депрессию. Критерий раздела в 0.035^m был выбран, исходя из опыта наших предыдущих исследований (например, работы Кудрявцева и др. [13]).

Объекты с сильными депрессиями представлены в Табл. 1, а со слабыми — в Табл. 2.

В нашу выборку дополнительно включены еще несколько звезд, для которых нет измерений в женеvской либо венской системе, но нами была определена максимальная глубина “линий” либо “групп линий” депрессии по спектрам низкого разрешения, полученным на 1-м телескопе САО (они обозначены “*large*” и “*small*”).

В колонках Табл. 1 приведены: (1) название звезды; (2) среднеквадратичная величина продольного магнитного поля $\langle B_e \rangle$ (взята из первой работы настоящей серии [1]; 3) индекс венской системы Δa ; 4) индекс Z женеvской системы. Оба индекса (в звездных величинах) взяты из различных литературных источников (в частности, из работы [13]), в некоторых случаях Z -параметр был вычислен нами по данным женеvской фотометрии (General Catalogue of Photometric Data — GCPD, <http://obswww.unige.ch/gcpd>); 5) проекция скорости вращения звезды на луч зрения $v \sin i$ (в км/с) и 6) период P вращения звезды (в сутках) — взяты из нашей базы данных; 7) тип пекулярности рс по Ренсону и др. [33].

Таблица 1. Звезды с сильной депрессией на 5200 \AA

HD	$\langle B_e \rangle$, Гс	Δa , зв. вел.	Z , зв. вел.	$v \sin i$, км/с	P , сут.	рс
315	1520	0.036	-0.030	81	—	Si
2453	588	0.063	-0.066	6	547	SrCrEu
2957	520	0.036	-0.033	27	—	CrEu
3980	1200	0.038	-0.047	—	4.0	SrCrEu
5601	1190	0.049	-0.052	22	1.1	Si
5797	1500	0.038	-0.037	< 5	69	SrCrEu
6757	2730	<i>large</i>	<i>large</i>	< 10	—	CrEuSi
8855	400	0.050	-0.050	—	—	SiCr
9996	830	—	-0.042	3	8000 (:)	CrEu
10783	1269	0.047	-0.046	20	4.1	SrCr
11187	616	0.023	-0.037	< 30	—	SiCrSr
11503	545	0.040	—	69	1.6	SiCrSr
12288	1643	0.055	-0.053	4	34.8	CrSi
14437	1829	—	-0.069	5	26.8	CrEuSi
16605	1700	0.056	-0.065	13	> 7 ^d	SiSrCr
18078	800	0.055	-0,078	< 10	1400	SrCr
19712	2510	0.043	-0.050	42	2.2	CrEu
21590	1100	0.034	-0.045	40	—	Si
27309	1755	0.065	-0.059	66	1.6	SiCr
27404	1700	—	-0.045	37	2.8	SiCr
29925	820	0.046	-0.044	23	—	Si
30466	1464	0.054	-0.073	42	1.4	SiCr

Таблица 1. (Продолжение)

HD	$\langle B_e \rangle$, Гс	Δa , зв. вел.	Z , зв. вел.	$v \sin i$, км/с	P , сут.	pec
293764	3760	<i>large</i>	—	—	2.8	SrCrEu
32145	2000	0.037	-0.043	—	2.4	Si
32633	2760	0.040	—	23	6.4	SiCr
34452	743	0.061	—	62	2.4	Si
34719	880	0.044	-0.043	49	1.6	SiHgCrEu
290665	1500	—	-0.048	—	—	CrEuSr
37140	450	0.031	-0.035	37	2.7	He-wk
37642	2100	0.034	-0.041	100	1.1	He-wk
39082	1290	0.042	-0.049	60	—	SrCrEu
40711	500	0.043	-0.043	< 20	—	SrCrEu
40759	1990	0.027	-0.047	25	—	CrEu
41403	330	0.048	-0.052	28	> 2 ^y	SrCrEu
42616	620	—	-0.037	< 20	17.0	SrCrEu
43819	560	0.042	-0.033	20	1.1	Si
45107	300	—	-0.037	—	—	CrEu
45530	590	0.036	-0.043	—	1.6	Si
45583	2880	0.067	-0.059	75	1.2	Si
258686	6000	<i>large</i>	<i>large</i>	—	—	Si
49223	390	—	-0.043	—	—	SrEu
49976	1490	0.043	-0.044	31	3.0	SrCrEu
50169	1220	0.078	-0.072	0	> 4 ^y	SrCrEu
50461	1500	0.052	—	—	—	SiCr
52628	2000	<i>large</i>	—	< 10	—	CrEu
53081	450	—	-0.045	—	—	Si
54118	1030	0.041	-0.041	50	3.3	Si
55719	1400	0.027	-0.036	—	36.5	SrCrEu
59435	800	0.025	-0.068	0	> 3 ^y	SrCrSi
66350	480	0.037	-0.034	30	—	CrEu
71866	1680	0.056	-0.058	20	6.8	SiSrEu
72295	200	0.035	—	—	—	SrCrEu
72968	480	0.050	-0.040	13	11.3	SrCr
74521	812	0.076	-0.061	20	7.8	SiCrEu
81009	1430	0.035	-0.043	< 10	34.0	CrSiSr
83368	576	0.011	-0.042	33	2.9	SrCrEu

Таблица 1. (Продолжение)

HD	$\langle B_e \rangle$, Гс	Δa , зв. вел.	Z , зв. вел.	$v \sin i$, км/с	P , сут.	pec
90044	740	0.065	-0.050	15	4.4	SiCrSr
90569	192	0.036	-0.032	27	7.8	SiCrEu
98088	802	0.034	-0.056	25	5.9	SrCrEu
103498	333	0.046	-0.051	25	—	CrEuSr
108662	620	0.050	-0.040	18	5.1	SrCrEu
110066	204	—	-0.064	0	4900	SrCrEu
111133	806	0.056	-0.059	10	16.3	SrCrEu
112381	3400	0.048	-0.056	—	2.8	SiCr
112413	1350	0.040	-0.032	24	5.5	SiHgCrEu
112528	900	0.024	-0.041	—	—	SrEuCr
116114	1920	0.011	-0.040	0	27.6	SrCrEu
116458	1925	0.054	-0.057	0	147.9	SiEuCr
118022	808	0.050	-0.052	10	3.7	SrCrEu
120198	705	0.038	-0.038	49	1.4	EuCr
122532	665	0.038	-0.041	—	3.6	Si
125248	1505	0.044	-0.043	< 17	9.3	CrEu
126515	1720	0.052	-0.055	< 5	130.0	CrSr
133029	2420	0.064	-0.059	20	2.9	SiCrSr
133652	1110	—	-0.048	31	2.3	SiCr
134793	770	0.041	-0.044	—	2.8	SrCrEu
137193	680	0.039	-0.041	—	—	Si
137509	1020	0.066	-0.069	—	4.5	SiCrFe
142554	1310	—	-0.084	27	—	CrEu
143473	4290	0.045	—	—	—	Si
147010	4032	—	-0.076	23	3.9	SiCrS
149911	1035	0.039	-0.049	45	6	CrSiSr
151965	2602	0.035	-0.036	—	1.6	Si
152107	1487	0.039	-0.040	24	3.9	SrCrEu
153882	1750	0.049	-0.046	20	6.0	SrCrEu
158450	1570	0.022	-0.051	< 20	—	SrCrEu
168796	610	—	-0.049	< 20	—	SiCrSr
170565	1760	—	-0.062	—	—	SrCrEu
170836	490	0.046	—	—	—	—
170973	530	—	-0.053	17	18.2	SrSiCr

Таблица 1. (Продолжение)

HD	$\langle B_e \rangle$, Гс	Δa , зв. вел.	Z , зв. вел.	$v \sin i$, км/с	P , сут.	pec
349321	2700	<i>large</i>	<i>large</i>	—	5	Si
178892	5400	<i>large</i>	<i>large</i>	9	8.2	SrCrEu
343872	2930	0.146 <i>var</i>	—	< 15	8.8	Si
182532	420	—	-0.049	—	—	CrEu
187474	1488	0.067	—	0	2345	CrEuSi
188041	1100	0.075	-0.059	0	224	CrCrEu
189963	410	—	-0.039	—	—	SrCrEu
192224	420	—	-0.054	—	—	CrEu
192678	1410	0.063	-0.087	5	6.4	Cr
192913	483	0.048	-0.034	—	16.8	SiCr
196178	973	0.035	-0.031	55	1.0	Si
196502	490	0.072	-0.043	10	20.2	SrCrEu
196691	1810	—	-0.051	22	—	Si
204815	430	0.040	—	—	—	Si
205087	500	—	-0.044	25	—	SiSrCrEu
207188	1220	0.037	-0.035	43	—	Si
209051	2620	—	-0.076	—	—	SrCrEu
221006	600	0.035	—	—	2.3	Si
221936	2000	<i>large</i>	<i>large</i>	60	0.6	Si
223640	643	0.043	-0.037	30	3.7	Si
224801	1318	0.055	-0.032	40	3.4	SiSrEu

Следует также иметь ввиду, что для тех немногочисленных звезд, для которых было изучено поведение депрессии с фазой периода вращения, была найдена ее переменность. Поэтому переменными являются и описывающие ее индексы. К сожалению, для большинства объектов из нашего списка нет измерений поведения индексов Z и Δa с фазой периода вращения, поэтому не исключено, что некоторые из них имеют более сильные, чем мы считаем, депрессии и оказываются ошибочно не в той таблице.

