

УДК 524.35-337/36

## МАГНИТНЫЕ СР-ЗВЕЗДЫ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

© 2010 И. И. Романюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*<sup>1</sup>

Поступила в редакцию 27 января 2010 г.; принята в печать 1 марта 2010 г.

Представлена третья часть обзора характеристик магнитных СР-звезд Главной последовательности. Рассмотрены основные определения и терминология, общие сведения о магнитных полях СР-звезд (каталоги, история развития исследований звездного магнетизма, основные результаты наблюдений, полученные на протяжении 60-ти лет исследований).

Излагаются современные представления о свойствах магнитных СР-звезд (геометрическая структура, распределение полей по величине, магнитное поле и вращение, магнитное поле и аномалии в распределении энергии, эволюционный статус магнитных СР-звезд).

Делается вывод, что большинство наблюдаемых данных поддерживают теорию реликтового происхождения и эволюции магнитных полей СР-звезд.

Ключевые слова: *звезды — переменные и пекулярные*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе мы представляем третью часть обзора, посвященного магнитным СР-звездам Главной последовательности. В первой части [1] рассмотрены методы диагностики магнитных полей, во второй [2] — дан обзор общих сведений о химически-пекулярных звездах. Настоящая часть посвящается анализу результатов измерений магнитных полей.

Хорошо известно, что магнетизм — широко распространенное явление в нашей Галактике и за ее пределами. Магнитные поля наблюдаются в межзвездном пространстве и звездах Галактики, они имеют различную интенсивность, масштаб, топологию и время жизни. Поля ответственны за генерацию различного рода вспышек, взрывов и других проявлений нестационарности космических объектов. Исследование механизмов генерации и поддержания космических магнитных полей, а также их роли в эволюции звезд и галактик — одно из важнейших направлений исследований в современной астрофизике.

Как правило, проявление магнитного поля при наблюдениях небесных объектов очень слабо, поэтому исследователи могут лишь констатировать его наличие в том или ином объекте и, в лучшем случае, оценить его величину. И только лишь в некоторых случаях (Солнечные пятна, магнитные

СР-звезды, магнитные белые карлики) поля измеряются очень надежно, результаты измерений практически модельно независимы. В указанных случаях появляется возможность детального изучения физики плазмы в условиях сильных космических магнитных полей.

Настоящая работа посвящена анализу результатов изучения магнитных полей химически пекулярных звезд. Это очень удобные объекты для исследований космического магнетизма: они обладают глобальными, общими полями большой интенсивности, достаточно яркие, что позволяет проводить детальные и высокоточные исследования их спектров на крупных телескопах. Это, в свою очередь, дает возможность выявлять различные закономерности в сложном процессе взаимодействия плазмы и магнитного поля.

Несмотря на более чем полувековую историю исследований, магнитные СР-звезды все еще остаются плохо понимаемыми объектами.

В первую очередь не решена до конца проблема происхождения их крупномасштабных полей. Теоретиками предложены различные варианты. Наиболее разработанными являются две конкурирующие гипотезы: 1) магнитное поле реликтовое, оно образовалось вместе со звездой, 2) в конвективном ядре СР-звезд работает механизм динамо, сгенерированное там поле выносится на поверхность и становится наблюдаемым. В настоящее время сторонников реликтовой теории среди исследователей больше. Но принять ее в качестве единственной невозможно из-за большого числа несоответствий

<sup>1</sup>E-mail: roman@sao.ru

с данными наблюдений. Впрочем, у теории динамо таких несоответствий еще больше.

Вторая важная нерешенная проблема — протекание физических процессов в атмосферах магнитных СР-звезд, причины возникновения неоднородностей химического состава и аномалий в распределении энергии в континууме, имеет ли место предсказанный теоретиками [3] процесс магнитной диффузии, наконец — чем отличаются в целом магнитные и немагнитные звезды Главной последовательности.

Для выяснения картины образования магнитных полей СР-звезд и их дальнейшей эволюции необходимо провести наблюдательную проверку следствий работы альтернативных механизмов (реликтового или динамо в ядре) путем сравнения результатов измерений магнитных полей большого количества СР-звезд, имеющих разные массы, температуры, скорости вращения и пространственное распределение в Галактике.

Для решения второй задачи нужно выполнять очень трудоемкий и тонкий спектрополяриметрический анализ СР-звезд, используя наблюдательный материал, полученный с максимально возможным спектральным разрешением и отношением Сигнал/Шум, а также современные модели атмосфер.

## 2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

С развитием технических средств менялись и совершенствовались методы диагностики магнитных полей (подробнее об этом в [1]). В связи с этим возникает проблема сопоставимости результатов измерений, полученных в разное время. Нередки случаи, когда одинаковыми терминами обозначаются величины, характеризующие разные параметры магнитного поля звезды и их сравнение невозможно. Необходимость использования единой терминологии представляется очевидной.

Первооткрыватель звездного магнетизма Бэбкок в качестве параметра, количественно характеризующего интенсивность (величину) поля, в работе [4] избрал “эффективное магнитное поле  $B_e$ ”, которое составляет примерно  $0.3B_p$  (величина поля на полюсе магнитного диполя).

На самом деле “эффективное поле” — это усредненный по видимой поверхности звезды продольный компонент вектора магнитного поля. В настоящее время термин “эффективное поле” встречается реже, чаще используется термин “продольное поле  $B_l$ ”, но старое обозначение  $B_e$  все еще применяется.

Престон [5] ввел понятие “поверхностное поле  $B_s$ ” — как “усредненный по всей видимой поверхности модуль вектора магнитного поля”. Практически эту величину можно определить только

по расщеплению (хотя-бы частично) зеemanовских компонент спектральных линий. Типичным является случай: “ $B_s$  примерно равно  $3B_e$ ”.

В ряде работ Матис предложил свою классификацию, выражаемую через моменты поля. Широкого распространения она не получила из-за сложностей в терминологии и описании способов получения той или другой величины. Тем не менее, на наш взгляд, система Матиса заслуживает внимания, так как в ней с единых позиций рассматриваются разные аспекты распределения параметров Стокса в спектральных линиях магнитных звезд. В настоящей работе в целом мы будем следовать определениям, принятым в обзоре Матиса [6]. Однако считаем необходимым внести некоторые дополнения и разъяснения.

### 2.1. Среднее продольное магнитное поле $B_e$

Среднее продольное магнитное поле  $B_e$  — это усредненный по видимой звездной полусфере компонент магнитного вектора вдоль луча зрения. Он определяется по измерениям сдвигов линий в спектрах с левой и правой циркулярными поляризациями. Впервые такие измерения выполнил Бэбкок в 1947 г. для звезды 78 Девы. Он назвал эту величину “эффективным магнитным полем”. Наиболее часто употребляемое современное название — продольное поле  $B_e$  (или  $B_l$ ).

Практически все сведения о магнитных полях СР-звезд получены по измерениям  $B_e$ . В каталоге магнитных СР-звезд [7] имеется 355 объектов с измеренной продольной компонентой, из них лишь для 50 наблюдались расщепленные зеemanовские компоненты, позволяющие определить поверхностное поле  $B_s$ .

Результат несколько различается в зависимости от того, каким способом проводятся определения: 1) по измерениям сдвигов центров тяжести линий в спектрах с ортогональными поляризациями (так называемый “фотографический способ”, но он применяется и к спектрам, полученным с ПЗС-матрицами) или 2) по измерениям круговой поляризации (точнее,  $V$ -параметра Стокса) в крыльях спектральных линий (водорода или металлов) при помощи фотоэлектрических магнитометров (в прошлом) или на ПЗС-матрицах (современные многолинейные методы, так называемый “LSD-способ”).

Большинство наблюдательных данных о магнитных полях СР-звезд “фотографическим способом” получено Г.Бэбкоком и Дж. Престоном, работавшими на крупнейших телескопах США, Г. Матисом, наблюдающим на 3.6м и 8.2м телескопах ESO в Чили, а также группой в CAO РАН, ведущей исследования на 6м телескопе.

При измерениях вторым способом необходимо полученный  $V$ -параметр Стокса перевести в величины зеемановского сдвига. Для этого используются различные калибровки. В случае симметричных одиночных линий проблем не возникает. Однако при использовании “LSD-способа” возникают трудности с привязкой к данным, полученным “фотографическим способом”. Ниже, в соответствующем разделе, эта проблема будет обсуждена более подробно.

Хотя результаты, полученные разными авторами, могут обладать систематическими погрешностями, но в целом международная система магнитных измерений является хорошо отлаженной. В частности, полученные “фотографическим методом” величины  $B_e$  в разное время, на разных обсерваториях и с помощью светоприемников различных типов хорошо согласуются. Это позволяет исследовать долговременную переменность продольного поля магнитных звезд на временах годы-десятилетия. Подробно исследуется данная проблема в работе [8].

Основные результаты по измерениям круговой поляризации ( $V$ -параметра Стокса) получены на фотоэлектрических магнитометрах низкого разрешения: 1) в Канаде (разработан Дж.Ландстритом) — по нашей оценке 80% и 2) в САО РАН (разработан В.Г.Штолем) — порядка 15%. Данные указанных двух групп очень хорошо согласуются между собой. Остальные 5% результатов получены на фотоэлектрических магнитометрах высокого разрешения по линиям металлов (подробнее об этом в работе [1]).

Исследования одних и тех же звезд в различных фазах периода вращения показали, что наблюдаются различия между водородной и “фотографической” кривыми  $B_e$ : как правило, водородные ближе к синусоидальным. Это связано, по-видимому, с равномерным распределением водорода по поверхности CP-звезды.

К концу XX века наблюдения на водородных магнитометрах закончились, их повсеместно заменили ПЗС-матрицы. Классические зеемановские измерения выполнялись на них первое время только по линиям металлов. Практика показывает, что относительная точность измерений  $V$ -параметра Стокса может быть намного выше по сравнению с точностью измерений зеемановских сдвигов линий. Это связано с дискретностью структуры ПЗС-матрицы.

Практика показала, что можно существенно повысить точность измерений магнитного поля суммируя  $V$ -параметры Стокса от многих линий. Хотя при переходе от величин поляризации к магнитным полям могут возникнуть проблемы с калибровками

и полученные результаты могут не совпасть с измеренными классическим способом, но для обнаружения магнитных полей в звездах мультилинейный метод оказывается очень эффективным.

В конце девяностых вступил в строй поляриметр для эшелювого спектрографа MUSICOS [9]. Для поиска слабых магнитных полей был реализован мультилинейный режим измерений  $V$ -параметра Стокса. Его величина путем сложных калибровочных зависимостей может быть переведена в величину продольной компоненты магнитного поля  $B_e$ .

На этом приборе проведена большая и очень высокоточная (ошибки — десятки Гс) серия наблюдений известных ранее магнитных звезд [10]. Было продемонстрировано хорошее согласие с ранее полученными данными (подробности в работе [8]).

На 8м телескопе VLT для спектрографа FORS-1 была внедрена поляризационная мода [11]. Прибор работает с разрешением  $R=2000$ . Методом LSD суммируется  $V$ -параметр Стокса от многих линий. Если с линиями водорода более-менее все в порядке, то для обнаружения сигнала поля от узких линий металлов при таком низком разрешении, когда элемент разрешения больше ширины линии, приходится применять сложные процедуры калибровки, которые, на наш взгляд, не могут обеспечить хорошее восстановление истинного сигнала от поля. Поэтому это замечательный прибор для поисковых работ, но при детальном исследовании его применять надо чрезвычайно осторожно.

Заключая этот параграф, отметим, что измерения магнитных полей в 90% случаев — это есть измерения продольного поля  $B_e$ . Величины  $B_e$  интерпретируются однозначно, практически не требуется привлечение каких-либо дополнительных моделей. Несколько более сложная ситуация с фотоэлектрическими измерениями по линиям металлов: результат зависит от того, какой метод (интегральный или дифференциальный, см [1]) использовался. Интегральный давал более близкие к “фотографическим” результаты.

Стандартная точность определения  $B_e$  составляет примерно 100–200 Гс, но для широких и сложных профилей она существенно ухудшается. А применение специальных ухищрений (мультилинейные методы, LSD, быстрая модуляция) улучшает ее до 10 Гс и лучше.

## 2.2. Кроссовер–эффект

Кроссовер–эффект — это момент первого порядка в плоскости, определяемой осью вращения звезды и лучом зрения. Получается из измерений моментов второго порядка профиля  $V$ -параметра Стокса (который соответствует разнице в ширине

линий в противоположных циркулярных поляризациях). Кроссовер наблюдается не всегда, а только в случае, когда имеется сильный поперечный компонент магнитного поля. Его величина в какой-то мере характеризует поле звезды, но без измерений продольной компоненты особой пользы не имеет.

Количественно описал кроссовер Матис, и практически только им эта величина и измеряется [12, 13]. Для интерпретации нужно применять моделирование. Достаточную точность можно получить в случае, если различия в ширине профилей, полученных в разных поляризациях, составляют не менее 10% от ширины измеряемой линии. Т.е. на практике можно обнаружить поля только более 1 кГс.

### 2.3. Средний модуль поверхностного магнитного поля $B_s$

Это усредненный по видимой поверхности звезды модуль магнитного вектора. Определяется по измерениям расщепления по длине волны разрешенных зеемановских компонент. Впервые измерил Престон [5].  $B_s$  можно определить только для звезд с сильными полями и узкими линиями, где зеемановское расщепление линий уверенно измеряется. Предел обнаружения  $B_s$  — примерно 2 кГс при использовании максимально возможного в настоящее время спектрального разрешения.

В работе [13] приведены сведения о среднем модуле магнитного поля  $B_s$  около 50 объектов. 17 СР-звезд с линиями, расщепленными на зеемановские компоненты, найдены авторами исследования [14]. К настоящему моменту величина  $B_s$  определена примерно для 80-ти магнитных СР-звезд.

Совместное использование величин  $B_e$  и  $B_s$  позволяет строить более реалистичные модели магнитного поля СР-звезд. В простейшем случае центрального диполя величина  $B_s$  на магнитных полюсах должна быть в два раза больше, чем на магнитном экваторе. Однако оказалось, что простые модели с центральным дипольным полем не всегда могут одновременно удовлетворить наблюдениям  $B_e$  и  $B_s$ . Например, часто нарушаются фазовые соотношения между этими величинами, даже если обе кривые синусоидальны. Еще одна отличительная особенность — в случае простого поля должна быть кривая изменения  $B_s$  с двойной волной в течение периода вращения в случае, когда кривая  $B_e$  меняет знак, но очень часто наблюдения дают одну волну. Таким образом, имеются весоные указания на необходимость построения более сложных, чем простой диполь моделей магнитного поля.

### 2.4. Среднее квадратическое магнитное поле

Среднее квадратическое магнитное поле представляет собой квадратный корень из суммы усредненного по звездному диску квадрата модуля магнитного вектора и квадрата модуля его компонента по лучу зрения, т.е. это корень квадратный из суммы квадратов  $B_e$  и  $B_s$ . Определяется по измерениям момента второго порядка профилей  $I$ -параметра Стокса (что характеризует ширины линий в неполяризованном свете).

Практическая польза от измерений этой величины состоит в том, что ее можно определить для большого количества звезд в наблюдениях, полученных без анализатора круговой поляризации. Требуется тщательный учет инструментального профиля, исключения бленд и других мешающих факторов. На практике эта величина измеряется только Матисом [6, 12, 13]. Полученные им значения для известных магнитных звезд свидетельствуют о работоспособности метода, но количественное сравнение с другими авторами невозможно. Физический смысл этой величины нечеткий.

### 2.5. Поля, получаемые по измерениям линейной поляризации в широких полосах

Широкополосная линейная поляризация ( $Q$  и  $U$ -параметры Стокса) есть результат различного магнитного насыщения  $\pi$  и  $\sigma$ -компонент спектральных линий. Некоторые заключения о магнитных полях можно сделать из рассмотрения изменений линейной поляризации в плоскости  $Q$ ,  $U$  на протяжении периода вращения звезды. По сути, здесь измерения самой величины поля не происходит, можно доказать лишь, что магнитный вектор вращается. Предложил и реализовал метод Леруа [15]. Широкополосная линейная поляризация очень полезна для построения магнитных моделей, однако не может быть признана методом измерений поля (хорошо чувствуется угол, но не модуль вектора).

Точность измерений близких звезд с нулевой межзвездной линейной поляризацией ограничена величиной порядка 0.005% из-за инструментальной поляризации, которую невозможно учесть с большей точностью. Куда большие помехи вносит межзвездная или околозвездная поляризация: если она имеет величину больше нескольких десятых долей процента, исследования методом Леруа становятся невозможными.

## 3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СР-ЗВЕЗД

Тот факт, что эффект Зеемана наблюдается одновременно во всех спектральных линиях, указывает на то, что магнитные поля Ар/Вр звезд имеют

глобальную структуру и высокую степень упорядоченности на больших масштабах. Действительно, если поля пятнисты, как у Солнца, усредненная по диску циркулярная поляризация была бы значительно меньше наблюдаемой, так как продольные поля с противоположной ориентацией взаимно уничтожаются.

Магнитные поля покрывают всю поверхность звезды и распределение поля по величине на поверхности достаточно однородно. Доказательством этому служат следующие факты: 1) магнитные поля наблюдаются во всех фазах периода вращения, 2) в звездах с полностью расщепленными спектральными линиями между ними достигается континуум, 3) расщепленные компоненты достаточно узкие.

### 3.1. Каталоги магнитных CP-звезд

Подробные сведения о магнитных полях CP-звезд можно найти в каталогах.

Первый каталог магнитных звезд был опубликован Бэбкоком [4] в 1958 г., в нем содержались результаты его собственных измерений магнитных полей около 400 звезд с зеемановским анализатором на обсерваториях Маунт Паломар и Маунт Вилсон. Продольные компоненты поля  $B_e$ , превышающие ошибки измерений, были обнаружены у 89 Ар- и Вр- звезд. Впоследствии у некоторых из этих объектов наличие магнитного поля подтверждено не было.

Диделон [16] собрал компилятивный каталог магнитных измерений. В нем помещены данные о всех измерениях звездных магнитных полей (755 звезд), которые были опубликованы в литературе в период 1958–1981 г. Среди других, в каталоге насчитывается примерно 150 CP-звезд с надежно измеренными магнитными полями. В течение почти 20 лет он был основным источником данных о звездных магнитных полях, которые широко использовались в различных статистических работах.

В 2000 г. был опубликован наш каталог [17], содержащий сведения о 210 магнитных CP-звездах. В нем помещены данные, как полученные на 6м телескопе (не всегда полно отраженные в англоязычной литературе), так и взятые из литературных источников.

В последние 10 лет было получено очень много новых данных о магнитных полях CP-звезд. Почти все новые магнитные звезды были обнаружены с помощью 6-м телескопа САО РАН (на северном небе) и 8-м телескопа VLT ESO (на южном небе).

Поэтому возникла необходимость в создании нового каталога. По нашим собственным и литературным данным был составлен новый каталог магнитных CP-звезд [7], содержащий 326 объектов с достоверно обнаруженными магнитными полями

и 29 — с большой степенью вероятности имеющих магнитное поле. Анализ каталога показал, что количество магнитных CP-звезд убывает с увеличением поля по экспоненциальному закону, звезды, у которых  $B_e$  превышает 5 кГс встречаются редко (около 3% объектов нашего списка).

Отметим также, что в 2003 г. Бычковым и др. [18] опубликован общий каталог магнитных измерений, содержащий сведения как о магнитных и немагнитных CP-звездах, так и о других звездах Главной последовательности и гигантах. Общее количество объектов в нем превышает 500, примерно для половины CP-звезд магнитное поле не обнаружено.

Они же [19] представили каталог кривых переменности продольных магнитных полей с фазой периода вращения для 127 Ар и Вр-звезд. Кривые  $B_e$  проведены методом наименьших квадратов, для некоторых звезд были уточнены периоды вращения.

Новая версия каталога магнитных измерений опубликована в [20] Бычковым и др. В нем содержатся сведения об измерениях магнитных полей 1212 звезд: объектов ГП разных типов, в том числе 610 химически пекулярных звезд, гигантов и белых карликов.

Подводя итоги отметим, что на 6м телескопе САО РАН получено более 1/3 всех данных о магнитных полях химически пекулярных звезд.

В следующем разделе мы считаем целесообразным подвести основные итоги работ нескольких ведущих групп исследователей, проводивших измерения магнитных полей, начиная с момента их открытия.

### 3.2. Развитие исследований магнитных полей CP-звезд в 50–60 гг. 20 века: обнаружение 120 магнитных звезд и модель наклонного ротатора

Первооткрыватель Г. Бэбкок, работавший в основном на 5м Паломарском телескопе, был единственным исследователем звездного магнетизма на протяжении более 15 лет — до 1963 г. Второй зеемановский анализатор был установлен на 3м телескопе Ликской обсерватории. Основными наблюдателями на нем стали Дж. Престон и его коллеги: С. Вольф, Д. Пайпер и К. Степиен. Заметим, что в то время существовал единственный метод регистрации — фотографический. Лишь в самом конце рассматриваемого периода началась разработка фотоэлектрического магнитометра в Крымской обсерватории под руководством А. Б. Северного.

### 3.2.1. Работы Г. Бэбкока

Широко известно, что магнитные звезды были открыты Г. Бэбкоком в 1947 г.

Попытки обнаружить магнитное поле предпринимались ранее неоднократно (подробно они описаны в работе [1]), но лишь после того, как Бэбкок разработал свой знаменитый дифференциальный анализатор круговой поляризации и провел с ним первые наблюдения в фокусе куде крупнейшего тогда в мире нового (только-что введенного в эксплуатацию) 5м Паломарского телескопа, звездные магнитные поля были открыты. После обнаружения Дж. Хэлом магнитных полей солнечных пятен в 1908 г. открытие Бэбкока было вторым значительным событием в астрофизике, положившим начало новой науке — космической электродинамике!

После опубликования каталога Бэбкок практически завершил свою работу в области магнитных исследований, хотя один яркий всплеск после этого имел место. В 1960 г. он [21] обнаружил звезду HD 215441 с расщепленными зеемановскими компонентами, указывающими на магнитное поле 35 кГс на ее поверхности. Она была рекордсменом по величине поля вплоть до конца 90-тых, когда нами было доказано существование более сильного поля  $B_s$  (70 кГс) у горячей гелиевой звезды HD 37776 [22].

Почти все обнаруженные Бэбкоком магнитные поля были подтверждены в последующих наблюдениях, за исключением нескольких Am- и ртутно-марганцевых звезд. Имели место случаи, например, со звездой 21 Peg, когда Бэбкок нашел у нее магнитное поле [4], через 10–15 лет с той же фотографической методикой поле не обнаружили [23], но еще через 20 лет при применении более совершенной методики правота Бэбкока была доказана [24].

Главная цель Бэбкока состояла в обнаружении как можно большего количества магнитных звезд. Эта задача требовала очень больших затрат наблюдательного времени, поэтому он не мог тщательно изучать каждую из них. Тем не менее, несколько десятков объектов он изучил достаточно подробно. Для некоторых звезд (таких как  $\alpha^2$  CVn) он нашел строго периодическое изменение продольного магнитного поля (и назвал их звездами типа  $\alpha$ ), для других переменность  $B_e$  была обнаружена, но данных для определения периода не хватило (в такие звезды у него была включена  $\beta$  CrB). Он считал их вариации иррегулярными и назвал звездами типа  $\beta$ . И, наконец, третий тип — магнитные звезды типа  $\gamma$  (по типу звезды  $\gamma$  Equ), поле у которых не менялось. Теперь мы знаем, что эта классификация ошибочна, все магнитные звезды показывают периодическую переменность

продольного поля  $B_e$ . В частности, период вращения  $\gamma$  Equ 75 лет, поэтому Бэбкок не мог найти вариации.

В результате исследований Бэбкока стало ясно: магнитные поля в звездах существуют, они сильны (вплоть до десятков кГс); в СР-звездах охватывают всю их поверхность и имеют глобальную структуру. Все магнитные звезды имеют аномалии в интенсивности линий, особенно сильные среди редких земель.

### 3.2.2. Работы Дж. Престона и его группы

Престон работал в области исследования магнитных звезд около 10 лет с 1963 по 1972 г. в разных обсерваториях США (в основном в Ликской). Он вместе со своими коллегами сосредоточил усилия на детальном изучении уже открытых ранее Бэбкоком магнитных звезд. Ниже приведем краткий обзор основных результатов, полученных группой Престона.

Для звезд: 73 Dra [25], 53 Cam [26], HD 10783 [27],  $\beta$  CrB [28], 78 Vir [29], HD 188041 [30] и др., было обнаружено, что линии всех металлов синхронно меняются с изменениями  $B_e$ . При этом для  $\beta$  CrB [28] линии нейтральных элементов и ионов дают хорошо согласующиеся между собой значения  $B_e$ , для других звезд совпадение не столь хорошее.

Одновременно с магнитными измерениями проводилась фотометрия. Например, в работе [31] измерены магнитное поле и  $UBV$  величины звезды HD 32633. Анализ всех полученных результатов привел к следующим выводам: 1) изменения блеска во всех полосах являются синхронными; 2) их амплитуда уменьшается с ростом длины волны; 3) есть указания на асимметрию кривых поля и блеска; 4) колебания блеска происходят в противофазе с изменениями  $B_e$ . Вышеперечисленные результаты явились надежным доказательством того, что переменность магнитного поля можно объяснить моделью наклонного ротатора с дипольным полем, ось которого наклонена к оси вращения.

Эта модель была подтверждена и для случая очень медленной переменности кривой продольного поля  $B_e$ . Например, в [32] определили, что у звезды HD 9996 интенсивности линий, величины  $V$  и  $B-V$ , а также магнитное поле  $B_e$  меняются синхронно с периодом 22–24 года, причем изменения с фазой происходят как у магнитных звезд более коротких периодов. Таким образом, гипотезы о магнитных циклах, типа 11-летнего солнечного, для этого случая были опровергнуты.

Важным шагом в развитии представлений о магнитных полях СР-звезд стала систематическая работа по поиску и исследованиям звезд с расщепленными зеемановскими компонентами среди объектов с малым значением  $v \sin i$ . Престон [33]

привел доказательства присутствия магнитного поля величиной 15 кГс в атмосфере магнитной звезды 53 Cam. Оно проявляется в частично разрешаемых зеемановских компонентах линий, которые позволяют изучать изменения  $B_s$  со временем.

Он же [5] нашел, что поверхностное поле  $B_s$  медленно вращающейся звезды HD 126515 меняется в пределах от 10 до 17 кГс, а эффективное  $B_e$  с тем же периодом 130 суток между  $-2$  и  $+2$  кГс. Если предположить модель наклонного ротатора, то для нее поле не может быть центрально-дипольным. Необходимо было вносить асимметрию. Расчеты Престона показали, что наилучшее представление дает модель диполя, смещенного относительно центра звезды на 0.36 радиуса в направлении, противоположном магнитному моменту. Наблюдается усиление интенсивности линий тяжелых элементов в момент максимума  $B_s$ , указывающее на концентрацию этих элементов в области более сильного полюса.

Подводя итог своим работам, Престон [35] дал обзор поверхностных характеристик магнитных Ар-звезд с точки зрения модели наклонного ротатора. Отмечено резкое различие между группами HgMn и SiSrEu звезд. Наилучшее объяснение наблюдаемых изменений  $B_e$  и  $B_s$  дает модель нецентрального диполя. Независимо от принятой геометрии из наблюдений следует, что мелкошабные магнитные поля вряд ли существуют на поверхности CP-звезд. Наблюдаемое распределение ориентаций магнитных осей имеет два максимума — в области  $\beta = 80^\circ$  и  $\beta = 20^\circ$ , где  $\beta$  — угол между магнитной осью и осью вращения.

В конце 60-х годов были предприняты первые попытки построить карты распределения пятен химических элементов и магнитного поля с использованием анализа профилей спектральных линий. Это сделали сотрудники Престона.

Пайпер [36] детально изучила спектр самой яркой магнитной звезды  $\alpha^2$  CVn по зеемановским спектрам. Измерены лучевые скорости, интенсивности линий и проведены  $UBV$  наблюдения в течение магнитного цикла. По характеру наблюдающихся изменений линии в спектре были разделены на три группы: 1) редкие земли, 2) группа Fe, 3) Mg, Si, Ca. Для объяснения поведения групп 1 и 2 построена модель магнитного поля, представляющего комбинацию поля диполя, ось которого наклонена на  $50^\circ$  к оси вращения звезды, и квадруполя.

Редкие земли концентрируются у полюсов, а элементы второй группы распределены вдоль магнитного экватора с четырьмя максимумами. Поведение элементов группы 3 можно согласовать с этой моделью, если допустить, что они распределены подобно группе 2. В рамках предложенной модели, однако, не объясняются изменения блеска и цвета.