Таким образом, в Табл. 1 мы собрали 111 магнитных CP-звезд с сильной депрессией континуума на 5200 Å. В Табл. 2 представлены магнитные CP-звезды со слабой депрессией, у которых ни один из фотометрических индексов (Δa или Z) не превышает 0.035^m. Обозначения те же, что и в Табл. 1.

Рассмотрим распределение звезд с сильными и слабыми депрессиями по типам пекулярности.

Усредненные данные приведены в Табл. 3. Обозначения следующие: N — количество звезд, % — доля от общего количества.

В целом, распределения по типу пекулярности совпадают, но обращает на себя внимание несколько меньшая доля звезд типа Si+ и большая доля типа He-wk для объектов со слабыми депрессиями. Доля SrCrEu и Si-звезд одинакова для обеих групп.

Конечно, для звезд He-wk статистика скудная. Возможно, увеличение их доли среди объектов со слабыми депрессиями связано с температурными эффектами. Так как в настоящее время наблюдательных данных по звездам He-wk недостаточно для целей нашей работы, рассмотрение этого вопроса отложим на будущее.

Таким образом, мы считаем, что выборки CP-звезд с сильными и слабыми депрессиями по типам пекулярности существенно не различаются. Это

может указывать на то, что содержание отдельных химических элементов не является решающим фактором, определяющим степень аномальности континуума.

5. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ СР-ЗВЕЗД С СИЛЬНОЙ И СЛАБОЙ ДЕПРЕССИЕЙ НА 5200 Å

Сравним магнитные поля звезд с сильной и слабой депрессией на 5200 Å. Поверхностное поле B_s , определяемое непосредственно по зеемановскому расщеплению линий, найдено лишь примерно у 20 наиболее холодных и медленно вращающихся звезд из Табл. 1 и 2. Поэтому в нашей работе мы используем значительно более многочисленные сведения о продольном поле B_e .

Так как кривые переменности продольного компонента поля с фазой периода вращения имеются лишь только для одной трети магнитных звезд, а мы хотим провести сравнительный анализ максимально возможного количества этих объектов, здесь в качестве количественного индикатора магнитного поля мы вынуждены рассматривать только среднеквадратичную величину его продольной компоненты $\langle B_e \rangle$.

Как нами было показано в статье [1], величина $\langle B_e \rangle$, также как и экстремальная величина продольной компоненты B_{ext} , имеют примерно одинаковое распределение — наблюдается уменьшение количества звезд с увеличением поля по экспоненциальному закону. Поэтому использование величины $\langle B_e \rangle$ для сравнительного анализа вполне допустимо. Источник сведений о магнитных полях — первая работа серии [1].

5.1. Анализ среднеквадратичных продольных полей $\langle B_e \rangle$

По данным Табл. 1 и 2 построим распределение среднеквадратичных магнитных полей $\langle B_e \rangle$ для звезд обеих выборок. Гистограмма распределения звезд по величине $\langle B_e \rangle$ приведена на Рис. 1. На Рис. 1(a) представлены звезды с сильной депрессией, а на Рис. 1(b) — со слабой.

То, что магнитное поле у звезд с сильными депрессиями больше, хорошо заметно даже при визуальном сравнении Рис. 1(a) и 1(b).

Таблица 2. Звезды со слабой депрессией на 5200 Å

HD	$\langle B_e \rangle$, Гс	Δa , зв. вел.	Z , зв. вел.	$v \sin i$, км/с	P , сут.	pec
4478	990	—	-0.032	—	—	SiCr
4778	1020	—	<i>small</i>	33	2.56	SrCrEu
5737	324	0.013	-0.005	10	21.6	He-wk
6532	400	0.003	-0.032	—	2.0	—
8441	284	0.024	-0.019	< 5	69.4	SrCrEu
9147	400	—	-0.026	23	—	Sr
12447	365	0.030	-0.031	105	1.5	SrCr
12767	242	0.025	-0.024	87	1.9	Si
15089	203	<i>small</i>	<i>small</i>	47	1.7	SrCr
15144	802	0.025	-0.031	23	15.9	SrCrEu
18296	440	0.031	-0.032	22	2.9	SiSrCrEu
19832	315	0.015	-0.020	200	0.7	Si
22470	733	0.019	-0.021	135	1.9	He-wk
24155	800	0.026	-0.022	52	2.5	Si
25267	241	0.026	-0.034	20	1.2	Si
25354	206	<i>small</i>	<i>small</i>	—	3.9	CrEu

Таблица 2. (Продолжение)

HD	$\langle B_e \rangle$, Гс	Δa , зв. вел.	Z , зв. вел.	$v \sin i$, км/с	P , сут.	pec
25823	668	0.032	-0.030	15	7.2	SrSi
30598	220	0.018	—	< 20	—	SrCr
34162	440	—	-0.029	23	—	SrCrEu
36313	1020	<i>small</i>	<i>small</i>	—	0.6	He-wk (Si)
36668	900	0.026	-0.032	49	2.1	He-wk
36916	500	<i>small</i>	<i>small</i>	100	1.6	He-wk
36955	900	—	-0.024	37		CrEuSr
38823	1510	0.019	-0.033	20	8.6	SrCr
40312	340	0.028	-0.019	48	3.2	Si
47756	420	0.032	-0.028	28		SiCrSr
49713	2560	—	-0.032	—	2.1	SiHgCrEu
50403	830	0.020	—	—	—	SrEu
51418	401	0.032	-0.042	—	5.5	HoDy
73340	1640	0.016	-0.022	—	2.7	Si
78316	208	0.007	—	15	5.0	HgMn
79158	672	0.031	-0.028	29	3.8	He-wk
89822	200	0.006	-0.002	14	7.6	HgSiSr
107612	320	—	-0.026	38	2.0	Sr
108651	380	0.002	-0.029	—	—	Am?
108945	537	0.026	-0.027	66	2.0	SrCr
115708	927	-0.001	-0.027	13	5.1	SrCrEu
119213	1220	0.026	-0.031	25	2.5	CrEuSr
124224	570	0.020	-0.020	120	0.5	Si
128898	654	0.004	-0.033	—	4.4	SrEu
130559	1375	0.029	-0.027	20	—	SrCrEu
135297	785	0.032	-0.027	—	2.8	SrCrEu
140160	860	0.028	-0.024	66	1.6	SrCr
142884	950	0.012	—	130	—	Si
148898	250	0.016	—	41	1.8	SrCrEu
151199	280	0.019	-0.023	48	—	Sr
159545	310	0.031	-0.031	—	—	Si
164258	800	0.022	-0.033	60	—	SrCrEu
164827	310	—	-0.031	—	—	CrEu
169842	370	—	-0.031	50	2.7	SrCr

Таблица 2. (Продолжение)

HD	$\langle B_e \rangle$, Гс	Δa , зв. вел.	Z , зв. вел.	$v \sin i$, км/с	P , сут.	pec
170397	615	0.033	—	46	2.2	SiCrEu
173650	326	0.020	-0.030	22	10.0	SiCrSr
179761	480	0.000	-0.000	—	1.7	Si
231054	1650	—	-0.008	20	—	SiSr
184471	350	—	-0.034	—	—	SrCrEu
196606	900	0.020	-0.020	80	—	Si
196655	400	0.034	—	—	—	—
199728	400	0.023	—	—	—	Si
210432	1190	0.025	—	—	—	CrSiSr
220825	269	0.034	-0.033	34	1.4	CrSr

Средняя величина продольной компоненты для звезд с сильными депрессиями $\langle B_e \rangle = 1341 \pm 98$ Гс, а для объектов со слабыми $\langle B_e \rangle = 645 \pm 58$ Гс. Поле $\langle B_e \rangle$ величиной не менее 2 кГс имеют 19 из 111 звезд с большой депрессией (17%), и лишь 1 из 60 звезд со слабой (1.7%) — т.е. меньше на порядок. Среднеквадратичные поля $\langle B_e \rangle$ величиной более 3 кГс встречаются только у звезд с сильными депрессиями.

Статистический анализ, проведенный различными методами параметрической и непараметрической статистики (в частности, с использованием непараметрического критерия сдвига Манна-Уитни), показывает, что, в целом, средние величины $\langle B_e \rangle$ магнитных полей звезд с сильной депрессией достоверно больше, чем у звезд со слабой. Вероятность случайного возникновения наблюдаемых различий — не более 0.01%.

Таким образом, нами достоверно установлено, что, в среднем, поле $\langle B_e \rangle$ у магнитных CP-звезд с сильной депрессией на 5200 \AA (1341 Гс) примерно в 2 раза больше, чем у звезд со слабой (645 Гс).

Констатация этого факта важна. Как мы уже отмечали выше, существование лишь слабой корреляции между величиной депрессии и напряженностью магнитного поля часто служило поводом для сомнений в реальности связи между ними.

Наша точка зрения по этому вопросу излагалась неоднократно (см., например, диссертацию Романюка [32]). Она заключается в том, что некоторая общая связь между величиной поля на поверхности звезды и степенью аномальности ее континуума существует, что ее можно использовать при поисках новых магнитных звезд, однако заменять прямые зеемановские измерения на фотометрические

оценки магнитных полей не следует. Теперь мы надежно подтверждаем наши прежние выводы — сильные поля наблюдаются только у объектов с сильной депрессией.