Фундаментальная работа [36] послужила образцом для последующих исследований. В частности, в [37] построили более детальную картину распределения элементов по поверхности  $\alpha^2$  CVn.

Подытоживая, можно сделать заключение, что к концу шестидесятых годов уже в основном сложилась существующая до сих пор модель магнитной CP-звезды: это химически пятнистый ротатор с дипольным полем, все наблюдаемые изменения — это результат изменения видимой наблюдателем геометрии поля, возникающие из-за ее вращения. К концу обсуждаемого периода было обнаружено около 120 магнитных звезд.

### *3.3. Основные результаты наблюдений 70–80 гг. 20 века: гелиевые звезды, картирование поверхности и моделирование поля, эволюция магнитных звезд*

В семидесятые годы были реализованы фотоэлектрические методы измерений звездных магнитных полей, что сразу привело к успеху: были обнаружены мегагаусные поля у магнитных белых карликов, а среди звезд ГП открыт новый класс магнитных объектов — звезды с аномальными линиями гелия.

В восьмидесятые годы на смену фотопластинкам в зеемановской спектроскопии пришли цифровые светоприемники. Это позволило существенно повысить точность измерений и изучать профили спектральных линий вместо используемых ранее интегральных параметров (таких как эквивалентные ширины, например). Появились первые модели атмосфер, использующие информацию о профилях линий, начали рассчитываться синтетические спектры синтетические спектры.

В результате были разработаны методы картирования распределения химических элементов по поверхности магнитных CP-звезд с одной стороны, а с другой — обнаружены сложные магнитные поля у звезд солнечного типа и более холодных. И третье наблюдательное направление, развиваемое в рассматриваемый период, — исследование свойств магнитных звезд, членов различных рассеянных скоплений, что позволило ставить задачи об эволюции магнитных полей.

Крупным успехом теории стала разработка механизмов диффузии в присутствии магнитного поля, позволяющая в принципе объяснять наблюдения.

#### *3.3.1. Основные результаты фотографических наблюдений*

В начале 70-х годов Дж. Престон завершил свою деятельность в области магнитных измерений. Но исследования были продолжены как в Ликской,

так и в других обсерваториях, в частности, на Гавайском 2.24-м телескопе.

В Ликской обсерватории наблюдения продолжил Ван-ден Хэйвел, а на Гавайях — Вольф и Бонсак. Например, в Ликской обсерватории обнаружили три новых магнитных звезды: 49 Cam, HR 3082, HD 137949 [38]. Вальтер Бонсак знаменит тем, что не верил в модель наклонного ротатора и до конца своей активной деятельности собирал сведения против нее (см., например, [39, 40]).

Вольф и Бонсак [41] получили зеэмановские спектрограммы магнитных звезд 73 Dra,  $\beta$  CrB, 78 Vir при помощи новых анализаторов круговой поляризации. Измеренные величины полей сравнивались с соответствующими величинами, полученными на Ликской обсерватории Престоном. Оказалось, что между двумя рядами измерений нет существенного систематического различия. Для звезд  $\beta$  CrB и 73 Dra полученные результаты не подтвердили предполагаемых вековых изменений амплитуды магнитной кривой.

Отметим еще одну работу, основанную на данных, полученных на Гавайском телескопе [42]. В ней исследованы магнитные, спектральные и фотометрические изменения 49 Cam. Обнаружено периодическое изменение магнитного поля в пределах от  $-1.7$  кГс до  $+1.7$  кГс с периодом 4.285 дня. С тем же периодом происходит синфазное изменение линий Fe, Cr и редкоземельных элементов. Кривые блеска  $B$  и  $V$  представляют собой двойную волну, минимумы которой совпадают с магнитными экстремумами.

Магнитное поле, определенное по линиям Fe и Cr, систематически на 0.38 кГс больше определенного по линиям Eu и Gd. Все наблюдательные данные согласуются со следующей моделью наклонного ротатора:  $v \sin i = 22 \pm 3$  км/с,  $v_e = 32$  км/с,  $i = 43^\circ \pm 7^\circ$ . Магнитное поле имеет дипольную структуру с осью, лежащей почти в экваториальной плоскости вращения.

Отметим, что до начала работы 6м телескопа САО, практически все магнитные измерения выполнялись на крупнейших телескопах США. Редкое исключение — зеэмановский анализатор был изготовлен для 2м телескопа в обсерватории Таунтенбург (в ГДР) в начале семидесятых. Известны работы Г.Шольца и Э.Герта по изучению долгопериодических вариаций характеристик магнитных звезд [43–45].

С 1977 г. начались регулярные наблюдения магнитных полей звезд на 6м телескопе на Северном Кавказе [46]. Нашим исследованиям мы посвятим отдельный раздел в конце этого параграфа. Здесь только укажем на основные работы группы Ю. В. Глаголевского, полученные с зеэмановским анализатором на фотопластинках [24, 46–52].

В семидесятые годы возник новый, фотоэлектрический, метод измерений магнитных полей и основные новые результаты были получены с помощью фотоэлектрических магнитометров. Однако фотографическая методика оказалась незаменимой при детальном исследовании химического состава и магнитного поля отдельных звезд с попыткой построения их моделей. Вначале модели были полуэмпирическими, но уже в восьмидесятые годы были разработаны мощные методы доплеровского картирования (в частности, В. Л. Хохловой и ее учениками [53, 54]).

Среди работ по детальным измерениям магнитных полей СР-звезд, выполненных в семидесятые годы, наибольшую известность получили две.

Хахра [55] измерил продольное и поверхностное магнитные поля 53 Cam и их изменение в течение периода вращения и построил для нее модель наклонного ротатора со смещенным диполем. Параметры модели: смещение диполя  $\alpha = 0.145$  радиуса, наклон оси диполя к оси вращения  $\beta = 80^\circ$ , наклон оси вращения к лучу зрения  $i = 50^\circ$ , поле на более сильном полюсе  $B_p = 28.4$  кГс. Приведенная модель хорошо воспроизводит кривую  $B_s$ , но плохо —  $B_e$ . Более ранняя модель Ландстрита (с другими параметрами) лучше согласуется с  $B_e$ , но не удовлетворяет кривой  $B_s$ . Для лучшего согласия пришлось предположить, что магнитные поля около более слабого магнитного полюса более отвесны к поверхности, чем поле диполя.

Адельман [56] исследовал зеэмановские спектрограммы знаменитой звезды Бэбкока HD 215441 с поверхностным полем  $B_s = 34$  кГс. Впервые было проведено детальное отождествление линий в спектре, определена ее принадлежность к кремниевому типу. По расщепленным компонентам было определено  $B_s$ , согласующееся с результатом Бэбкока [21]. При этом величина поля не зависит ни от потенциала, ни от стадии ионизации, ни от элемента. Это указывает на его постоянство по глубине слоя, в котором образуются линии.

Вернемся к результатам, полученным на 6м телескопе.

Нами были впервые обнаружены новые магнитные звезды с использованием данных женеvской фотометрической системы [47, 49]. Звезды-кандидаты брались из списка [57]. Мы нашли корреляцию между предсказанным по женеvской фотометрии и реально измеренным магнитным полем. Было продемонстрировано, что данные женеvской фотометрической системы можно эффективно использовать для поисков новых магнитных звезд, однако заменять измерения зеэмановских спектров косвенными фотометрическими оценками, основанными на эмпирической зависимости, не следует.

К началу восьмидесятых годов было известно, что все магнитные А и В-звезды имеют химические пекулярности, но обратное утверждение не было справедливым, так как имелись несколько объектов с сильными аномалиями в спектрах, но без видимых признаков магнитного поля. Наши детальные исследования трех таких звезд:  $\epsilon$  UMa [58], HD 119213 [48], 21 Peg [24], показали, что они все являются магнитными. Это выяснилось после того, как мы смогли обеспечить достаточную для этих объектов точность наблюдений. Был сделан вывод, что, по-видимому, все Ap/Vr звезды с сильными аномалиями являются магнитными. Вопрос заключается только в величине поля и точности измерений.

В работах [51, 52, 59] изучено магнитное поле двух CP-звезд на предмет поиска его радиального градиента. Найдено уменьшение поля с высотой в атмосфере  $\alpha^2$  CVn. Для другой звезды  $\beta$  CrV такой эффект незаметен. Измерения поля по линиям разных элементов показали, что имеют место существенные различия в фазовых кривых величины  $B_e$ , полученных по линиям образующимся на разной глубине в атмосфере звезды. В нашем исследовании получен значительно более достоверный результат, чем опубликованный ранее Вольф [60]: мы подтвердили его.

Магнитные звезды в скоплениях разного возраста исследованы в работе [61]. Авторы показали, что магнитные поля  $B_e$  CP-звезд в старых и молодых скоплениях не различаются, т.е. нет признаков диссипации или генерации магнитного поля во время жизни химически пекулярной звезды на ГП.

Подводя итоги этому разделу, отметим, что к концу восьмидесятых годов фотографическая эра в астрономии (по крайней мере на больших телескопах) закончилась, одноканальные фотоэлектрические и многоканальные ПЗС-матрицы, а также и другие цифровые приборы все больше внедрялись в наблюдения.

В обозреваемый период были обнаружены магнитные поля у многих CP-звезд, оказалось, что они охватывают всю их поверхность, магнитная переменность есть следствие вращения звезды — наклонного ротатора. Предпринимались первые попытки построить карты распределения химических элементов и магнитного поля для отдельных объектов [53, 62, 63]. Но методы доплер-зеemanовского картирования были востребованы по настоящему лишь после внедрения цифровых методов регистрации в спектроскопию звезд.

### 3.3.2. Основные результаты фотоэлектрических наблюдений

В конце шестидесятых годов XX века А. Б. Северным в Крымской обсерватории [64] и

Дж. Ландстритом [65] в Канаде были разработаны и изготовлены одноканальные фотоэлектрические магнитометры для измерений круговой поляризации в крыльях спектральных линий с использованием методов синхронно-фазового детектирования (модуляции при помощи электрооптического кристалла). В семидесятые годы фотоэлектрический магнитометр с интерферометром Фабри-Перо был построен и для 6м телескопа [66].

В КрАО достигли рекордных точностей измерений и получили данные о существовании магнитных полей у ряда ярких звезд (таких, как Сириус и Вега). Результаты наблюдений просуммированы в работе [67]. Но в середине семидесятых активность крымской группы в области исследований магнитных полей резко снизилась.

Значительно более успешной оказалась работа канадской группы во главе с Дж. Ландстритом на бальмеровском поляриметре и магнитометре высокого разрешения, работающего по линиям металлов. Ими обнаружены магнитные поля у звезд с аномальными линиями гелия и сверхсильные поля у магнитных белых карликов. Рассмотрим подробнее некоторые результаты их зеemanовской поляриметрии.

В работе [68] для изучения распределения магнитного поля по поверхности были проведены фотоэлектрические поляризационные наблюдения с разрешением  $0.038 \text{ \AA}$  с использованием поляриметра с интерферометром Фабри-Перо. Поле было обнаружено только у  $\beta$  CrV, причем его величина, полученная по фотографическим и фотоэлектрическим наблюдениям, различалась. Проведено сравнение наблюдаемого профиля и круговой поляризации линии CrI  $4254 \text{ \AA}$  с теоретическими. Для других звезд,  $\alpha$  CMa,  $\alpha^2$  Lib и  $\iota$  CrV поле не обнаружено.

В [69] для поиска сильных магнитных полей ( $B_e > 1000 \text{ Гс}$ ) в быстро вращающихся Ap-звездах применена методика измерений круговой поляризации в крыльях водородных линий (в основном  $H_\beta$ ). Исследовались 16 звезд с  $v \sin i > 30 \text{ км/с}$  с интерференционными фильтрами с полосой пропускания от 1 до  $20 \text{ \AA}$ . Магнитные поля измерялись на шести обсерваториях с четырьмя разными поляриметрами. Было найдено, что за исключением  $\alpha^2$  CVn, результаты фотоэлектрических и спектроскопических измерений совпадают. Сделан вывод о том, что поля больше  $1000 \text{ Гс}$  встречаются главным образом среди медленно вращающихся звезд.

В [70] получены кривые изменения  $B_e$  для 53 Cam и  $\alpha^2$  CVn с фазой периода вращения. Новые кривые имеют почти синусоидальную форму и отличаются от ангармонических, полученных

фотографическим методом. Обе фотоэлектрические магнитные кривые хорошо согласуются с геометрией нецентрального диполя с умеренным смещением  $a < 0.2$  (в радиусах звезды).

В фундаментальной работе [71] представлены результаты обзора продольных магнитных полей  $B_e$  ярких Ар-звезд. Обнаружено, что все фотоэлектрические кривые  $B_e$  имеют форму более близкую к синусоиде, чем фотографические. Авторы нашли некоторые статистические доказательства более сильных поверхностных полей у медленных ротаторов по сравнению с быстрыми. Полученные данные подтвердили существование Ар-звезд с малыми углами наклона оси магнитного поля к оси вращения. Не обнаружено магнитных полей у нескольких Ам- и Hg-Mn звезд, включенных в программу наблюдений.

В работе [72] были исследованы магнитные поля He-wk звезд. Для 12 объектов найдено или подтверждено существование магнитных полей. Из них 9 принадлежат подгруппе кремниевых звезд или подгруппе SrTi Ar. Сделано заключение, что RGe Ар-звезды являются более горячими аналогами немагнитных HgMn Ар-звезд. По-видимому, среди звезд со слабыми линиями гелия, объектов с сильными магнитными полями (более 1 кГс) больше, чем среди Ар, но меньше, чем среди He-rich звезд.

Особо выделим пионерские работы группы Ландстрита по исследованиям магнитных полей звезд в скоплениях. Наблюдения проводились на водородном магнитометре, в основном изучались молодые скопления: Орион и Скорпион—Центавр.

В работе [73] приводятся результаты исследований магнитных полей для 13 Ар- и He-wk звезд, принадлежащих к ассоциации Орион OB1 ( $t < 5-10$  млн. лет). При сравнении оказалось, что в Орионе OB1 звезды имеют поля, в среднем в три раза превышающие поля, наблюдаемые в более старых звездах, что согласуется с гипотезой реликтового происхождения. Периоды вращения молодых звезд меньше, чем у более старых.

Позже в [74] на бальмеровском магнитографе были изучены магнитные поля звезд из скопления Скорпиона—Центавра. Было найдено, что горячие звезды имеют систематически большие поля, чем холодные. Проведены магнитные наблюдения выборки горячих нормальных или слегка пекулярных звезд, входящих в скопление. Ни у одной из них не обнаружено магнитного поля. Показано, что 28 старых звезд поля имеют такое же распределение магнитных полей по интенсивности, как и молодые звезды в Орионе и Скорпионе—Центавре. Но гелиевые звезды в этих ассоциациях имеют более сильные поля, чем более холодные звезды этих же ассоциаций. Вывод авторов — затухания поля во время жизни звезды на ГП нет.

Отметим еще одну фундаментальную работу Ландстрита по поиску магнитных полей у нормальных звезд [75]. Показано, что формула, по которой оценивается величина продольного поля, существенно не изменяется при неоднородном распределении поля по поверхности звезды, а также при учете инструментального расширения, хотя она справедлива только при малых скоростях вращения звезды. Показано, что для магнитных звезд измерения поля в крыльях линий водорода и FeII хорошо совпадают. Ни у одной из исследованных нормальных звезд поле не обнаружено.

В конце этого параграфа приведем некоторые важные результаты, полученные в обозреваемый период на фотоэлектрических магнитометрах БТА. Заметим, что на 6-м телескопе фотоэлектрические магнитометры реально заработали только в начале восьмидесятых.

На магнитометре с интерферометром Фабри—Перо были выполнены наблюдения нескольких ярких звезд с максимально возможной точностью. Например, в [76] проводился поиск магнитного поля ртутно—марганцевой звезды  $\alpha$  And. Суммированием измерений нескольких ночей получен рекордный по точности результат  $B_e = 33 \pm 19$  Гс. Таким образом, были опровергнуты имевшиеся ранее сведения о существовании килогауссных продольных полей у этой звезды — типичного представителя своего класса. Существование сильных магнитных полей у ртутно—марганцевых звезд не подтвердилось.

Были проведены высокоточные наблюдения ярких звезд (Веги, Арктура, Проциона и др.). Продольных полей более 10 Гс у этих объектов не было найдено.

Водородный магнитометр БТА был сконструирован, как спектрополяриметр [77], поэтому с его помощью (в отличие от бальмеровского магнитометра Ландстрита, в котором исследуемый спектральный диапазон вырезался с помощью интерференционного фильтра) можно было работать в любой спектральной области любой ширины и измерять 4 параметра Стокса. Наблюдения на нем выполнялись с 1980 по 1998 г. Выделим несколько основных результатов, полученных с помощью этого прибора.

Была получена хорошая синусоидальная кривая переменности продольной компоненты поля звезды с очень большой спектральной переменностью HD 119213 [78]. Эта звезда быстро вращается, профили линий в спектре сложные, уширенные вращением, поэтому полученная нами ранее фотографическая кривая  $B_e$  прописывалась очень плохо из-за большого рассеяния. Продольное поле, полученное по разным элементам, сильно различалось. И только новая “водородная” кривая  $B_e$  позволила построить магнитную модель HD 119213.

Впервые были проведены поиски магнитных полей у пекулярных звезд типа  $\lambda$  Boo [79, 80]. Магнитного поля, превышающего ошибки измерений, обнаружено не было. Несмотря на длительные ряды наблюдений, магнитное поле не было обнаружено также и у звезд с аномально сильными линиями Sr [81].

Кроме классических измерений магнитных полей по линиям водорода, на этом приборе выполнялись измерения 4-х параметров Стокса как в линиях, так и в континууме. Например, с его помощью измерялась круговая и линейная поляризация внутри депрессии в непрерывном спектре на  $5200 \text{ \AA}$  у ряда CP-звезд [82, 83]. У некоторых объектов была обнаружена слабая линейная поляризация в указанной депрессии, но корреляции между ее интенсивностью и величиной магнитного поля найдено не было.

Измерение 4-х параметров Стокса для известной звезды  $\Theta^1 Ori C$  [84] показало, что в некоторых фазах периода ее вращения определенно проявляются признаки магнитного поля. В то же время мы опровергли существование большой (несколько процентов) круговой поляризации континуума, найденной ранее [85] на спектрографе MUSICOS. В дальнейшем магнитные исследования этой звезды были продолжены, их результаты будут обсуждаться в следующих параграфах.

#### *3.4. Основные результаты наблюдений 90 гг. 20 века: поля сложной структуры, картирование, звезды с линиями, расщепленными на зеэмановские компоненты*

В южном полушарии с введением в строй крупных телескопов появились новые центры магнитных исследований. Наибольший вклад в развитие методов наблюдений и их анализа, а также по количеству полученных данных, внес Г. Матис, работающий в ESO на 3.6м, а в настоящее время и на 8.2м телескопах VLT. В девяностые годы им с соавторами были проведены большие серии наблюдений магнитных звезд. В качестве светоприемников использовались ПЗС-матрицы.

##### *3.4.1. Работы группы Г. Матиса*

Ниже отметим некоторые наиболее важные работы, выполненные в ESO в девяностые годы. В исследовании [86] рассмотрены результаты измерений продольной компоненты магнитного поля  $B_e$  большой выборки южных Ap-звезд. Большинство кривых  $B_e$  меняется синусоидально с фазой периода вращения. По мнению Матиса, это еще раз подтверждает, что ангармонизм кривых  $B_e$  вызван недостатками фотографической методики.

В работе [87] разработана методика поиска и найдено 6 новых звезд с расщепленными зеэмановскими компонентами. В дальнейшем Матис и его коллеги нашел поверхностные поля  $B_s$  у нескольких десятков звезд, что существенно улучшило наши возможности для построения магнитных моделей конкретных звезд. Однако в этой работе [87] приводятся и спорные суждения: например, отрицается наличие корреляции между Z-параметром женеvской системы и величиной поля на поверхности CP-звезды. Наши исследования, выполненные на 6м телескопе, не подтверждают их: используя данные женеvской фотометрии, мы нашли более 100 новых магнитных звезд [88].

В работах [89, 90] анализируются кроссовер-эффект и среднее квадратическое поле. Кроссовер-эффект был найден у 10 из 29 исследованных звезд [89]. У 8 из них была найдена асимметричная кривая изменений продольного поля с фазой периода вращения, асимметрия особенно заметна для звезд HD 147010 и HD 175362.

В работе [90] впервые исследуется среднее квадратическое поле (понятие введено автором). Как мы уже выше писали, это корень квадратный из суммы квадратов  $B_e$  и  $B_s$ . Проанализирована выборка из 29 CP-звезд. Нижний предел обнаружения — 5 кГс. Все звезды показали среднеквадратическое поле от предела обнаружения до 37 кГс у звезды HD 137509. Исследования в течение периода вращения показали, что максимум среднеквадратического поля, как правило, совпадает с максимумом  $B_e$ , отношение максимума к минимуму указанной величины всегда было меньше 1.7. Отметим, что кроме Матиса эту величину никто больше не определял. Физический смысл ее не вполне понятен, сравнение с результатами других измерений невозможно.

В работе [92] определен средний модуль  $B_s$  магнитного поля 16 новых магнитных звезд. Общее количество CP-звезд с измеренными величинами  $B_s$  было доведено до 42-х. Было найдено, что кривые изменения  $B_s$  с фазой периода вращения, как правило, ангармоничны и максимумы этой величины совпадают с максимумом  $B_e$  только в нескольких случаях. Авторы считают, что получили важное доказательство того, что в целом магнитные поля CP-звезд существенно отличаются от дипольных.

В работе [12] приведены новые измерения продольного поля, кроссовер-эффекта и среднего модуля поля со спектрографом CASPEC 3.6м телескопа ESO. В статье обсуждаются результаты 95 измерений 44 звезд. Главным результатом работы является то, что для звезды HD 137509 было найдено преимущественно квадрупольное магнитное поле. Впервые магнитные поля определены для 14 быстро осциллирующих (гоAp) звезд. Для

21 звезды с расщепленными зеемановскими компонентами проведены наблюдения в неполяризованном свете. 9 из этих объектов ранее не были известны как магнитные СР-звезды. Детальнее исследования магнитного поля HD 137509 проведены в работе [91]

По уширению спектральных линий были найдены магнитные поля  $B_s$  величиной порядка 2 кГс у нескольких металлических и ртутно-марганцевых звезд [93, 94], но сигнал круговой поляризации от продольного поля у них не наблюдался. На основании этих данных можно предполагать, что либо поле сложной структуры, либо имеется иная причина уширения спектральных линий.

В работе [95] проведен полный анализ процессов формирования водородных линий в магнитном поле, что имеет важное значение при использовании наблюдений, полученных с водородными магнитометрами. Авторами развит глобальный формализм, включающий эффекты магнитного поля и движущегося электрического поля. Последнее, возникающее из-за движения излучающего атома водорода в магнитном поле, изменяет структуру матрицы в уравнении переноса вектора Стокса и связывает микроскопический (собственный) и макроскопический (доплеровский) вклад в профили линий. Новые подходы предлагается применить для интерпретации фотополариметрических (I и V-параметры Стокса) наблюдений водородных линий в терминах продольного магнитного поля. Вопрос важен потому, что часто возникают различия между величинами поля, определенными по водороду и линиям металлов.

### 3.4.2. Работы группы Дж. Ландстрита

Джон Ландстрит и его группа, продолжая наблюдения на бальмеровском магнитометре, в девяностые годы все больше внимания уделяли работе с многоканальными цифровыми светоприемниками. Это, в свою очередь, потребовало адекватного развития методов редукиции и анализа данных наблюдений. В то время как результаты фотографических и фотоэлектрических измерений интерпретировались достаточно просто, анализ новых высокоточных данных о поляризованных профилях линий потребовал существенного усовершенствования моделей звездных атмосфер и магнитных полей.

Одну из первых попыток такого анализа предпринял Борра [96] еще в 1974 г. Он вычислил теоретические профили линий в предположении модели наклонного ротатора. Использовалось приближение Миллна—Эдингтона. Принималось во внимание вращение и параметры Стокса интегрировались по всему диску. Борра делает вывод, что продольное поле  $B_e$ , определенное фотографическим способом, отклоняется от верной величины,

если измерения (из-за нелинейности характеристической кривой фотоэмульсии) проводятся не по центрам тяжести линий, а по их ядрам. В случае нецентрального диполя поле, измеренное по ядрам, будет в два раза больше верного значения.

Он же [97] показал, что даже при однородном химсоставе, но нецентральном дипольном поле, спектральные линии будут асимметричны и будут показывать небольшие изменения лучевой скорости. Эффект Зеемана может вызвать также небольшие изменения эквивалентной ширины линии в противофазе с изменениями интенсивности магнитного поля  $B_s$ .

С появлением цифровых линейных приемников вопрос о влиянии вклада ядер линий отпал, но наблюдаемые различия между кривыми  $B_e$ , полученными с помощью магнитометров и спектроскопическим образом, остались.

Ландстрит [98] разработал программу синтеза линий с учетом магнитного поля и применил ее для объяснения поведения спектральных линий и кривой  $B_e$  у звезды 53 Cam. Он построил модель поля, кроме того показал, что Fe и Cg более-менее однородно распределены по звезде, но с дефицитом содержания в областях магнитного экватора.

В [99] обсуждаются результаты наблюдений звезды HD 215441 с ретикуном. Они хорошо распределены по периоду вращения. Было найдено, что магнитная ось наклонена к оси вращения под углом  $\beta = 35^\circ$ , а ось вращения к лучу зрения — примерно под таким же углом. Зеемановское расщепление спектральных линий хорошо воспроизводится моделью, предполагающей осесимметричную суперпозицию диполя, квадруполь и октополя с величинами магнитного поля на более сильном полюсе +67 кГс, -55 кГс и +30 кГс соответственно.

Напомним, что Ландстрит разработал методы решения прямой задачи, т.е. параметры модели подбирались, в то время как Хохловой и ее коллегами был реализован альтернативный метод решения обратной задачи.

Среди работ, выполненных группой Ландстрита в девяностые годы, можно выделить следующие.

Ландстрит [100] нашел поле сложной недипольной структуры у горячей кремниевой звезды HD 133880. Очень сильно отличающаяся от синусоидальной кривая переменности  $B_e$  с фазой периода вращения наилучшим образом воспроизводится в виде суперпозиции коллинеарных диполя и квадруполь. При этом модель предполагает, что квадруполь по крайней мере в 1.3 раза сильнее диполя. Максимальное значение  $B_e = -4400$  Гс.

В обширном исследовании [101] не было найдено магнитное поле у звезд типа  $\lambda Boo$ , подтвердив тем самым результаты, полученные нами на 6-м телескопе [79, 80]. Объекты этого типа также относятся к пекулярным, но линии металлов у них

ослаблены по сравнению с нормальными звездами. Таким образом, наблюдения доказали, что магнитное поле не является причиной уменьшения содержания элементов в атмосферах этих звезд.

В работе [102] Ландстрит предлагает большой обзор свойств магнитных полей СР-звезд, в значительной степени основываясь на своих данных. Показано, что дипольными (в первом приближении) полями (величиной от 300 Гс до 30 кГс) обладают Ар/Вр-звезды, а полями величиной в 1–100 Мгс — 2–3% белых карликов. В обоих случаях не обнаружено физической переменности поля со временем. В звездах солнечного типа найдены структурно сложные поля величиной до нескольких кГс и заполняющие от 10 до 80% площади поверхности звезды. Ландстрит рекомендует искать магнитные поля у холодных звезд ГП с эмиссией в УФ или видимой области спектра — признаком хромосферной активности.

В [103] представлен обзор наблюдений 44 Si и He-wk звезд, выполненный с бальмеровским магнитометром. Продольные магнитные поля были найдены примерно у половины звезд выборки со стандартной ошибкой в пределах 100–400 Гс. У 11 объектов поле было обнаружено впервые. Для большинства звезд найдена переменность продольного поля с вращением. У некоторых звезд обнаружены поля величиной 3–4 кГс, это прекрасные объекты-кандидаты для дальнейшего моделирования. Особый интерес представляют 4 звезды, у которых экстремумы фотометрической и/или спектральной переменности не совпадают с магнитными экстремумами. Это свидетельствует о том, что распределение химических элементов по поверхности у них не симметрично относительно магнитной оси звезды.

### 3.4.3. Магнитное поле HD 37776

В 90-е годы группой Ландстрита был выполнен ряд совместных работ с нашей группой, работающей на 6-м телескопе.

Ярким примером такого сотрудничества является исследование уникальной He-г звезды HD 37776. Как магнитная она была обнаружена Борра и Ландстритом [104] в 1979 г. в ходе выполнения большого обзора магнитных полей He-г звезд. Фазовая кривая  $B_e$  с периодом вращения для нее прописывалась неуверенно из-за недостаточного количества наблюдений. Тем не менее, признаки отклонения кривой от синусоиды были найдены достаточно надежно. Поэтому исследования магнитного поля этой звезды были продолжены.