Ответа на вопрос “все ли звезды с сильными депрессиями являются магнитными” пока нет. Видимо, для большинства CP-звезд такое утверждение справедливо, но, возможно, не для всех. Например, в нашей выборке из 96 звезд с сильными депрессиями у 24-х поле оказалось ниже предела обнаружения [13]. Однако 17 из них оказались быстровращающимися звездами с широкими линиями, из-за чего их магнитное поле с высокой точностью измерить не удалось. Не исключено, что они обладают достаточно сильными полями. Оставшиеся 7 звезд имеют сравнительно узкие линии, что позволяет провести точные измерения. Для каждой из них делалось по несколько измерений, но поля сильнее 200–300 Гс обнаружено не было.

Не следует забывать и другое обстоятельство. В качестве индикатора силы магнитного поля мы выбрали величину $\langle B_e \rangle$ — так называемое среднеквадратичное поле, представляющее собой некую усредненную по фазе периода вращения величину продольной компоненты поля (подробнее в статье [1]). Такое представление используется в случае, когда имеет место недостаток наблюдательных данных.

Поскольку мы анализируем не вектор поля, а лишь его среднюю проекцию на луч зрения, то возможно (хотя и маловероятно), что наблюдаемые различия между величиной депрессии и магнитным полем обусловлены различными условиями видимости различных CP-звезд. Это можно проверить достаточно просто.

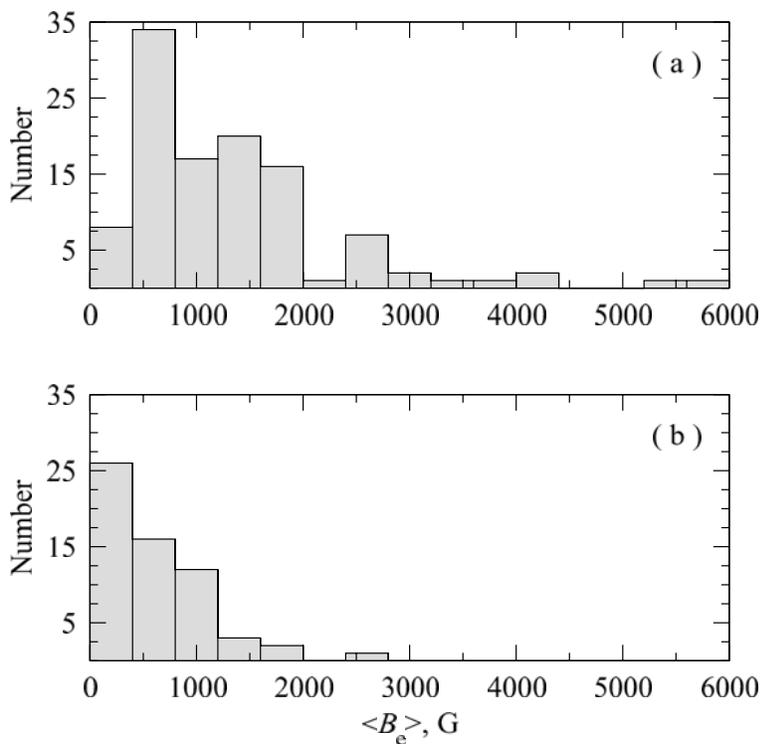


Рис. 1. Гистограмма распределения величины $\langle B_e \rangle$ магнитных звезд с сильными (а) и слабыми депрессиями (б).

Таблица 3. Распределение звезд с сильными и слабыми депрессиями по типу пекулярности

Тип пекулярности	Сильные депрессии		Слабые депрессии	
	N	%	N	%
He-wk	2	1.8	6	10.0
Si	25	22.5	12	20.0
Si+	32	28.8	10	16.6
SrCrEu	49	44.1	26	43.3
другие	3	2.7	6	10.0

Рассмотрим, в первую очередь, не являются ли звезды с сильными депрессиями объектами, видимыми преимущественно со стороны магнитных полюсов, где наблюдаемый продольный компонент магнитного поля наибольший, в то время как звезды со слабыми депрессиями видны преимущественно в области магнитного экватора, где наблюдаемый продольный компонент поля минимальный. В таком случае можно предположить, что депрессии вызываются аномальным содержанием какого-то химического элемента, сконцентрированного вокруг магнитных полюсов, а корреляция с величиной поля и переменность депрессии обусловлена чисто геометрическими эффектами.

Для проверки этой гипотезы необходимо про-

анализировать кривые переменности продольной компоненты поля B_e с фазой периода вращения.

5.2. Анализ фазовых кривых продольной компоненты поля B_e

Как уже было выше упомянуто, примерно для сотни магнитных CP-звезд построены кривые переменности продольной компоненты поля с фазой периода вращения. Сравнив их с аналогичными кривыми для фотометрических индексов Z и $\Delta\alpha$, можно было бы прояснить существование связей между магнитным полем и аномалиями в распределении энергии у этих объектов. К сожалению, переменность указанных индексов с фазой периода исследована лишь для нескольких звезд. Поэтому

мы вынуждены ограничиться лишь поиском неких общих статистических закономерностей.

Для анализа выберем CP-звезды с достаточно надежными кривыми переменности продольной компоненты поля B_e , известными периодами вращения, для которых проведено не менее 4-х измерений B_e в существенно разных фазах периода. К сожалению, приходится ограничиваться 4-мя измерениями, количество звезд и количество определений поля для каждой из них находятся в обратной зависимости, поэтому наш выбор представляет собой некий компромисс. В случае 4-х измерений мы уже можем достаточно уверенно оценить экстремальные величины продольной компоненты $B_e(\max)$ и $B_e(\min)$. Источник сведений — наш каталог [1].

Данные о полях звезд с сильными депрессиями приведены в Табл. 4, со слабыми — в Табл. 5. В колонках этих таблиц указаны: 1) название звезды; 2) $B_e(\text{extr})$ — экстремальные величины продольной компоненты (из работы [1]); 3) \bar{B} — медианное значение поля $\bar{B} = (B_e(\max) + B_e(\min))/2$, 4) $r = B(\text{med})/|B_e(\text{extr})|$. Величина $r = \pm 1$, когда звезда видна со стороны положительного или отрицательного магнитного полюса, $r = 0$, когда кривая B_e симметрична по отношению к магнитному экватору; 5) $[n]$ — количество измерений B_e ; 6) pec — тип пекулярности.

Таким образом, имеем 69 звезд с сильными депрессиями, для которых можно построить кривые измерений B_e с фазой периода вращения.

Гистограммы распределения \bar{B} и r показаны на Рис. 2. Исходя из соображений случайной (по отношению к наблюдателю) пространственной ориентации магнитной оси, следует ожидать равномерного распределения этих величин, а средние значения для всей выборки объектов должны равняться нулю. Кроме общей выборки, на гистограммах представлены две подвыборки — SrCrEu-звезд и звезд Si и Si+ (из Табл. 4).

Гистограммы распределения величин \bar{B} приведены в левой части Рис. 2(a) — для всей выборки звезд из Табл. 4, Рис. 2(c) — для звезд с типом пекулярности SrCrEu, а Рис. 2(e) — для звезд Si, Si+.

Для всей выборки медианное значение $\bar{B} = -205 \pm 143$ Гс, для звезд с пекулярностью SrCrEu $\bar{B} = +64 \pm 201$ Гс, а для звезд Si, Si+ $\bar{B} = -419 \pm 202$ Гс. Видим, что медианные величины \bar{B} для всех трех выборок значимо не отличаются от нуля.

Теперь рассмотрим величины r для указанных трех случаев. Все они представлены на правой

части Рис. 2. Медианное значение для всей выборки $r = -0.088 \pm 0.051$, для звезд с пекулярностью SrCrEu $r = -0.075 \pm 0.079$, а для звезд Si, Si+ $r = -0.097 \pm 0.072$. Видим, что заметных различий между величинами r для звезд Si, Si+ и SrCrEu не видно.

Таким же образом выполним анализ CP-звезд со слабыми депрессиями из Табл. 5. 35 звезд со слабыми депрессиями имеют магнитные кривые. Результаты анализа — гистограммы распределения величин \bar{B} и r приведены на Рис. 3.

По всей выборке медианное значение $\bar{B} = -132 \pm 72$ Гс, для звезд с пекулярностью SrCrEu $\bar{B} = -170 \pm 81$ Гс, а для звезд Si, Si+ $\bar{B} = -84 \pm 146$ Гс.

Можно видеть, что величины \bar{B} у звезд со слабой депрессией значительно меньше, чем у звезд с сильной депрессией. Из 35 объектов таблицы 5 только для двух эта величина превысила 1 кГс (т.е. 5.7%), в то время как для звезд с сильной депрессией (Табл. 4) этот показатель значительно выше: величина \bar{B} превышает 1 кГс для 21 звезды из 69 (т.е. 30.4%).

Разумеется, величина \bar{B} будет в любом случае меньше для звезд со слабой депрессией, так как продольные магнитные поля у них слабее, что мы и продемонстрировали на Рис. 1. Но, может быть, это есть следствие геометрических эффектов — слабые депрессии наблюдаются у звезд видимых с экватора, а сильные — с полюса?

Попробуем сделать выбор между указанными выше вариантами. Проанализируем распределение параметра r , который характеризует ориентацию магнитной оси к лучу зрения. Для звезд, видимых преимущественно со стороны магнитного экватора, величина r будет близкой к нулю, а для звезд, у которых, в основном, наблюдаются магнитные полюса — близкой к 1. Сравнивая гистограммы распределения величины r для звезд с сильными и слабыми депрессиями, можно попытаться прояснить из-за чего возникает разница: из-за различия величины полей или из-за разных геометрических условий наблюдения объектов.