В 1985 г. Томпсон и Ландстрит [105] сообщили о том, что нашли у He-г звезды HD 37776 экстраординарную (с двойной волной) переменность магнитного поля  $B_e$ , которая может быть объяснена

только в предположении, что квадрупольный компонент ее магнитного поля во много раз сильнее дипольного. Наблюдения были выполнены на бальмеровском магнитометре. Продольное поле  $B_e$  менялось строго с фазой периода вращения (1.53687 суток) в пределах от –2000 до +2000 Гс. Это означало поле на поверхности на полюсах квадруполя в десятки кГс. Для независимого подтверждения существования очень сильного и сложного магнитного поля были необходимы высокоточные спектральные и поляриметрические данные.

Программа поиска магнитных звезд среди объектов с усиленными линиями гелия была продолжена. Ее результатам посвящено обширное исследование [106], в котором показано, что эти объекты обладают очень сильными полями, величины которых больше, чем у типичных Ар-звезд. У 9 из 11 наблюдавшихся звезд He-г было найдено сильное упорядоченное магнитное поле. Новые данные с бальмеровским магнитометром были получены и для HD 37776.

Первые спектральные наблюдения были проведены с многоканальной цифровой линейкой (Ретиконом) без зеемановского анализатора на 3.6-м Гавайском телескопе Болендером и Ландстритом [107]. Было найдено изменение ширины спектральных линий с фазой периода вращения, которое было интерпретировано как магнитное. Авторы построили модель магнитного поля звезды, в которой наилучшим образом наблюдениям соответствовали изменения  $B_s$  от 20 до 60 кГс.

Первые наблюдения HD 37776 с зеемановским анализатором были выполнены на 6-м телескопе [108] еще на фотопластинках. Профили линий в ортогональных круговых поляризациях очень сильно отличались, т.е. мы отметили наличие выдающегося по величине кроссовер-эффекта. Многие детали профилей линий указывали на явное зеемановское расщепление компонент, которое могло бы возникнуть в случае, если поверхностное поле  $B_s$  в атмосфере HD 37776 достигло величины 70–80 кГс.

По наблюдениям, выполненным со спектрополяриметром БТА в различных спектральных областях, нами обнаружена постоянная, величиной около 0.4%, линейная поляризация в континууме HD 37776 [109], имеющая межзвездное или околозвездное происхождение. В то же время, широкополосной круговой поляризации континуума величиной более 0.1% обнаружено не было. Отметим, что в линиях V-параметр Стокса превышает 5%.

После внедрения ПЗС-матриц на 6-м телескопе нами была выполнена большая серия наблюдений HD 37776 с анализатором круговой поляризации. На протяжении нескольких лет было получено более 50 спектров, хорошо распределенных по фазе

периода вращения. Результаты этих наблюдений опубликованы в работе [22]. Мы измерили магнитное поле по линиям водорода и гелия, а также изучили переменность циркулярно поляризованных профилей линий гелия и кремния с фазой периода вращения звезды. Было найдено, что эквивалентная ширина линии HeI 5876 меняется с двойной волной с тем же периодом, что и продольное поле. Линии кремния меняются в противофазе с линиями гелия. Наилучшим образом наблюдениям соответствует модель поля, описанная в [107], наличие очень большого поля (порядка 70 кГс) можно считать доказанным, однако промоделировать одновременно профили  $V$ -параметра водородной линии H-beta и профили  $V$ -параметров Стокса линий металлов удовлетворительным образом не удалось.

Несколько позже В.Л. Хохлова и др. [110] выполнили моделирование поляризованных профилей линий металлов у HD 37776 (на основании наблюдательного материала, описанного в работе [22]) методом Допплер-Зеемановского картирования. Показано, что хотя линии в спектре звезды и уширены вращением, тем не менее, профили исследованных линий являются зеемановскими, а не доплеровскими. Построена модель поля в виде комбинации центрального диполя и коаксиального квадрупольного с преобладанием квадрупольной компоненты и максимальной величиной поля  $B_s$  на поверхности 60 кГс. Были построены также карты содержания элементов, которые показали, что максимум концентрации гелия соответствует областям с максимальным радиальным полем, в то время как максимум концентрации O, Al, Si, Fe совпадает с областями концентрации максимального тангенциального поля.

#### 3.4.4. Работы, выполненные на 6-м телескопе

К середине девяностых годов на 6-м телескопе постепенно заканчивались работы с магнитометрами и начались наблюдения с зеемановским анализатором на ПЗС-матрицах. Фотоэлектрические магнитометры давали возможность достигать высокой точности, обработка наблюдений проходила несравненно быстрее, чем на фотографических. Но одноканальность приборов оказалась серьезным недостатком, приведшим к их постепенному вытеснению из наблюдений по мере внедрения многоканальных цифровых светоприемников.

Считаем необходимым здесь заметить, что эпизодически наблюдения СР-звезд выполнялись в обозреваемый период на магнитометре в Крымской обсерватории, например [111]. Но в девяностые годы научные интересы ведущего наблюдателя магнитных полей в этой обсерватории С. И. Плачинды сместились в сторону исследований холодных звезд. Так как измерения магнитных полей СР-звезд в КрАО практически прекратились, мы в

дальнейшем не будем обсуждать работы, выполненные на этом магнитометре.

В одной из заключительных работ с магнитометром высокого разрешения, в котором спектральная область выделялась с помощью интерферометра Фабри-Перо [112], на БТА исследовано несколько нормальных звезд, сверхгигантов и ртутно-марганцевых звезд с очень высокой (по тем временам) точностью. Сделано заключение: возможно, магнитные поля на уровне 10–15 Гс у них присутствуют.

Отметим еще несколько работ, выполненных нами совместно с группой Ландстрита.

В [113] представлена магнитная модель A2p Cг-звезды HD 192678, построенная по наблюдениям 1) продольной компоненты поля (выполненных на БТА фотографическим и фотоэлектрическим методом и в Канаде на бальмеровском магнитометре); 2) поверхностного поля по измерениям расщепленных зеемановских компонент по спектрам с очень высоким спектральным разрешением (полученных в Чили на 3.6-м телескопе) и 3) широкополосной линейной поляриметрии. Попытка одновременного анализа большого набора разнообразных данных четко показала ограничения классической дипольной модели наклонного ротатора для этой звезды. В этой модели оказалось невозможно одновременно воспроизвести вариации поверхностного поля и широкополосной линейной поляризации. Переменность профилей зеемановского дублета FeII 6149.2 находится в согласии с дипольным полем, в котором отношение модулей поля полюс/экватор уменьшено примерно на 20%. Полученная магнитная модель для HD 192678 соответствует вращающемуся наклонному диполю с модифицированным наклоном силовых линий поля. Величина поля на полюсе равна 6.8 кГс. Модель содержит области с открытыми линиями поля на магнитном экваторе.

В [114] выполнено 29 измерений продольного поля горячей гелиевой звезды HD 184927 на бальмеровском магнитометре Ландстрита и с зеемановским анализатором на БТА. Наблюдения, длившиеся 15 лет, показали, что у звезды имеется переменное продольное магнитное поле  $B_e$ , меняющееся с периодом около 9.5 суток. Кривая  $B_e$  гладкая и синусоидальная с экстремумами  $-0.7$  кГс и  $+1.8$  кГс. Эквивалентная ширина линий гелия достигает максимума в фазе максимума  $B_e$ . Это свидетельствует о том, что зона максимальной концентрации гелия находится в области положительного магнитного полюса звезды. Нет никаких свидетельств о таком увеличении содержания в области отрицательного полюса диполя. Это позволяет предполагать, что существует значительная разница в поле на положительном и отрицательном полюсах HD 184927, видимо, связанная

с существенным вкладом квадрупольного компонента. Возможная магнитная конфигурация звезды находится в пределах от близкой к дипольной до такой, что содержит квадрупольный и октупольный компоненты, сравнимые по величине на полюсе с дипольным компонентом.

В [115] представлена модель магнитного поля Вр-звезды HD 200311. Она основана на результатах измерений продольный компоненты поля, полученных на бальмеровском магнитометре Ландстрита и зеемановском анализаторе на БТА, а также на опубликованных данных Матиса о поверхностном поле. Продольное поле  $B_e$  меняется синусоидально с периодом около 52 суток с экстремумами  $-1.8$  кГс и  $+1.8$  кГс. Поверхностное поле  $B_s$  также синусоидально меняется с тем же периодом. Переменность блеска представляет собой двойную волну, один из максимумов которой совпадает с максимумом положительного поля. Это согласуется с неоднородным распределением химических элементов по поверхности, которое симметрично относительно магнитной оси и одинаково в обеих полусферах. Магнитное поле звезды моделируется в виде наклонного нецентрального диполя.

И, наконец, четвертая работа указанной серии опубликована в [116]. В ней обсуждается магнитное поле и основные физические параметры двух относительно медленно вращающихся магнитных звезд HD 12288 и HD 14437. Используя данные о продольном  $B_e$  и поверхностном  $B_s$  поле (полученные таким же образом, как и в предыдущих работах этой серии), а также данные фотометрии, были найдены периоды вращения (около 35 суток для HD 12288 и около 27 суток для HD 14437). Наилучшее согласие с наблюдениями для HD 12288 демонстрирует модель центрального дипольного поля, а для HD 14437 — диполь необходимо сильно сместить (параметр смещения  $a = -0.23$ ). Для обеих звезд угол  $\beta$  между осью диполя и осью вращения мал — менее  $20^\circ$ .

Подчеркнем особо здесь то, что во всех четырех работах серии было показано, что на протяжении 20 лет система магнитных измерений САО на 6-м телескопе показала себя надежной и устойчивой, несмотря на различия в методах регистрации и смену светоприемников. Она полностью совпадает с системой измерений Ландстрита (использовалась на бальмеровском магнитометре) и с системой зеемановских измерений Матиса, принятой в ESO.

### *3.5. Основные результаты наблюдений 2000–2010 гг.: новые магнитные звезды, сложная топология поля, $I, Q, U, V$ параметры Стокса, магнитные поля гоАр-звезд*

На рубеже веков развитие получили мультилинейные методы обнаружения слабых магнитных полей. Было построено по крайней мере 4

эффективно работающих поляриметра: три — высокого разрешения для эшелле-спектрометров MUSICOS, ESPADONS и NARVAL, установленных на различных телескопах Франции и Канады, и один (низкого) — для спектрографа FORS1 8.2-м телескопа ANTU VLT. Спектрографы 6-м телескопа были оборудованы новыми анализаторами поляризации и светоприемниками.

На 6-м телескопе велись эффективные поиски новых магнитных CP-звезд, их было обнаружено более 80. В ESO также велись интенсивные поиски новых магнитных звезд, в частности, в южных молодых скоплениях. Найдено около 100 новых магнитных звезд.

#### *3.5.1. Классическая зеемановская спектроскопия*

Классическая зеемановская спектроскопия выполнялась, в основном, на 6-м телескопе САО РАН, на эшелле-спектрометре НЭС ( $R=45000$ ) и спектрографе умеренного разрешения ( $R=15000$ ) ОЗСП. Проводились поиски магнитных полей у объектов разных типов. Значительная доля наблюдательного времени БТА была выделена для поисков новых магнитных CP-звезд. Были найдены эффективные критерии отбора кандидатов, что позволило найти много новых магнитных звезд с сильными полями. Первые результаты были опубликованы в работах [117, 118]: было найдено 15 новых магнитных звезд. Это доказало, что наша методика поиска новых магнитных CP-звезд, основанная на анализе депрессии континуума на  $5200\text{\AA}$ , дает хорошие результаты.

Основные результаты измерений 2000–2005 гг. опубликованы в [88]. В этой работе приведены результаты измерений магнитных полей 96 CP-звезд с сильными аномалиями континуума на  $5200\text{\AA}$ . Магнитное поле было обнаружено достоверно у 72 звезд. Для двух объектов продольное поле  $B_e$  превышает 5 кГс: HD 178892 — 7.4 кГс, HD 258686 — 6.7 кГс. Для оставшихся 24-х звезд необходимо провести дополнительные наблюдения. Это, в основном, быстрые ротаторы, у которых трудно обнаруживать магнитные поля из-за большой ширины и сложности профилей спектральных линий. Мы продемонстрировали, что применение женеvской и  $\Delta\alpha$ -фотометрии позволяет резко повысить эффективность поиска новых магнитных CP-звезд. За короткое время (примерно 5 лет) их количество было увеличено примерно на 1/3.

Для некоторых новых магнитных звезд, включая объекты, обнаруженные после 2005 г., в работе [119] найдены периоды вращения и построены кривые переменности  $B_e$  с фазой периода. В частности, наличие сложного и сильного поля заподозрено у HD 221936.

Две открытых нами магнитные звезды HD 178892 и HD 45583 были изучены подробно.

В работе [120] сообщается об обнаружении расщепленных зеемановских компонент в спектре обнаруженной нами ранее холодной СР-звезды HD 178892 с рекордно сильным (для объектов этого типа) магнитным полем. Расщепление линий соответствует поверхностному полю  $B_s = 17.5$  кГс. Построена модель, в которой оно представлено центральным диполем с величиной поля на полюсе  $= 23$  кГс. Найдены эффективная температура звезды ( $T_e = 7700\text{K}$ ), определен химический состав. По всем признакам звезду следует отнести к подклассу гАр-звезд.

Для второй звезды — HD 45583 было найдено, что кривая  $B_e$  с фазой периода вращения представляет собой двойную волну, что безусловно указывает на сложную топологию ее магнитного поля. В работе [121] предпринята попытка комплексного изучения этого объекта. Получены новые данные о магнитном поле, найдена и изучена спектральная переменность. Обнаруженная нами ранее сложная переменность продольной компоненты поля с наличием вторичного минимума (в фазе положительного экстремума  $B_e$ ) подтверждена. Показано, что периоды магнитной и спектральной переменности совпадают ( $P = 1.177$  суток). Найдены параметры атмосферы ( $T_e = 13000\text{K}$ ,  $\log g = 4.0$ ) и содержание некоторых химических элементов. Показано, что несмотря на присутствие сильного ( $B_e$  до 4 кГс) поля сложной структуры, аномалии химического состава обычны для СР-звезд. Оценена величина поверхностного поля  $B_s$  — порядка 5 кГс, что плохо согласуется с данными о продольном поле.

Среди других работ, проведенных на 6-м телескопе, выделим исследования очень медленных ротаторов — звезд с периодами вращения годы-десятилетия. С точки зрения динамо-теории у таких объектов не должно быть сильных магнитных полей. Поэтому их исследование создает возможность для наблюдательного тестирования различных сценариев эволюции звездного магнетизма. Мы значительно (с 5 до 16) увеличили количество очень медленных ротаторов и нашли, что многие из них обладают сильными полями.