Гистограммы приведены на правой части Рис. 3. Медианное для всей выборки значение $r = -0.090 \pm 0.057$, для звезд с пекулярностью SrCrEu $r = -0.100 \pm 0.087$, а для звезд Si, Si+ $r = -0.047 \pm 0.094$.

Сравнивая гистограммы распределения величины r для звезд с большими депрессиями (Рис. 2) и с малыми (Рис. 3), видим, что некоторые различия все же наблюдаются: величины r для звезд с малыми депрессиями концентрируются к нулю в несколько большей степени.

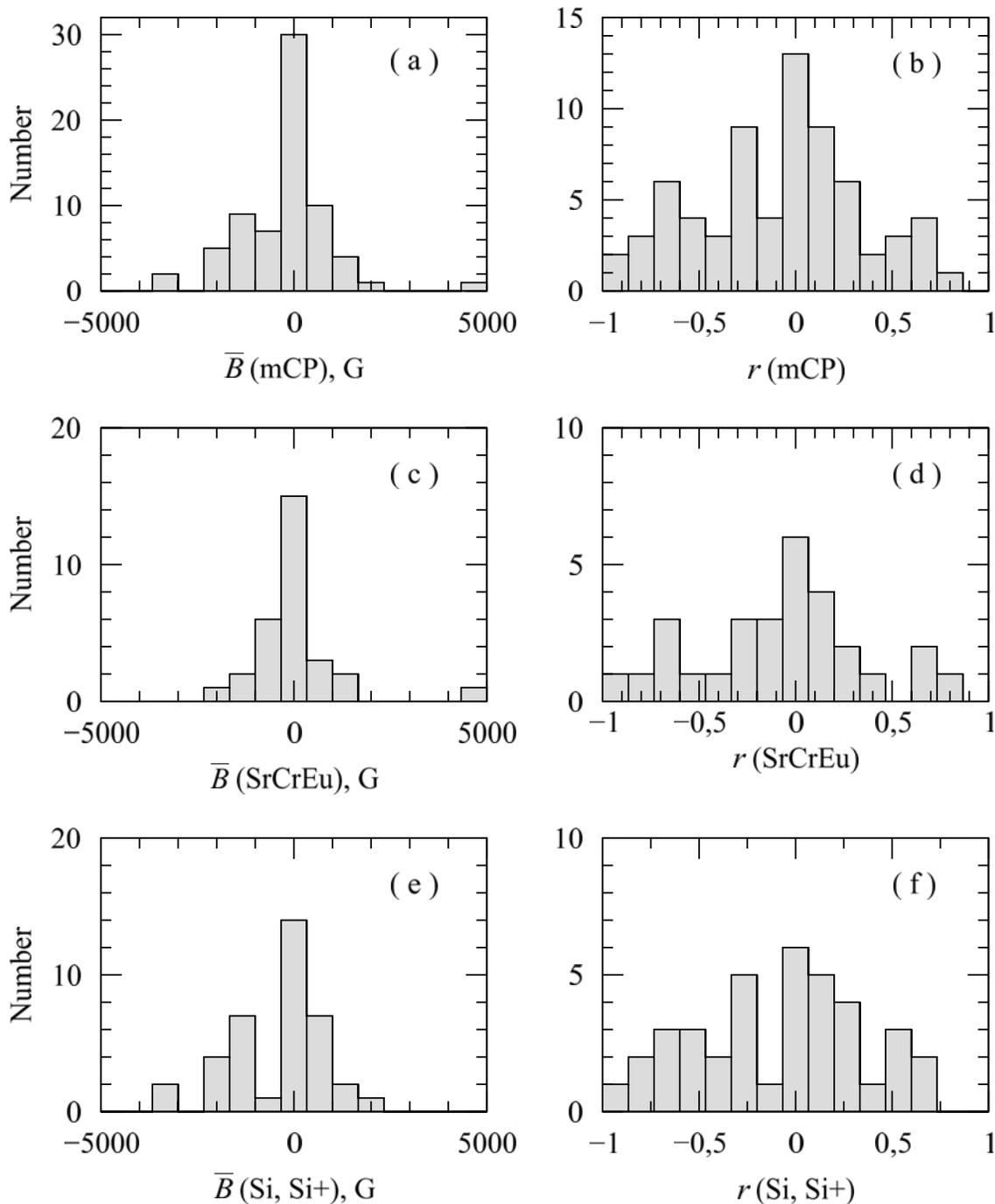


Рис. 2. Гистограммы распределения величин \bar{B} и r у звезд с сильной депрессией в континууме.

Так, $|r| > 0.5$ имеют 20 из 69 звезд с сильными депрессиями (29.0%) и 5 из 35 — со слабыми (14.3%). Таким образом, доля звезд, видимых со стороны магнитных полюсов среди звезд с сильными депрессиями в 2 раза выше. Это значит, что геометрические эффекты здесь могут играть какую-то роль, насколько она велика еще предстоит оценить. Так как не видно очень больших различий в распределениях величины r , представленных на

Рис. 2 и 3, вряд ли можно утверждать, что их влияние является преобладающим. Видимо, звезды с более сильными полями имеют более сильную депрессию. Тем не менее, этот вопрос нуждается в более детальном изучении.

Обнаружено любопытное обстоятельство — все медианные значения величины r (Рис. 2 (b, d, f) и Рис. 3 (b, d, f)) имеют отрицательный знак. Достоверность отличия от нуля в каждом от-

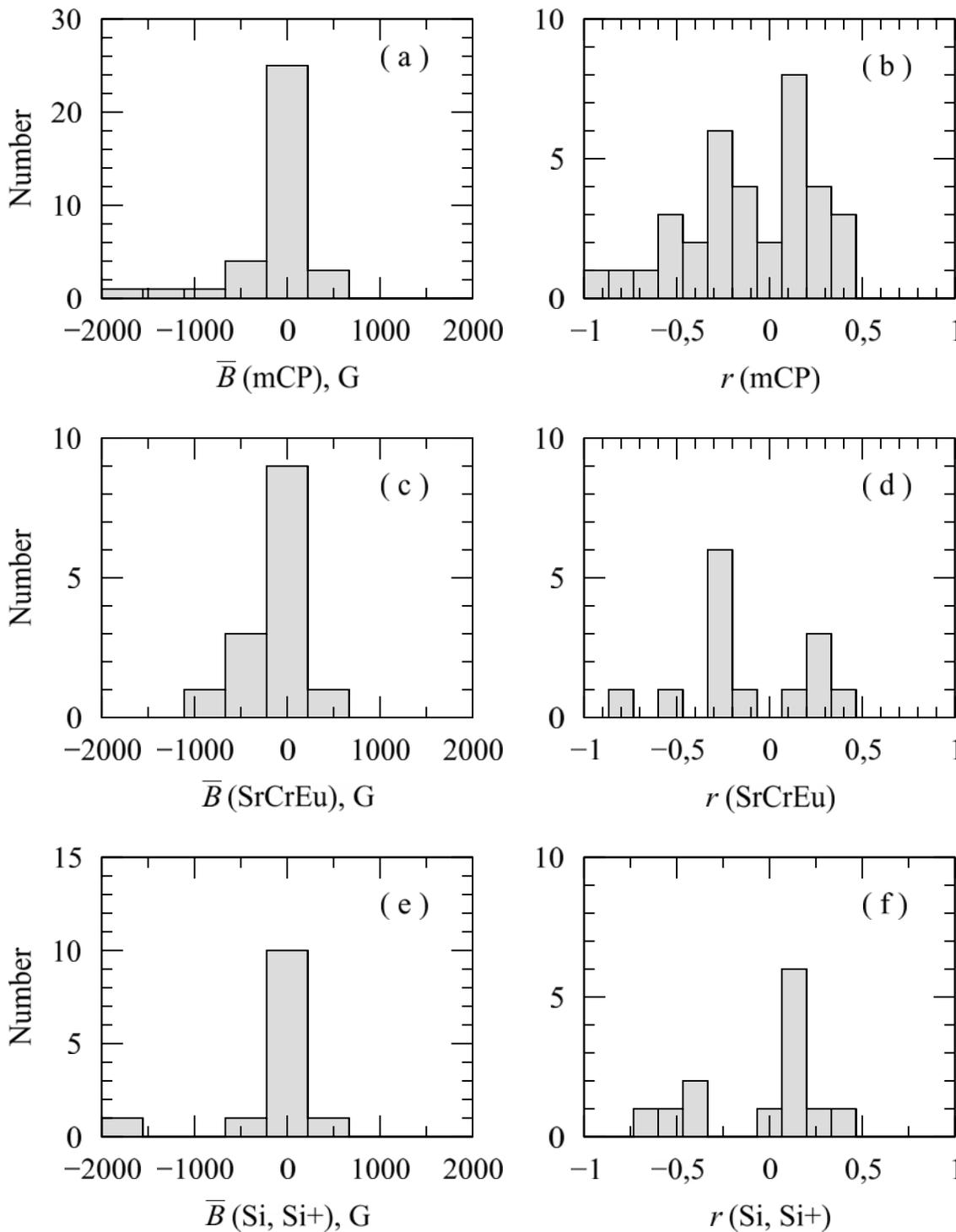


Рис. 3. Гистограммы распределения величин \bar{B} и r у звезд со слабой депрессией в континууме.

дельном случае невелика, но рассмотрим теперь кумулятивный эффект.

На Рис. 4 представлено распределение величины r для 104 звезд (суммарно из Табл. 4 и 5) в интервале температур от 8000 К до 14000 К, с известными периодами и несколькими измерениями

продольной компоненты поля, но уже вне зависимости от величины депрессии на 5200 \AA .

Анализируя гистограмму, видим, что распределение несколько асимметрично. В сторону положительных $r(+)$ наблюдается более резкий спад по сравнению с направлением $r(-)$. Величину

$r > +0.5$ имеют всего 5 звезд, в то время как $r < -0.5$ — 21 звезда, т.е. в 4 раза больше.

Медианная для всей выборки из 104 звезд величина $\bar{r} = -0.089 \pm 0.039$. Как мы видим, небольшая преимущественная ориентация наблюдается как у звезд с сильными (Рис. 2), так и слабыми (Рис. 3) депрессиями и имеет одинаковую величину.

Причина такой асимметрии неясна. Однако еще 15 лет тому назад в работе Романюка [34] было обращено внимание на систематически большее количество звезд, имеющих продольный компонент поля со знаком “—”. Поэтому следует обратить более пристальное внимание на особенности в распределении r . Такое явление могло бы возникнуть в случае систематических сдвигов в нуль-пункте при измерениях магнитных полей. Однако в настоящее время не видно источников таких ошибок: поля (+) и (–) равноправны при дифференциальных измерениях.

Конечно, статистическая достоверность полученных различий мала, поэтому реальность полученной особенности следует проверять в будущем на большем объеме данных о магнитных звездах. Не исключено, что имеет место какая-то анизотропия, связанная с пространственным распределением магнитных CP-звезд, либо с их фундаментальными физическими параметрами.

5.3. Обсуждение результатов сравнительного анализа магнитных полей

За 30 лет, прошедших после обнаружения корреляции Крамера и Мидера [2], были опубликованы десятки работ (как экспериментальных, так

и расчетных), в которых анализируются различные аспекты связей между величиной магнитного поля и аномалиями континуума. В дополнение к работам, цитируемым в первых двух параграфах, а также другим работам авторов настоящей статьи, можно указать, например, исследования [35–37]. В последних, рассматриваются также и связи с аномалиями химического состава.

Выводы большинства авторов сводятся к двум моментам: 1) действительно, наблюдается некоторый общий рост фотометрических индексов, характеризующих депрессию на 5200Å с увеличением магнитного поля; 2) анализируемые параметры отдельных звезд сильно отличаются от средних, поэтому не удается получить четких и надежных зависимостей. Однако, как мы уже писали выше, из-за большого рассеяния данных, некоторые авторы вообще отрицают наличие каких-либо связей.

На наш взгляд, реальный рост величины депрессии с полем существует, доказательством этого является эффективный поиск новых магнитных звезд среди CP-звезд с сильными депрессиями. Тем не менее, ситуация с интерпретацией является неудовлетворительной: сильное рассеяние данных не позволяет получить надежных, количественно обоснованных закономерностей, которые можно было бы сравнивать с расчетами синтетических спектров. Поэтому, одной из основных целей представляемой работы является проведение количественного анализа физических параметров максимально доступной нам выборки магнитных CP-звезд. В качестве первого шага мы сравнили магнитные поля звезд с сильными и слабыми депрессиями на 5200Å .

Таблица 4. Параметры магнитных полей звезд с сильными депрессиями

HD	B_e , Гс	\bar{B} , Гс	r	$[n]$	pec
2453	–1030/–250	–640	–0.62	8	SrCrEu
3980	–1600/2000	+200	+0.10	11	SrCrEu
9996	–1700/+600	–550	–0.32	40	CrEu
10783	–1200/+1800	+300	+0.17	23	SrEu
11187	–70/+1250	+590	+0.47	7	SiCrSr
11503	–900/+410	–245	–0.27	17	SiCrSr
12288	–3100/–200	–1650	–0.53	20	CrSi
14437	–2000/–800	–1400	–0.70	26	CrEuSi
16605	–2400/–800	–1600	–0.67	4	SiSrCr
18078	–850/+1200	+175	+0.15	20	SrCr
19712	–3800/+1900	–950	–0.25	14	CrEu

Таблица 4. (Продолжение)

HD	B_e , Гс	\bar{B} , Гс	r	$[n]$	pec
27309	-4000/-200	-2100	-0.53	12	SiCr
27404	-3100/+1100	-1000	-0.32	5	SiCr
30466	+1000/+2200	+1600	+0.73	10	SiCr
32633	-5700/+3500	-1100	-0.19	40	SiCr
34452	-300/+100	-100	-0.33	20	Si
34719	-500/+1300	+400	+0.31	8	SiHgCrEu
37140	-1050/+400	-325	-0.31	6	He-wk
37642	-3000/+3000	0	0.00	10	He-wk
41403	-500/+450	-25	-0.05	8	SrCrEu
42616	-840/-440	-640	-0.76	4	SrCrEu
45530	-650/+750	+50	+0.07	4	Si
45583	-2500/+3800	+650	+0.17	20	Si
49976	-2000/+2200	+100	+0.05	20	SrCrEu
50169	-1500/+2000	+250	+0.12	9	SrCrEu
54118	-1600/+1600	0	0.00	7	Si
55719	-1040/+2100	+530	+0.25	10	SrCrEu
59435	-1200/+900	-150	-0.13	8	SrCrSi
71866	-2000/+2000	0	0.00	100	SiSrEu
72968	-700/+500	-100	-0.14	30	SrCr
74521	-200/+1400	+600	+0.43	15	SiCrEu
81009	-100/+2500	+1200	+0.48	50	CrSiSr
83368	-800/+800	0	0.00	13	SrCrEu
90044	-800/+700	-50	-0.06	6	SiCrSr
90569	-230/+400	+85	+0.21	16	SiCrEu
98088	-1200/+1000	-100	-0.08	20	SrCrEu
108662	-1150/+550	-300	-0.26	30	SrCrEu
110066	-370/+300	-35	-0.09	30	SrCrEu
111133	-1500/-500	-1000	-0.67	20	SrCrEu
112381	-3700/-3100	-3400	-0.92	5	SiCr
112413	-1400/+1600	+100	+0.06	100	SiHgCrEu
116114	-2200/-1800	-2000	-0.91	14	SrCrEu
116458	-2200/-1300	-1750	-0.80	17	SiEuSr
118022	-1800/-200	-1000	-0.56	20	SrCrEu
120198	-1300/+200	-550	-0.42	9	EuCr

Таблица 4. (Продолжение)

HD	B_e , Гс	\bar{B} , Гс	r	$[n]$	pec
122532	-900/+900	0	0.00	24	Si
125248	-2500/+2800	+150	+0.05	50	CrEu
126515	-2000/+2000	0	0.00	20	CrSr
133029	+1300/+3300	+2300	+0.70	50	SiCrSr
133652	-2100/+700	-700	-0.33	8	SiCr
134793	-800/+900	+50	+0.06	8	SrCrEu
137509	-1200/+2200	+500	+0.23	17	SiCrFe
147010	-4500/-2500	-3500	-0.78	30	SiCrSr
149911	-2100/+450	-825	-0.39	6	CrSiSr
151965	-3700/-550	-2125	-0.57	8	Si
152107	+500/+2000	+1250	+0.63	50	SrCrEu
153882	-1800/+3100	+650	+0.21	40	SrCrEu
170973	-600/+800	+100	+0.13	7	SrSiCr
349321	-4400/+1900	-1250	-0.28	12	Si
178892	+2100/+7200	+4650	+0.65	20	SrCrEu
343872	-700/+4500	+1900	+0.42	20	Si
187474	-1800/+1800	0	0.00	8	CrEuSi
188041	-200/+1500	+650	+0.43	25	SrCrEu
192678	+1000/+1800	+1400	+0.78	20	Cr
192913	-670/+380	-145	-0.22	5	SiCr
196178	-1500/-700	-1100	-0.73	9	Si
196502	-700/-200	-450	-0.64	20	SrCrEu
221936	-2500/+2900	+200	+0.07	12	Si
223640	-20/+820	+400	+0.49	4	Si

Наш анализ показал, что звезды с сильными депрессиями (Табл. 1) имеют примерно в 2 раза большее магнитное поле ($\langle B_e \rangle = 1341 \pm 98$ Гс), чем со слабой депрессией ($\langle B_e \rangle = 645 \pm 58$ Гс) (Табл. 2). Полученные нами различия статистически достоверны. Сильные поля ($\langle B_e \rangle > 3$ кГс) встречаются только среди звезд с сильными депрессиями (Δa и/или $Z > 0.035^m$). Со стороны слабых полей мы ограничены лишь точностью измерений поля в обоих случаях. Максимум распределения звезд с сильной депрессией (Рис. 1(a)) приходится на интервал $\langle B_e \rangle = 400 - 800$ Гс, а звезд со слабой депрессией — на $0 - 400$ Гс (Рис. 1(b)).

Надежный анализ провести трудно из-за очень

больших эффектов наблюдательной селекции. Поэтому мы не можем определить нижние границы величины поля для звезд с обоими видами депрессии. Напомним, что мы анализировали только CP-звезды с достоверно обнаруженными магнитными полями из каталога, представленного в статье [1].