В качестве примера приведем исследование СР-звезды HD 965 [122]. В работе прослежены изменения продольной компоненты поля на протяжении более 10 лет. Измерения  $B_e$  были выполнены в ESO (Чили) и на 6-м телескопе. Вариации  $B_e$  показывают, что период ее вращения превышает 20 лет. Магнитное поле  $B_e$  в фазе экстремума достигает 700–800 Гс. Все параметры звезды соответствуют параметрам быстро пульсирующих гАр-звезд, однако поиск пульсаций, проведенных в фазе периода вращения, когда

продольное поле было близко к 0, не привел к успеху. В работе делается вывод, что необходимо провести повторный поиск пульсаций в фазе максимума продольного поля.

То, что очень медленные ротаторы могут обладать сильными полями, хорошо видно на примере гАр-звезды  $\gamma Equ$  с периодом вращения порядка 75 лет. Так как у нее наблюдается килогауссное поле  $B_e$  (и, соответственно,  $B_s$  около 3 кГс) — это является сильным аргументом в пользу реликтового происхождения полей у СР-звезд.

Отметим, что приборы для измерений магнитных полей звезд на 6-м телескопе постоянно совершенствуются. Значительный вклад в разработку и модернизацию оборудования внес Г. А. Чунтонов. В частности, эффективность наблюдений магнитных звезд на Основном звездном спектрографе БТА в последнее десятилетие резко возросла после введения в наблюдения нового анализатора поляризации со слайсером, разработанным Чунтоновым [123, 124].

На эшелле-спектрометре НЭС были получены спектры высокого разрешения с зеемановским анализатором в области 3400–4200 Å для нескольких ярких магнитных СР-звезд. Для  $\alpha^2 CVn$  наблюдательный материал был получен в 7 разных фазах периода вращения. Проведены измерения продольного поля  $B_e$  по линиям с длиной волны больше и меньше 3646 Å (до и после Бальмеровского скачка), образующимся на разной глубине в атмосфере звезды. Новые наблюдения с высокой точностью подтверждают наш прежний результат: продольная компонента магнитного поля этой звезды систематически во всех фазах периода на 30% меньше в верхних слоях атмосферы  $\alpha^2 CVn$ . Получено надежное указание на то, что магнитное поле в атмосфере этой звезды уменьшается с высотой с градиентом, значительно превышающим дипольный [125].

В обозреваемый период по неполяризованным спектрам высокого разрешения, полученным на разных телескопах ESO в Чили, найдены расщепленные зеемановские компоненты у многих звезд, по которым были оценены их поверхностные магнитные поля  $B_s$ . В этой связи мы уже выше цитировали работу [14], в которой было найдено 17 Ар-звезд с расщепленными зеемановскими компонентами. Отметим еще одну работу [126], в которой изучено необычно сильное магнитное поле южной Ар-звезды HD 75049. Наблюдения проводились на VLT и 2.2-м телескопах ESO. Прямые измерения показывают, что поверхностное поле у этой звезды превышает 30 кГс. У нее наблюдается фотометрическая, спектральная и магнитная переменность с периодом 4.049 суток. Переменность продольного поля может быть объяснена в модели центрального

диполя, ось вращения звезды наклонена на угол  $i = 25$  град по отношению к лучу зрения, угол  $\beta$  между магнитной осью и осью вращения составляет  $60^\circ$ , поле на полюсах диполя равно 42 кГс. Радиус звезды равен 1.7 солнечных, что означает, что она находится близко к начальной главной последовательности. Наблюдается обычное для СР-звезд усиление линий Si, Ti, Cr, Fe и очень большое усиление линий редкоземельных элементов.

### 3.5.2. Зеемановская спектрополяриметрия

Практика предыдущих лет показала, что в случае очень слабых магнитных полей значительно легче измерить сигнал круговой поляризации, вызванный эффектом Зеемана, чем выявить сдвиг ортогонально поляризованных компонент линий. Распространение метода сдерживалось одноканальностью фотоэлектрических магнитометров. Но после внедрения многоканальных цифровых светоприемников было построено несколько мультилинейных поляриметров, эффективно используемых в наблюдениях.

Первым из них в конце девяностых вступил в строй поляриметр для эшелюного спектрографа MUSICOS [9]. Он предназначен для исследований линейной и круговой поляризации в профилях спектральных линий. На этом приборе были проведены первоклассные наблюдения, результаты которых дали много новой информации, в частности, о звездах со слабыми магнитными полями. Массовые измерения линейной поляризации СР-звезд были проведены впервые. Сделаем обзор некоторых работ, выполненных на этом приборе.

В [127] представлены спектрополяриметрические измерения 14 Ар- и Вр-звезд во всех 4-х параметрах Стокса, включая впервые проведенные высококачественные наблюдения линейной поляризации в линиях. Они были выполнены в обсерватории Pic du Midi. Сигнал от зеемановской циркулярной поляризации был найден во всех одиночных линиях с типичной относительной амплитудой в несколько процентов. Сигнал линейной поляризации был обнаружен у 5 звезд и только в некоторых наиболее магниточувствительных линиях. В общем случае, для измерений линейной поляризации необходимо получать значительно более высокое отношение С/Ш. Увеличить это отношение можно путем измерения одновременно многих линий в спектре, используя метод least-squares deconvolution (LSD). Используя LSD-метод сигнал линейной поляризации в линиях был достоверно найден у 10 из 14 программных звезд. Сигнал линейной поляризации типично в 10–20 раз слабее сигнала круговой поляризации. Для 4-х известных магнитных звезд были проведены измерения во всех 4-х параметрах Стокса в течение периода

вращения. Моделирование полученных результатов столкнулось с существенными трудностями.

В работе [10] показано, что использование LSD-метода может существенно повысить точность измерений продольной компоненты поля (достигается типичная ошибка 50 Гс). Ее можно уменьшить до 20 Гс и менее для спектров с большим количеством узких и резких линий. LSD-метод применим также и для измерений магнитных полей в быстровращающихся звездах.

Создан атлас *IQUV*-параметров Стокса магнитных звезд  $\beta$  CrB [128], 53 Cam и  $\alpha^2$  CVn [129]. Они получены с высоким спектральным разрешением на MUSICOS в области 4400–6600 Å.

В [130] сравниваются наблюдаемые и вычисленные *IQUV*-параметры Стокса для двух известных магнитных звезд  $\beta$  CrB и 53 Cam. Спектры круговой поляризации, полученные на MUSICOS, сравнивались со спектрами, полученными в САО РАН на 1-м телескопе. Моделирование профилей показало, что для 53 Cam возникли существенные разногласия между модельными и реальными спектрами. Авторы предполагают, что это означает существенно более сложную структуру поля, чем дипольно-квадрупольная. Во многих линиях в синтетическом спектре не удалось воспроизвести профили интенсивности и поляризации реальных спектров. Авторы считают, что это может быть результатом стратификации химических элементов.

В фундаментальной работе [131] приведены результаты наблюдений круговой поляризации в линиях 74 звезд для поиска слабых магнитных полей. Выборка включала 22 нормальные В,А, F-звезды, 25 Am-звезд, 10 Hg-Mn, 2 — типа  $\lambda$  Boo и 11 магнитных Ар-звезд. При редукации использовался метод мультилинейного LSD-анализа. Высокоточные *I* и *V* профили определялись для каждого спектра. Не найдено никаких признаков существования поля у нормальных, Am и Hg-Mn звезд с точностью, значительно превышающей достигнутые ранее для этих объектов.

В [132] приведен результат наблюдений на спектрополяриметре MUSICOS, целью которого был поиск слабых магнитных полей у тех Ар-звезд, для которых предыдущие наблюдения не показали его наличия. Из 21 наблюдаемой звезды у 19 были найдены значимые величины *V*-параметра Стокса, вызванного эффектом Зеемана. Отмечается, что поля менее нескольких десятков Гс не были найдены ни у одной из наблюдавшихся Ар-звезд. Авторы присоединяются к идее, высказанной в работе Глаголевского и Чунтонова [133], что имеется нижняя граница (десятки Гс), поля величиной ниже нее у Ар-звезд не существуют.

Эта же команда в [134] подводит итоги новым наблюдениям на MUSICOS по программе поиска

слабых магнитных полей у Ар-звезд. Из 28 Ар-звезд, у которых ранее не могли найти поле, у 25 оно было найдено. Делается вывод, что все они являются магнитными. Более того, должна существовать минимальная граница поля, при которой проявляются пекулярные особенности химического состава.

Многие идеи MUSICOS были развиты и внедрены в новых спектрополяриметрах высокого разрешения ESPADONS (для 3.6-м CFHT) и NARVAL (для 2-м Bernard Lio telescope) [135]. Оба поляриметра оказались в 10–20 раз эффективнее MUSICOS. С их помощью было выполнено много измерений, в частности, найдены слабые магнитные поля у многих звезд разных типов. Так как в нашем обзоре рассматриваются только магнитные CP-звезды, сосредоточимся на них.

Отметим 2 работы [136, 137], выполненные большим коллективом авторов во главе с М. Орье-ром. Основные выводы этих работ следующие: 1) все Ар-звезды магнитные, 2) существует нижняя граница (соответствующая примерно 300 Гс на полюсе диполя), ниже которой магнитные поля Ар-звезд не опускаются. Несмотря на значительное увеличение точности наблюдений (до 1 Гс), не найдено продольных магнитных полей у Am- и ртутно-марганцевых звезд.

Указанные выше спектрополяриметры предназначены для измерений 4-х параметров Стокса с высоким спектральным разрешением.

Но для 8-м телескопов VLT таких приборов строить не стали. Там было выбрано другое направление работы — это наблюдения магнитных полей звезд раннего типа в рассеянных звездных скоплениях. Основной целью было исследование магнетизма звезд в максимально возможном количестве скоплений, что требовало наблюдений очень слабых звезд. Поэтому был сделан спектрополяриметр для спектрографа низкого разрешения FORS1 (R=2000) 8.2-м телескопа ANTU VLT (например, [11]). На этом приборе измеряется суммарный V-параметр Стокса от многих линий Бальмеровской серии водорода с точностью порядка 0.1%. Используется область спектра 3500–5800 Å. Инструментальная круговая поляризация не превышает 0.01%. Кроме водородных, на этом приборе можно использовать также и другие (например линии гелия), в случае быстрых ротаторов горячих CP-звезд.

Один из первых ярких результатов, полученных на этом приборе, опубликован в [138]. В молодом скоплении NGC 2516 найдена звезда HD 66318 с сильным продольным полем  $B_e$ , достигающим 4.5 кГс, и расчетным поверхностным  $B_s$  — 14.5 кГс. Период вращения звезды не найден, но он длинный — годы. В линии  $H_\alpha$  наблюдается новый

вид аномалии ядро-крылья, при котором не удается рассчитать ядро линии и поляризацию в нем. Звезда молодая — провела на ГП только около 15% времени своей жизни.

В ходе выполнения программы по поиску магнитных звезд в скоплениях была найдена еще одна звезда с более сильным полем NGC 2244-334 [139]. Продольный компонент поля, найденный по распределению V-параметров Стокса водородных линий, достигает 9 кГс. Возраст этой Herbig звезды спектрального класса B4 — около 2 млн. лет. Это означает, что она провела на ГП только около 3% своей жизни. Найденная новая магнитная звезда одна из наиболее молодых CP-звезд с надежно определенным возрастом. Еще раз подтверждается вывод о том, что звезды приходят на ГП уже с магнитными полями и аномалиями химического состава.

В работе [140] на FORS1 в поляриметрической моде исследовано 6 гоАр звезд с целью поиска вариаций магнитного поля с фазой пульсационного цикла. Для звезды HD 101065 с наибольшей амплитудой пульсаций блеска в одном из наблюдательных циклов были найдены пульсации магнитного поля. Однако этот результат не был подтвержден во время других наблюдений.

Баньюло и др. [141] провели большой цикл исследований в поляриметрической моде на FORS1 VLT с целью поиска новых магнитных звезд среди горячих звезд — членов скоплений. Как обычно, измерялся V-параметр Стокса многих водородных линий, затем по полученным данным, используя метод LSD, вычислялось продольное магнитное поле. Калибровка показала, что поля, измеренные таким способом, могут сильно отличаться от полученных классическим методом (подробности изложены в [141]). Тем не менее, для поисков новых магнитных звезд примененный способ очень эффективен: авторами указанной работы найдено 37 новых магнитных из 97-ми наблюдавшихся горячих CP-звезд, принадлежащих скоплениям. Были проведены наблюдения 138 нормальных B и A-звезд с типичной ошибкой 100 Гс. Ни у одной из них в пределах ошибок измерений магнитного поля не найдено.

Хубрик и др. [142] также на FORS1 VLT провели наблюдения CP-звезд, но более холодных, чем объекты предыдущего исследования [141]. Представлены результаты измерений продольного магнитного поля 136 звезд: 105 типа Ар/Вр, 17 ртутно-марганцевых и несколько объектов других типов. Магнитные поля были обнаружены у 57-ми Ар и Вр звезд и у 4-х ртутно-марганцевых. Автор настоящего обзора считает, что при спектральном разрешении R=2000, применяемом в FORS1,

очень трудно правильно прокалибровать сигнал  $V$ -параметра Стокса в терминах продольного поля для линий металлов, особенно в случае медленных ротаторов, когда спектральное разрешение заведомо хуже, чем ширина линии в спектре звезды.

В работе [143] приведены результаты измерений магнитных полей 14 гоAr звезд, выполненные с тем же низким разрешением. У холодной CP-звезды HD 154708 было найдено рекордно сильное для звезд этого типа магнитное поле [144]. Его продольный компонент по результатам спектрополяриметрии на FORS1 оценен в 7.5 кГс. Кроме того, были произведены измерения расщепленных зеемановских компонент, полученных на спектрографе UVES с высоким разрешением без поляризационных приставок. Было найдено поверхностное поле  $B_s = 24.5$  кГс.

Отметим, что на спектрографе UVES VLT в ESO продолжают выполняться традиционные работы по поиску звезд с расщепленными компонентами и их детальному изучению. В [145] детально изучено расщепление зеемановских компонент по спектрам высокого разрешения в областях до и после Бальмеровского скачка. Для трех холодных звезд HD 965, HD 116114 и 33 Lib было найдено увеличение поверхностного поля  $B_s$  с высотой в их атмосферах на величину в несколько сотен Гс.