Полученные нами данные пока не позволяют сделать четкий вывод — наблюдается ли линейная прямая зависимость между величиной поля и степенью аномальности континуума, либо мы имеем какой-то пороговый эффект. Несомненно только то, что более сильные поля имеют звезды с более сильными аномалиями. Между тем, надежное определение формы взаимозависимости

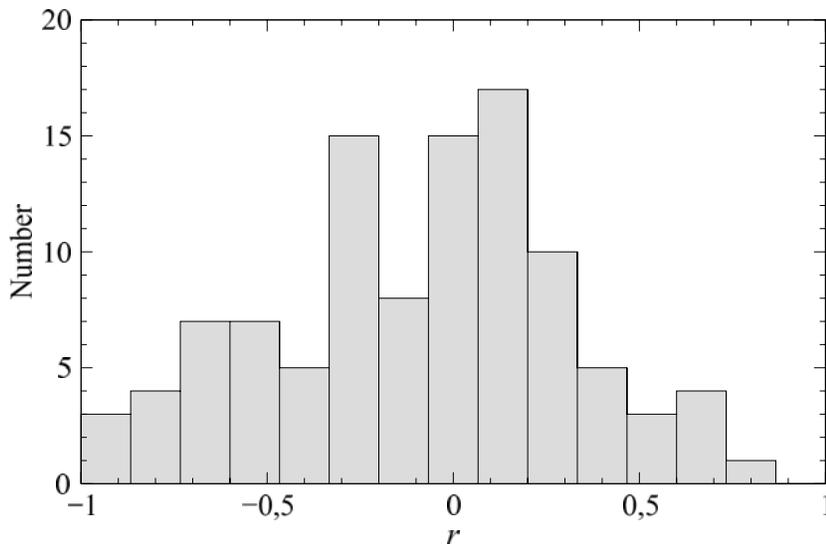


Рис. 4. Распределение величин r для 104 магнитных звезд с известными кривыми переменности B_e .

между указанными параметрами позволило бы получить важный наблюдательный тест для проверки различных механизмов образования депрессий и объяснения их свойств.

Хотя мы считаем, что зависимость “сильное поле—сильные депрессии” существует, необходимо правильно оценить вклад геометрических эффектов: выше мы показали, что среди звезд со слабыми депрессиями относительно большее число наблюдается со стороны магнитного экватора. Исходя из имеющихся наблюдательных данных, пока невозможно надежно оценить этот вклад. Мы считаем, что для решения вопроса необходимо, по крайней мере, удвоить количество звезд с хорошо определенными кривыми переменности продольной компоненты поля.

Наш анализ магнитных полей звезд с известными периодами вращения позволил получить указание на возможное существование асимметрии в пространственном распределении магнитных осей. Статистическая надежность полученной асимметрии невысока, ее присутствие еще придется доказывать. Тем не менее, следует обратить внимание на этот слабый эффект, так как некоторые указания на подобное явление для других выборок CP-звезд нами получались ранее [34].

6. АНАЛИЗ ВРАЩЕНИЯ ЗВЕЗД С СИЛЬНЫМИ И СЛАБЫМИ ДЕПРЕССИЯМИ

Хорошо известно, что по таким фундаментальным параметрам, как массы и светимости, магнитные CP-звезды не отличаются от нормальных объектов тех же спектральных классов. В то же время, магнитные звезды вращаются, в среднем,

в 3–4 раза медленнее нормальных, см., например, обзор Романюка [38].

Предположение, что медленное вращение может быть фундаментальной причиной, приводящей к возникновению различных аномалий, неоднократно обсуждалось в литературе. Преобладающая точка зрения заключается в положительном ответе на этот вопрос (подробности в вышеуказанном обзоре). В частности, Мишо [39] предположил, что в стабильных атмосферах медленно вращающихся магнитных звезд возникают условия для эффективной работы механизма селективной диффузии атомов, этим механизмом можно объяснить аномалии химического состава CP-звезд.

На основании наших данных о депрессиях континуума, скоростях и периодах вращения, рассмотрим подробнее вопрос о существовании связей между аномалиями в распределении энергии в континууме и вращением магнитных CP-звезд.

6.1. Сравнение проекций скоростей вращения $v \sin i$

Сравнение скоростей вращения звезд с сильными и слабыми депрессиями представлено на Рис. 5. Величины проекций скоростей вращения $v \sin i$ взяты из Табл. 1 и 2.

На Рис. 5(a) представлена гистограмма для 80 звезд с сильными депрессиями. Медианное значение $v \sin i$ для звезд из этой выборки 26.0 ± 2.3 км/с.

На Рис. 5(b) представлена гистограмма для 42 звезд со слабыми депрессиями. Медианное значение $v \sin i$ для объектов из этой выборки 48.5 ± 6.3 км/с.

Видим, что проекции скоростей вращения звезд с сильными депрессиями в среднем примерно в 2 раза меньше, чем у звезд со слабыми.

Проверим достоверность различий с использованием методов непараметрической статистики. Согласно критерию Манна-Уитни, звезды с сильными депрессиями статистически вращаются медленнее звезд со слабой депрессией ($W=1051$, $p=0.9997$). Это означает, что вероятность случайного возникновения различий в проекциях скоростей вращений звезд из выборок Табл. 1 и 2 не более 0.03%.

Наши выборки достаточно объемные, поэтому полученные различия мы считаем надежными. Дополнительно наш вывод подтверждает следующий факт — среди звезд с большими депрессиями значительно меньше доля быстрых ротаторов. Например, из 80 звезд с большими депрессиями только 16 (т.е. 20%) имеют проекции скоростей вращения $v \sin i > 40$ км/с. В то же время, из 42 звезд со слабыми депрессиями величину $v \sin i > 40$ км/с имеют 19 объектов (т.е. 45%). На Рис. 5(a), (b) это наглядно видно.

Хотя мы исследуем не экваториальные скорости вращения звезд v_e , а лишь их проекции на луч зрения $v \sin i$, можно быть уверенным, что различаются именно скорости v , а не условия видимости ($\sin i$). Наша уверенность основана на предположении о случайной ориентации осей вращения CP-звезд по отношению к наблюдателю (см., например, [40]). Поэтому, в среднем, величины i должны быть одинаковыми для звезд обеих выборок.

Таким образом, имеются достаточные основания для утверждения, что быстрые ротаторы наблюдаются в основном среди звезд со слабой депрессией, а звезды с сильными депрессиями вращаются медленнее. Подчеркнем здесь, что нормальные A и V-звезды вращаются гораздо быстрее, типичные величины $v \sin i$ для них составляют 200–250 км/с. Видно, что звезды со слабыми депрессиями по скорости вращения занимают промежуточное положение между звездами с сильными депрессиями и нормальными.

В случае химически пекулярных звезд имеется уникальная возможность проверить независимо это утверждение. В отличие от нормальных звезд у пекулярных наблюдается периодическая синхронная фотометрическая, спектральная и магнитная переменность, связанная с их вращением.

Периоды вращения P определяются независимо от скоростей вращения, более того, выборка звезд с известными P не совпадает с выборкой звезд с известными $v \sin i$. Это тем более интересно в нашем случае — если действительно нами установлена общая закономерность, что звезды со

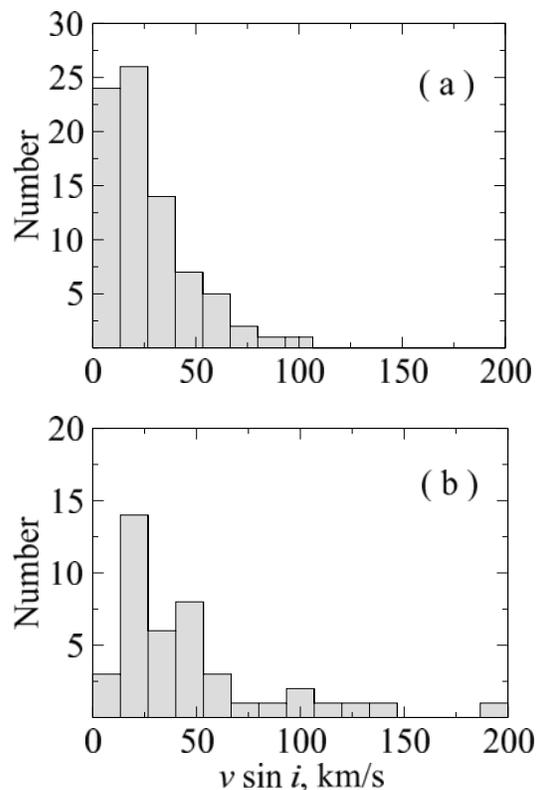


Рис. 5. Распределение звезд с сильной (a) и слабой (b) депрессией на $\lambda 5200 \text{ \AA}$ по скоростям вращения $v_e \sin i$.

слабыми депрессиями являются более быстрыми ротаторами, то периоды вращения звезд с сильными депрессиями в целом должны быть больше, чем для звезд со слабыми, независимо от выборки объектов.

6.2. Сравнение периодов вращения

Сравним периоды вращения звезд с сильными и слабыми депрессиями. Как и в случае со скоростями вращения источником информации послужат Табл. 1 и 2.

Гистограммы распределения периодов вращения магнитных CP-звезд из указанных двух выборок приведены на Рис. 6. При выполнении графического представления периодов удобнее пользоваться логарифмической шкалой, поэтому в дальнейшем в этом параграфе будем использовать величины $\lg P$.

На Рис. 6(a) приведено распределение логарифмов периодов вращения (в сутках) 75 звезд с сильными депрессиями. Среднее значение логарифма периода:

$$\overline{\log P(\text{large})} = 0.988 \pm 0.110.$$

Подобное распределение для 40 звезд со слабыми депрессиями изображено на Рис. 6(b). Среднее значение логарифма периода для них:

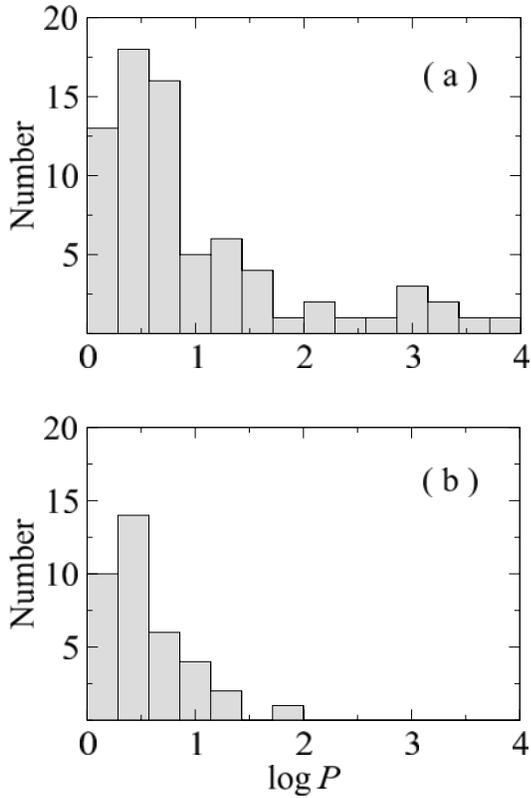


Рис. 6. Распределение звезд с сильной (а) и слабой (б) депрессией на $\lambda 5200 \text{ \AA}$ по периодам вращения P .

$$\overline{\log P(\text{small})} = 0.470 \pm 0.065.$$

Сравнение средних по критерию Манна-Уитни дает следующие значения: $W=2038$, $p=0.9992$ на уровне $\alpha=0.99$. Это означает, что вероятность случайного возникновения таких различий не превышает 0.08%.

Среди звезд со слабыми депрессиями нет ни одной с периодом более 70 суток (из 40 звезд выборки). В то же время среди звезд с сильной депрессией их 11 из 75 (т.е. около 15%). Из них 8 имеют период вращения более 500 суток.

Из Рис. 6 (а) и 6 (b) хорошо видно, что максимум распределения приходится на $\log P = 0.4 - 0.7$ (т.е. 3–5 суток) для звезд с сильными депрессиями и $\log P = 0.1 - 0.4$ (т.е. 1–3 суток) для звезд со слабыми депрессиями.

Среди 75 звезд с большими депрессиями 34 имеют периоды не более 4 суток, т.е. 45.3%, в то время как среди звезд с малыми депрессиями короткие периоды наблюдаются у 29 из 40, т.е. у 72.5%.

Таким образом, короткие периоды (не более 4 суток) имеет менее половины звезд с сильными депрессиями и почти три четверти звезд со слабыми.

Таблица 5. Параметры магнитных полей звезд со слабыми депрессиями

HD	B_e , Гс	\bar{B} , Гс	r	$[n]$	pec
4778	-1100/+1400	+150	+0.11	30	SiCr
5737	-400/+500	+100	+0.20	25	He-wk
8441	-750/+400	-175	-0.23	14	SrCrEu
12447	-510/+430	-40	-0.08	21	SrCr
12767	-230/+290	+30	+0.10	8	Si
15089	-65/+350	+140	+0.41	4	SrCr
15144	-1100/-530	-815	-0.74	35	SrCrEu
18296	-1000/+1350	+175	+0.13	20	SiSrCrEu
19832	-350/+380	+15	+0.04	11	Si
22470	-1100/+1200	+50	+0.04	11	He-wk
24155	-440/+1660	+610	+0.37	10	Si
25267	-345/-15	-180	-0.52	7	Si
25354	-350/-20	-185	-0.53	4	CrEu
25823	-100/+1200	+550	+0.46	20	SrSi
36313	-1500/-1100	-1300	-0.87	6	He-wk

Таблица 5. (Продолжение)

HD	B_e , Гс	\bar{B} , Гс	r	$[n]$	pec
36668	-1590/+1320	-135	-0.08	6	He-wk
38823	-2500/+1500	-500	-0.20	5	SrCr
40312	-240/+360	+60	+0.17	18	Si
51418	-200/+750	+275	+0.37	10	HoDy
73340	-2300/-900	-1600	-0.70	5	Si
78316	-640/+460	-90	-0.14	20	HgMn
79158	-1200/+900	-150	-0.13	25	He-wk
107612	-200/+400	+100	+0.25	6	Sr
108945	-347/+440	+45	+0.11	4	SrCr
115708	-1500/+900	-300	-0.20	13	SrCrEu
119213	-500/+1200	+350	+0.29	50	CrEuSr
124224	-437/+831	+197	+0.24	14	Si
128898	-400/0	-200	-0.50	7	SrEu
140160	-1840/+760	-540	-0.29	10	SrCr
148898	-170/+370	+100	+0.27	5	SrCrEu
169842	-660/+380	-140	-0.21	5	SrCr
170397	-650/+870	+110	+0.13	10	SiCrEu
173650	-500/+700	+100	+0.14	20	SiCrSr
179761	-590/+170	-210	-0.36	4	Si
220825	-430/+190	-120	-0.28	8	CrSr

6.3. Обсуждение результатов анализа вращения

Все изложенное выше свидетельствуют о том, что звезды с сильными депрессиями вращаются в среднем значительно медленнее звезд со слабыми депрессиями. Периоды вращения отличаются примерно в 3 раза (около 10 суток и около 3 суток соответственно).

Эти величины очень хорошо соответствуют распределению по скоростям вращения, полученным независимым образом. Наблюдается обратная зависимость, как и должно быть в соотношениях между скоростями и периодами вращения. Напомним еще раз, что выборки звезд с известными $v \sin i$ и периодами P не совпадают, что подчеркивает общий характер полученной нами закономерности.

Полученные нами результаты подтверждают найденную в диссертации Романиюка [32] обратную зависимость между степенью аномальности континуума и скоростью вращения звезд.

Наряду с массой и светимостью, скорость вращения является одним из фундаментальных параметров звезды. Но массы и светимости CP-звезд не отличаются по характеристикам от звезд с нормальным химическим составом, в то время как скорости вращения оказываются в 3–4 раза ниже. Поэтому исследованию вращения следует уделить особое внимание. Обнаруженные нами различия скоростей вращения могут указывать на то, что, возможно, существует непрерывный переход между нормальными и пекулярными звездами, а низкая скорость вращения является причиной образования аномалий.

Общепринято, что главными факторами, влияющими на эволюцию звезды, является ее масса и светимость. Так как CP-звезды по этим параметрам не отличаются от нормальных, то, видимо, медленное вращение влияет только на строение поверхностных слоев атмосферы, но не на фундаментальные параметры звезды.

Здесь уместно подчеркнуть, что масса и свети-

мость СР-звезды не определяется непосредственно из наблюдений, для этого необходимо привлекать дополнительные соображения. В то же время скорости (и, особенно, периоды) вращения могут быть найдены очень точно и надежно непосредственно из наблюдений, при этом никаких дополнительных сведений привлекать не нужно.

Кратко сравним точности определений масс, светимостей и скоростей вращения изучаемых нами объектов.

Известны всего несколько двухспектровых двойных систем среди магнитных СР-звезд и только для них можно определить массы с достаточной точностью. Для небольшого числа односпектровых систем определяется лишь функция масс, а для большинства СР-звезд масса находится по эволюционным трекам и сравнением с параметрами нормальных звезд ГП той же температуры. Ошибки определения масс в этом случае оцениваются в 20% и более. Исследования показали, что массы большинства магнитных звезд различаются слабо. Они представляют собой достаточно обособленную группу объектов с массами от 2 до $4M_{\odot}$. Нам представляется, что малый диапазон изменений и относительно большие ошибки определения масс не позволяют найти четких зависимостей между ними и магнитными полями СР-звезд (подробнее в обзоре [38] и цитируемой в нем литературе).

Абсолютные звездные величины СР-звезд с эффективными температурами от 8000 до 14000 К находятся в интервале от +2 до -4 звездной величины, т.е. их светимости различается в 250 раз. Достаточно точно светимости можно определить только для СР-звезд с надежно определенными температурами и расстояниями. Ошибки в определении светимости будут пропорциональны квадрату ошибок определения расстояния и четвертой степени ошибки определения температуры.

Расстояния с точностью не хуже 10% определяются только для близких одиночных звезд (с параллаксом $\pi > 0.005'' - 0.01''$). Хорошо известно, что эффективные температуры СР-звезд, определенные разными методами, могут различаться на 5–10%, что сразу дает ошибки в определении светимости на 20–40%. Поэтому можно считать, что светимости (по крайней мере, значительной части СР-звезд) определены с точностью ниже 30%. Особенно это касается далеких объектов, для которых в настоящее время нет измерений параллакса.