По материалу, полученному на спектрографе FEROS найдены расщепленные зеемановские компоненты у двух химически пекулярных звезд: SrEuCr-звезды HD 92499 и Vp SiCr- звезды HD 157751 [146]. Поверхностное поле  $B_s$  составляет 8.5 кГс у HD 92499 и 6.6 кГс у HD 157751.

В последние годы основные наблюдения в поляризационной моде на FORS1 8-м телескопов проводятся для массивных и горячих звезд, ведется поиск магнитных среди звезд типа Ae/Be Хербига. Вкратце мы коснемся этого вопроса в следующем разделе.

Завершая раздел о результатах измерений магнитных полей, отметим еще одну работу, выполненную на спектрополяриметре ESPADONS 3.6-м телескопа CFHT [147]. ESPADONS позволяет измерять 4 параметра Стокса в широкой спектральной области от 3700 Å до 1 мкм с разрешением  $R=65000$ . Этот спектрополяриметр является альтернативой спектрополяриметру FORS1, так как на нем можно наблюдать детали линий металлов с высоким спектральным разрешением. В работе получено 44 измерения магнитных полей 23 звезд спектральных классов B6-A2, которые рассматривались, как возможные CP-звезды и возможные члены скоплений. Стандартная ошибка измерений около 45 Гс. Авторы обзора достоверно нашли магнитные поля у 10 звезд, 9 звезд выборки оказалось достоверно немагнитными. Делается заключение, что с помощью ESPADONS можно получить много такой информации, которая недоступна для спектрографа с низким разрешением FORS1.

### 3.6. Звезды с очень сильными магнитными полями

Как было приведено выше (в разделе 3.1), подробные сведения о результатах измерений магнитных полей звезд можно найти в различных каталогах.

Здесь мы считаем целесообразным привести выборку CP-звезд с наиболее сильными поля, экстремальное значение продольной компоненты  $B_e$  у которых превышает 3 кГс или поверхностное поле  $B_s$  превышает 10 кГс.

Объекты с сильными полями выделены из каталога магнитных CP-звезд Романиюка и Кудрявцева [7]. Определения величин даны в Главе 2 настоящей статьи и в указанном выше каталоге.

**Таблица.** Магнитные CP-звезды с наиболее сильными полями

HD/BD	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$ G	$B_e$ extrema (G)	[n]	$B_s$ (G)	[n]
HD 315	1520±680	-1600/+2000	4	-	-
HD 3980	1200±200	-1600/+2000	11	-	-
HD 5601	1190±100	-2000/-300	3	-	-
HD 5797	-	-2200	1	-	-
BD +40.175A	2800±150	-3400/-2000	5	-	-
BD +40.175B	1500±150	+800/+2700	5	-	-

Таблица. Продолжение

HD/BD	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$ G	$B_e$ extrema (G)	[n]	$B_s$ (G)	[n]
HD 6757A	2730±160	+2300/+2900	>12	-	-
HD 12288	1643±150	-3100/-200	20	7900	20
HD 14437	1829±260	-2000/-800	26	7700	17
HD 16582	1068±300	-2300/+300	?	-	-
HD 16605	1700±140	-2400/-800	4	-	-
HD 19712	2510±250	-3800/+1900	14	-	-
HD 22316	1250±348	-2200/+600	>20	-	-
HD 27309	1755±602	-4000/-200	12	-	-
HD 27404	1700±190	-3100/+1100	5	-	-
HD 30466	1464±293	+1000/+2200	>10	-	-
HD 293764	3760±220	+2600/+4200	14	-	-
HD 32145	2000±293	-2100/+2400	4	-	-
HD 32633	2760±263	-5700/+3500	>40	-	-
HD 35298	2275±444	-2810/+2920	5	-	-
HD 35502	1490±140	-2250/-100	6	-	-
HD 36485	3220±318	-3700/-1900	7	-	-
HD 36526	2130±200	-980/+3480	6	-	-
HD 290665	1500	-1600/+7000?	3	-	-
HD 37017	1490±338	-2300/-300	>30	-	-
HD 37479	1980±155	-1600/+3500	14	-	-
HD 37642	2100±180	-3000/+3000	10	-	-
HD 37776	1260±385	-2000/+2000	>50	80000	>50
HD 38823	1510±110	-2500/+1500	5	-	-
HD 40759	1990±240	+1750/+2050	3	-	-
V1356 Ori	2300±150	-2450	1	-	-
HD 45583	2880±600	-2500/+3800	>20	-	-
HD 258686	6000±320	+5100/+7900	12	-	-
NGC 2244 334	6000±120	-6200	1	-	-
HD 47103	3526±365	-4000/-3000	11	17500	7
HD 49299	1200±80	-2300/-500	2	-	-
HD 49713	2560±460	-2880/+2200	2	-	-
HD 49976	1490±360	-2000/+2200	>20	-	-
HD 50169	1220±220	-1500/+2000	9	5000	13

Таблица. Продолжение

HD/BD	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$ G	$B_e$ extrema (G)	[n]	$B_s$ (G)	[n]
HD 50461	1500±700	-2800/+2200	6	-	-
HD 52628	2000±80	-2050/+2100	4	-	-
HD 55719	1400±264	-1040/+2100	>10	6500	29
HD 55755	3100±140	-3280	1	-	-
HD 56343	3000±70	-3100	1	-	-
HD 58260	2290±300	+2000/+2600	10	-	-
HD 61468	1000	-2500/-1000	?	7300	4
HD 62140	1336±306	-2200/+3200	>30	-	-
HD 63843	-	-	-	11500	1
HD 65339	3200±440	-5400/+4200	>100	12800	>30
HD 66318	5000±30	+5000/+5200	2	-	-
HD 70331	2800±184	-3000/-2000	>8	12400	31
HD 71866	1680±236	-2000/+2000	>100	-	-
HD 73340	1644±218	-2300/-900	5	-	-
HD 81009	1430±236	-100/+2500	>50	8400	39
HD 86592	-	-	-	16200	2
HD 89103	2250±50	-2303	1	-	-
HD 93507	2164±278	+1600/+2600	2	7200	28
HD 94660	2352±265	-3300/-1800	8	6200	17
HD 96446	1105±248	-2100/-1100	20	-	-
HD 96707	1070±722	-3900/+800	20	-	-
HD 101065	2241±450	-2300/-1040	5	-	-
HD 112381	3400±245	-3700/-3100	5	-	-
HD 115440	3100±75	+3120	1	-	-
HD 116114	1923±113	-2200/-1800	14	5900	18
HD 116458	1925±273	-2200/-1300	17	4600	15
HD 119419	1770±455	-4200/+1800	31	-	-
HD 125248	1505±295	-2500/+2800	50	-	-
HD 126515	1720±373	-2000/+2000	20	12300	20
HD 133029	2420±319	+1300/+3300	50	-	-
HD 133652	1110±200	-2100/+700	8	-	-
HD 133880	2415±241	-4400/+1920	12	-	-
HD 137509	1020±416	-1200/+2200	17	strong	-

Таблица. Продолжение

HD/BD	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$ G	$B_e$ extrema (G)	[n]	$B_s$ (G)	[n]
HD 138218	2400±1600	-3500/+1300	3	-	-
HD 142301	2100±420	-4100/+1600	>5	-	-
HD 142990	1304±255	-2500/+600	14	-	-
HD 143473	4292±362	+4200/+5100	4	-	-
HD 144897	2046±158	+1300/+2300	?	9000	26
HD 147010	4032±402	-4500/-2500	>30	-	-
HD 149277	2000±105	+2200	1	-	-
HD 149911	1035±626	-2100/+450	6	-	-
CD-48 11051	1800±100	-2010/-1780	2	-	-
HD 151965	2602±282	-3700/-550	8	-	-
HD 151965	2602±282	-3700/-550	8	-	-
HD 152107	1487±250	+500/+2000	>50	-	-
HD 153882	1750±462	-1800/+3100	>40	-	-
HD 154708	6000±50	+5764/+7530	3	-	-
HD 157751	4000±55	+3968/+4063	2	-	-
HD 158450	1570±180	-2920/+810	4	-	-
HD 318107	3000±50	+1000/+5200	7	14300	32
HD 164827	310±110	-2300/+1600	4	-	-
HD 166473	2150±220	-2200/-2000	3	7700	23
HD 169887	680±250	-2300/+2020	4	-	-
HD 349321	2700±300	-4400/+1900	12	-	-
HD 175362	3570±448	-5000/+7000	>30	28000	1
HD 178892	5410±470	+2100/+7200	20	-	-
HD 343872	2930±320	-700/+4500	20	-	-
HD 231054	1650±240	+380/+2500	4	-	-
HD 184927	1465±430	-1200/+3000	27	-	-
HD 190290	2300±50	+2340	1	-	-

#### 4. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СВОЙСТВАХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СР-ЗВЕЗД

В заключительной главе настоящего обзора приведем современные представления о свойствах магнитных полей СР-звезд. Будем придерживаться порядка изложения, предложенного Г. Матисом в 2001 [6], но с добавлением новых данных и с

комментариями. По некоторым вопросам автор настоящего обзора имеет другую точку зрения нежели Г. Матис.

##### 4.1. Общие свойства

Тот факт, что циркулярная поляризация детектируется во всех спектральных линиях указывает

на то, что магнитные поля Ар- и Вр- звезд имеют высокую степень упорядоченности на больших масштабах. Действительно, если поля пятнисты, как у Солнца, усредненная по диску циркулярная поляризация была бы значительно меньше наблюдаемой, так как действие полей противоположной ориентации взаимно компенсируются. Более того, это крупномасштабное поле в первом приближении имеет достаточно простую структуру — обычный диполь или существенный вклад дипольной компоненты. Тороидальное или мультиполярное поле высокого порядка внесло бы большие искажения в профили линий. Такие искажения не наблюдаются. Кривые переменной продольной компоненты поля  $V_e$ , как правило, очень близки к синусоидальным, с малым отклонением точек от гладкой кривой.

Магнитные поля покрывают всю поверхность звезды и их интенсивность мало меняется по поверхности. Доказательством этого является: 1) магнитные поля наблюдаются во всех фазах периода вращения звезды, 2) в звездах с полностью расщепленными спектральными линиями, между расщепленными компонентами достигается континуум, 3) расщепленные компоненты достаточно узкие.

#### 4.2. Геометрическая структура магнитных полей

Хотя пространственно поверхность звезды и не разрешается, непрямые методы позволяют изучать структуру магнитного поля. Простые синусоидальные вариации продольной компоненты поля  $V_e$  с самого начала интерпретировались как признак дипольного поля, при этом ось диполя наклонена к оси вращения.

В этой модели вычисляется модуль среднего поля  $B_s$ . Для центрального диполя надо ожидать двух максимумов и двух минимумов  $B_s$  на протяжении цикла вращения в типичном случае, когда поочередно наблюдаются оба полушария звезды с разным знаком продольного поля  $V_e$ . Однако на практике очень часто бывает, что есть один минимум и один максимум этой величины. Это указывает на то, что реальная структура поля в общем случае отличается от дипольной.

Это еще в 1970 г. привело Ландстрита [148] к созданию модели нецентрального диполя, в которой он смещен вдоль своей оси от центра звезды на величину  $a$ , выраженную в долях радиуса. Тогда полюса имеют разную силу и можно ожидать одну волну кривой  $B_s$ . Для построения таких моделей необходимо знать углы  $i$  (наклон оси вращения к лучу зрения),  $\beta$  (наклон магнитной оси к оси диполя),  $B_p$  — величину магнитного поля на полюсе,  $a$  — величину смещения диполя. Эта модель наиболее успешно объясняет магнитные поля простой геометрии.

Альтернативные модели: центральный диполь + квадруполь с параллельными осями [149], обобщенный нецентральный диполь, где направление смещения от центра произвольное, не обязательно вдоль магнитной оси [150] или комбинация тороидального и полоидального полей [151]. Эти модели мало отличаются в наблюдательном плане от модели с нецентральным диполем.

Ландстрит и Матис [152] проанализировали достаточно большое количество Ар-звезд с известными кривыми изменения поверхностного и продольного полей. Они нашли, что в большинстве случаев эти кривые находятся в хорошем согласии с предположением о суперпозиции двух коллинеарных мультиполей низкого порядка (диполя, квадруполя и октуполя) с их общей осью, наклоненной к оси вращения. Диполь, в основном, отвечает за продольное поле, квадруполь дает контраст в силе поля между полюсами, а октуполь — контраст между экватором и полюсами. Авторы также нашли, что звезды с периодами вращения порядка 1-го месяца и больше имеют систематически малый угол  $\beta$  в отличие от быстрых ротаторов, у которых этот угол систематически больше.

Глаголевский и Герт промоделировали магнитные поля нескольких десятков CP-звезд разрабатанным ими методом “магнитных зарядов” [153]. Магнитное поле на поверхности вычисляется, как векторная сумма полей индивидуальных “магнитных зарядов”, которые можно комбинировать в виде диполей или мультиполей. Они не подтверждают выводов работы [152] о малости углов  $\beta$  для медленных ротаторов и делают вывод [154], что наклоны осей диполей к осям вращения распределены равномерно.

Очень часто кривые изменения  $V_e$  и  $B_s$  асимметричны, указывая, что магнитные поля Ар-звезд в общем случае не являются строго симметричными относительно оси, проходящей через центр звезды. Это привело к построению общей мультиполярной структуры поля, состоящей из суперпозиции диполя и нелинейного квадруполя (оба находятся в центре звезды) [155].

В своем обзоре Матис [6] высказывает надежду, что вряд ли указанные выше модели будут долгоживущими. Он ожидал, что прямые расчеты профилей, полученных во всех четырех параметрах Стокса (проект предложен и начал реализовываться Н.Е. Пискуновым), позволят получить карты магнитного поля без каких-либо предварительных допущений (но есть некоторые условия на форму регуляризации). В 2001 г. такие работы только начинались (см., например, [110, 156]).

Реализация этого проекта показала, что имеются существенные сложности: спектральные и поляризационные данные о структуре магнитного

поля, выведенные из анализа профилей линий, очень часто не совпадают с данными, полученными из кривых  $B_e$  и  $B_s$ .

В работе [157] предложен метод восстановления морфологии магнитного поля путем численного интегрирования наблюдаемых характеристик ( $B_e$ ,  $B_s$ , кроссовера и широкополосной линейной поляризации). Была проанализирована известная магнитная CP-звезда  $\beta CrB$ , для которой все эти наблюдаемые параметры имелись. В результате было найдено, что  $\beta CrB$  имеет поле очень сложной структуры, которая не может быть объяснена мультиполярным полем второго порядка.