Иная ситуация с определением параметров вращения. Периоды вращения магнитных СР-звезд распределены в широком интервале: от 0.5 суток до 80 лет (звезда γ Eri), т.е. различаются в 50000 раз. При большом количестве наблюдений их можно найти с хорошей точностью. Грубые ошибки

можно исключить путем сравнения с величиной $v \sin i$. Поэтому нам представляется, что в качестве надежного наблюдательного теста лучше всего использовать зависимость различных физических и химических характеристик СР-звезд от скорости их вращения. Расчеты различных вариантов образования и эволюции магнитных полей, параметров атмосфер, скоростей диффузии и др. показывают, что такие зависимости должны иметь место, причем разные для разных моделей.

Найденная нами закономерность: “звезды с большими аномалиями в спектре вращаются медленнее звезд со слабыми, а звезды со слабыми — медленнее нормальных” подтверждает, что мы получили еще одно доказательство того, что медленное вращение, вероятно, является важным фактором, способствующим образованию различных аномалий, наблюдаемых как явление под названием “магнитная СР-звезда”.

В этой связи следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Не исключено, что для быстровращающихся звезд доплеровское уширение спектральных линий, из которых состоит депрессия, настолько велико по сравнению с магнитным уширением, что проявления последнего трудно обнаружить. Поэтому, магнитная интенсификация линий, “размытых” эффектом Доплера, может проявляться слабее в быстрых ротаторах по сравнению с медленными.

В таком случае роль медленного (по сравнению с нормальными звездами) вращения будет заключаться не в создании специфических условий, способствующих возникновению особых физических процессов (например, селективной диффузии в магнитном поле), происходящих в атмосферах СР-звезд, а лишь в более выраженном проявлении эффекта магнитного усиления в узких линиях медленных ротаторов.

Так как эффект может оказаться существенным, нужно его корректно учитывать. Без такого учета количественное сравнение с предсказаниями различных теоретических сценариев может оказаться не совсем правильным. Для его исключения необходимо провести численное моделирование профиля депрессии с учетом магнитного бланкетирования и зависимости от величины поля и скорости вращения СР-звезды.

7. ВЫВОДЫ

Анализ магнитных СР-звезд с сильными и слабыми депрессиями привел к двум уверенным выводам:

(1) звезды с сильными депрессиями имеют значимо большие магнитные поля, чем звезды со слабыми депрессиями;

(2) звезды с сильными депрессиями вращаются медленнее примерно втрое, чем звезды со слабыми депрессиями.

Магнитные CP-звезды со слабыми депрессиями занимают промежуточное положение между нормальными A- и B-звездами и объектами с сильными депрессиями как по величине поля, так и по скорости вращения.

Интервалы, в которых распределены магнитные поля и скорости вращения звезд с сильными и слабыми депрессиями, перекрываются, что указывает на непрерывный переход между этими группами объектов. Все исследованные в нашей работе параметры (полей и депрессий) меняются не скачкообразно, а постепенно. Можно полагать, что магнитные CP-звезды с большими и малыми депрессиями являются однотипными объектами, но физические условия, в которых они формировались, привели к тому, что на Главную Последовательность они вышли с разными скоростями вращения.

По-видимому, медленное вращение является одним из главных факторов, способствующих возникновению аномалий распределения энергии в континууме, и аномалий химического состава. В атмосферах медленных ротаторов возникают более благоприятные условия для стабилизации атмосферы и работы механизма магнитной сепарации атомов. Но не следует отбрасывать и вторую возможность, рассмотренную нами выше — “магнитные звезды со слабыми депрессиями — это объекты, видимые, в основном, со стороны магнитного экватора”. Продольный компонент поля у таких звезд будет меньше, чем у звезд, наблюдаемых со стороны магнитных полюсов. Кроме того, магнитная интенсификация линий у быстрых ротаторов может быть меньше. Но, чтобы разобраться в этом, необходимо изучить более детально влияние доплеровского уширения линий на интенсивность депрессии на 5200 \AA .

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались сведения из баз данных SIMBAD и WEBDA. Авторы благодарят Российский Фонд Фундаментальных исследований (гранты РФФИ №№06-02-16110а и 09-02-00002а) за частичную финансовую поддержку настоящего исследования, И.И.Р. благодарен Президиуму РАН (Программа ПРАН “Эволюция звезд и галактик”) за выделение средств на закупку необходимого оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. И. Романюк и Д. О. Кудрявцев, *Астрофизический бюллетень* **63**, 148 (2008).
2. N. Cramer and A. Maeder, *Astronom. and Astrophys.* **88**, 135 (1980).
3. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **105**, 105 (1947).
4. I. I. Romanyuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 64 (2005).
5. Ю. В. Глаголевский, *Астрон. ж.* **43**, 73 (1966).
6. K. Kodaira, *Astrophys. J.* **157**, 59 (1969).
7. N. Cramer and A. Maeder, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **41**, 111 (1980).
8. H. M. Maitzen, *Astronom. and Astrophys.* **51**, 223 (1976).
9. D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, *Scalate Pleso Contr.* **38**, 229 (2008).
10. P. North and N. Cramer, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **58**, 387 (1984).
11. V. G. Elkin, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk, *Pis'ma Astronom. Zh.* **28**, 195 (2002).
12. V. G. Elkin, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk, *Pis'ma Astronom. Zh.* **29**, 455 (2003).
13. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Paunzen, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **372**, 1804 (2006).
14. S. J. Adelman and P. R. Wolken, *Astrophys. J.* **207**, 159 (1976).
15. C. Jamar, D. Macau-Hercot, and F. Praderie, *Astronom. and Astrophys.* **63**, 155 (1978).
16. H. M. Maitzen and H. Muthsam, *Astronom. and Astrophys.* **83**, 334 (1980).
17. И. И. Романюк, *Известия САО* **18**, 37 (1984).
18. H. M. Maitzen, In *Proceedings of IAU Coll. №32* Ed. by W. W. Weiss, H. Jenkner, and H. J. Wood (Wien, Univ. Press, 1976), p.233.
19. S. J. Adelman, D. M. Pyper, Z. Lopez-Garcia, and H. Caliskan, *Astronom. and Astrophys.*, **296**, 467 (1995)
20. F. Kupka, E. Paunzen, and H. M. Maitzen, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **341**, 849 (2003).
21. O. Kochukhov and N. Piskunov, *Astronom. and Astrophys.* **388**, 868 (2002).
22. O. Kochukhov, S. Khan, and D. Shulyak, *Astronom. and Astrophys.* **433**, 671 (2005).
23. M. Muciek, J. Gertner, P. North, and F. G. Rufener, *IBVS*, **2480**, 1 (1984).
24. L. Oetken, *Astron. Nachr.* **306**, 187 (1985).
25. G. Mathys, S. Hubrig, J. D. Landstreet, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **123**, 353 (1997).
26. Yu. V. Glagolevskij, V. D. Bychkov, I. Kh. Iliev, et al., *Pis'ma Astronom. Zh.* **8**, 12 (1982).
27. Yu. V. Glagolevskij, V. D. Bychkov, I. I. Romanyuk, et al., *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **19**, 28 (1985).
28. H. W. Babcock, *Astrophys. J. Suppl.* **30**, 141 (1958).
29. P. Didelon, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **53**, 119 (1983).
30. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, and E. Mason, et al., *Astronom. and Astrophys.* **450**, 777 (2006).
31. S. Hubrig, P. North, M. Scholler, and G. Mathys, *Astron. Nachr.* **327**, 289 (2006).

32. И. И. Романюк, Дисс. на соискание степени доктора физ-мат наук, Нижний Архыз (2004) 363 (2005).
33. P. Renson, D. Kobi, and P. North, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **89**, 61 (1991). 37. Ю. В. Глаголевский, *Астрофизический бюллетень* **62**, 260 (2007).
34. I. I. Romanyuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **38**, 119 (1994). 38. И. И. Романюк, *Астрофизический бюллетень* **62**, 62 (2007).
35. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **25**, 13 (1987). 39. G. Michaud, *Astrophys. J.* **160**, 641 (1970).
36. Yu. V. Glagolevskij, T. A. Ryabchikova, and G. A. Chuntunov, *Pis'ma Astronom. Zh.* **31**, 135 (1995). 40. H. A. Abt and N. Morrel, *Astrophys. J. Suppl.* **99**, 135 (1995).

MAGNETIC FIELDS OF CHEMICALLY PECULIAR STARS. II: MAGNETIC FIELDS AND ROTATION OF STARS WITH WEAK ANOMALIES IN THE CONTINUUM ENERGY DISTRIBUTION

I.I. Romanyuk, D.O. Kudryavtsev, E.A. Semenko

A comparative analysis of magnetic fields and parameters of rotation of magnetic CP stars with strong and weak anomalies in the spectral energy distribution. Stars with strong depressions in the continuum at 5200 Å are shown to have significantly stronger fields (the mean longitudinal component of the fields of these stars is $\langle B_e \rangle = 1341 \pm 98$ G) compared to objects with weaker depressions ($\langle B_e \rangle = 645 \pm 58$ G). Stars with stronger depressions are also found to occur more commonly among slow rotators. Their rotation periods are, on the average, of about 10 days, three times longer than those of stars with weak depressions (about three days). This fact is indicative of the decrease of degree of anomaly of the continuum spectrum of magnetic stars with increasing rotation velocity. Yet another proof has been obtained suggesting that slow rotation is one of the crucial factors contributing to the development of the phenomenon of magnetic chemically peculiar stars. Magnetic CP stars with weak depressions at 5200 Å are intermediate objects between stars with strong depressions and normal A- and B-type stars both in terms of field strength and rotation velocity.

Key words: *stars: variable and peculiar*