Возник вопрос о надежности моделей атмосфер звезд с сильным магнитным полем и сопоставимости результатов, полученных разными авторами. Для ответа на этот вопрос в работе [158] сравниваются три независимые программы расчета магнитных синтетических спектров: *Cossam*, *Invers10* и *Zeeman2*. При одинаковых входных параметрах были рассчитаны  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$ -профили линии FeII 49243.9. Различия между полученными профилями оказались очень маленькими, каждую из программ можно использовать при интерпретации спектрополяриметрических данных. Это означает, что неопределенности, возникающие при моделировании профилей параметров Стокса являются результатом неопределенности во входных данных атомных и физических параметров, особенно состояния и структуры моделей звездных атмосфер.

Кочухов и др. [159] анализируют аномалию, которая наблюдается в спектрах многих холодных Ар-звезд. Эта аномалия (наиболее ярко проявляется в линии  $H_\alpha$ ) состоит в существовании резкого перехода между широкими штарковскими крыльями и аномально узким доплеровским ядром. В работе делается попытка получить расчетные профили  $H_\alpha$  и  $H_\beta$  одинаковые с наблюдаемыми. Это удастся, если повысить эффективную температуру в средних слоях атмосфер ( $-4 < \log \tau < -1$ ) на 500–1000 К.

В работе [160] впервые выполнен анализ структуры магнитного поля звезды на основании изучения профилей всех 4-х параметров Стокса. Информация о геометрии поля и распределении химического состава CP-звезды 53 Cam была взята из наблюдений с высоким спектральным разрешением, хорошо распределенным по фазе периода и с использованием новой программы магнитного доплеровского картирования. Главный результат исследования — магнитная топология 53 Cam существенно сложнее, чем любая мультиполярная комбинация низких порядков. Возникает вопрос о применимости мультиполярных приближений для исследования магнитных полей Ар-звезд. В дополнение к исследованию магнитного поля была построена карта распределения химических элементов. Данные о

химическом составе получились в очень хорошем согласии с предыдущими исследованиями.

Пискунов и Кочухов в [161] описывают новую программу (MDI) магнитно-доплеровского картирования. Она позволяет реконструировать одновременно вектор магнитного поля и распределение элементов по поверхности звезды. Предложен новый метод регуляризации обратной задачи. Программу можно использовать с полным набором ( $I, Q, U, V$ ) параметров Стокса или с частичным (например, только  $I, V$ -параметры).

В работе [162] группой Пискунова указанная выше программа применена для анализа магнитного поля звезды  $\alpha^2 CVn$ . Было найдено, что в ее магнитном поле доминирует дипольная компонента с малым включением квадрупольной. Распределение химических элементов симметрично относительно магнитного поля и следует его геометрии.

Представление о дипольной структуре магнитного поля  $\alpha^2 CVn$  противоречит нашему результату о существовании радиального градиента магнитного поля. По нашим данным [51, 52, 59], оно уменьшается с высотой в атмосфере на 30% с градиентом, значительно превышающим дипольный.

Недавно нами получен новый результат, существенно подкрепляющий вывод о сложной структуре поля  $\alpha^2 CVn$ . По выборке из 30 звезд [163, 164] обнаружено уменьшение магнитного поля  $B_e$ , определенного по ядрам водородных линий по сравнению с найденным по линиям металлов. Уменьшение поля по ядрам линий водорода найдено почти для всех из них. Отметим, что для отдельных звезд степень его уменьшения существенно различается (от 10% до 80%). Для  $\alpha^2 CVn$  получено снижение поля на 25% по ядрам водородных линий, которые, как известно, образуются в более высоких слоях атмосферы, чем слабые линии. Новые данные подтверждают наш прежний вывод об уменьшении продольного поля  $B_e$  для этой звезды с градиентом, превышающим дипольный.

Уже после сдачи в печать настоящего обзора появилась новая публикация: Кочухов и Вэйд [165] переобработали результаты наблюдений, полученные в работе [162], используя более совершенную методику анализа. Применение новых программ обработки позволило обнаружить мелкомасштабные структуры магнитного поля  $\alpha^2 CVn$ . Наблюдения линейной поляризации в линиях дают существенно новую информацию и позволяют построить карты распределения магнитного поля по поверхности звезды методом магнитно-доплеровского картирования. Результаты [165] указывают на то, что структура полей Ар-звезд сложная и не может быть представлена в виде комбинации мультиполей

низких порядков, как это получается при использовании усредненных параметров  $B_s$  и  $B_e$ .

Полученные новые результаты еще более усложняют и запутывают наблюдаемую картину строения магнитного поля CP-звезд. Видимо, следует рассматривать внимательно два альтернативных варианта: 1) магнитные поля CP-звезд действительно сложные и, в общем случае, не могут быть представлены в виде комбинации мультиполей низких порядков; 2) имеются серьезные проблемы в процедуре моделирования атмосфер звезд с сильными магнитными полями. При этом необходимо принимать во внимание и возможную стратификацию химических элементов.

### 4.3. Распределение полей по величине

#### 4.3.1. Продольное поле $B_e$

До недавних пор исследование интенсивности магнитных полей CP-звезд происходило путем измерений продольного поля  $B_e$ . Это вносит некоторые ограничения, очень важные, поскольку продольный компонент поля чувствителен к ориентации магнитных полей по отношению к лучу зрения. Сведения о распределении величины вектора поля можно извлечь, предполагая равновероятность распределения углов  $i$  и  $\beta$  по отношению к наблюдателю.

Можно указать еще на некоторые общие закономерности. В частности, имеется систематическая разница в амплитуде изменений поля  $B_e$  с фазой периода вращения: дисперсия для классических Ar-звезд составляет 300 Гс, а для более горячих Vr-звезд — 1 кГс. Это указывает на большую величину поля у горячих звезд.

Анализ данных нашего каталога магнитных звезд [7] показывает, что их количество убывает с увеличением поля по экспоненциальному закону.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. В качестве величины, характеризующей поле, возьмем экстремальное значение продольной компоненты  $B_e(extr)$  из работы [7]. Этот параметр непосредственно получается из наблюдений, он наиболее близок к величине поля на поверхности CP-звезды.

Распределение звезд в зависимости от величины  $B_e(extr)$  показано на Рис. 1.

Уменьшение количества звезд с увеличением силы поля происходит по экспоненциальному закону (в пределах  $B_e(extr)$  от 0.7 кГс до 5 кГс).

$$N = \exp(5.2 - 0.0008 B_e(extr))$$

Коэффициент корреляции 0.988.

Нарушение экспоненциальной зависимости за пределами указанного интервала продольных полей понимается достаточно просто: 1) не все магнитные CP-звезды с полями  $B_e(extr)$  менее 600–700 Гс были обнаружены (соответственно, не вошли в наш список), поэтому завал гистограммы в области слабых полей объясняется эффектами наблюдательной селекции; 2) в области сильных (более 5 кГс) полей насчитывается очень малое количество объектов, поэтому теряется возможность для анализа статистических закономерностей.

Наши данные демонстрируют, что экстремальная величина  $B_e$  превышает 4 кГс только у 6% магнитных CP-звезд. Таким образом, можно оценить, что, по крайней мере, у 90% обнаруженных магнитных CP-звезд величина поля на поверхности не превышает 10 кГс. Объектов с более сильными полями ( $B_s$  более 20 кГс) известно всего несколько. Видимо, на уровне нескольких десятков килогауссов и проходит граница, за пределами которой более сильные крупномасштабные поля в атмосферах звезд Главной последовательности формироваться и существовать не могут.

Более сложный вопрос — существует ли нижняя граница магнитного поля CP-звезд. Как мы уже выше упоминали, исследователи, работающие на мультилинейных спектрографах ESPADONS и NARVAL, считают, что такая нижняя граница существует (на уровне примерно 300 Гс на полюсе диполя), ниже которой магнитные поля Ar-звезд не опускаются. Так как точности измерений на других приборах ниже, проверить независимым образом этот результат невозможно.

#### 4.3.2. Поверхностное поле $B_s$

Модуль поверхностного поля  $B_s$  лучше характеризует само поле, чем продольный компонент. Однако его можно измерить только у малой доли звезд с узкими и резкими линиями. Матис и др. [13] изучали распределение модулей поля, усредненных по фазе вращения ( $B_{av}$ ). Ниже приведем основные выводы этой работы.

Для большинства звезд величина  $B_{av}$  находится между 3 и 9 кГс с длинным хвостом в сторону больших полей. Но нет известных звезд с  $B_{av} < 2.8$  кГс. Эта величина не является пределом обнаружения, так как простые аргументы показывают, что разрешенные линии могут быть наблюдаемы вплоть до поверхностных полей 1.7 кГс, и много звезд с полями 2.2 кГс в минимуме  $B_s$  были измерены (но для всех этих звезд усредненное по фазе вращения поле не менее 2.8 кГс!!!). К настоящему времени нет объяснений такой границе.

Существует также некая слабая корреляция между эффективной температурой и модулем поля, усредненным по периоду вращения: более сильное

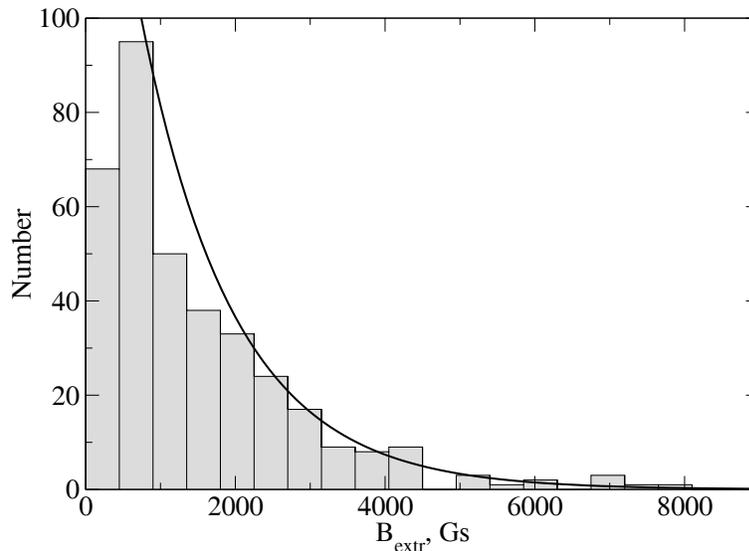


Рис. 1. Гистограмма распределения величины  $B_e(\text{extr})$ .

поле — у более холодных звезд. Но предел на 2.8 кГс не зависит от температуры. Нам представляется, что вышеуказанное утверждение Матиса о существовании границы спорно.

#### 4.4. Магнитное поле и вращение

Одно из наиболее интересных свойств СР-звезд — большой разброс периодов вращений: пять порядков величины — от долей суток до десятилетий. Очень длинные периоды в прошлом служили аргументом против модели наклонного ротатора. Однако широкополосные измерения линейной поляризации для  $\gamma$  Eri показали, что ее угол поворачивается примерно на 5 град в год и завершит полный цикл примерно за 75 лет, полностью подтверждая модель наклонного ротатора [166].

Систематические наблюдения звезд с расщепленными компонентами позволило Матису и др. [13] удвоить количество СР-звезд с периодами более 30 дней. Отмечается, что нет звезд с периодом более 150 суток, у которых средний модуль поля превышал бы 7.5 кГс. В то же время для звезд с разрешенными компонентами, но с периодами менее 150 суток, модули поля  $B_s$  превышают эту величину более чем в половине случаев. Это один из первых индикаторов систематических различий быстро и медленно вращающихся СР-звезд: у более быстрых ротаторов поле больше.

Подробно исследованы взаимосвязи между вращением и магнитными полями звезд разных типов в диссертации Романюка [167]. Рассмотрим некоторые результаты этого исследования.

Мы получили, что степень аномальности континуума и спектра магнитных звезд растет с увеличением периода их вращения. Были подтверждены результаты работы Ландстрита и Матиса [152] о том, что магнитная структура быстрых и медленных ротаторов различается. В дополнение к выводам указанной работы мы нашли, что контраст в величине поверхностного поля между магнитными полюсами и экватором для быстрых ротаторов из списка [152] больше дипольного, а медленных — меньше дипольного.

Для статистической оценки полезно рассмотреть реверсивные (в которых продольная компонента магнитного поля  $B_e$  меняет знак) и нереверсивные (когда  $B_e$  преимущественно одного знака) звезды. У реверсивных звезд наблюдатель может видеть как магнитные полюса, так и экватор, а у нереверсивных — преимущественно магнитные полюса. Если имеются систематические различия в распределении элементов по поверхности в зависимости от магнитной широты, то химсостав реверсивных и нереверсивных звезд одинаковой температуры может быть разным. Посмотрим с этой стороны на звезды нашего каталога (приведен в [167]).

##### 4.4.1. Звезды с аномальными линиями гелия

Почти все звезды He-г быстро вращаются (типичные периоды вращения 1–2 суток) и являются нереверсивными. Звезды He-wk с быстрым вращением (период менее 3-х суток) в основном нереверсивные (9 нереверсивных и 7 реверсивных), а с периодами более 3-х суток — реверсивные (2 нереверсивные и 6 реверсивных).

Почти все быстрые ротаторы являются членами молодых рассеянных звездных скоплений (в Орионе и Скорпионе–Центавре) и одновременно нереверсивными звездами. Это может означать, что магнитные конфигурации звезд-членов 2-х скоплений и их пространственные ориентации примерно одинаковые, что указывает на коллективное происхождение и, возможно, реликтовую природу их поля.

Все He-г звезды имеют периоды менее 10 суток, следовательно, можно ожидать больших углов  $\beta$  (хотя это и не доказано!) и более резких изменений величины  $B_e$  (с большой амплитудой). Ни одна из звезд He-wk не имеет периода более 30 суток, 3 имеют более 10 суток. Они обладают наименьшими полями. Похоже, что для звезд этого типа критическим является период порядка 7 суток. При больших периодах  $B_e(extr)$  уже небольшое.

#### 4.4.2. Звезды с аномальными линиями кремния

Давно известно, что гелий и кремний в горячих CP-звездах меняются в противофазе. Это означает, что они распределены существенно различно по поверхности: в большинстве случаев области концентрации гелия и кремния не перекрываются. Но по отношению к вращению сохраняется та же закономерность, что и для гелиевых звезд — быстрые ротаторы в основном видны с магнитных полюсов (т.е. нереверсивные), а медленные ротаторы видны со стороны магнитного экватора (т.е. реверсивные).

Можно сделать и другой вывод: кремний в CP-звездах концентрируется чаще всего в районе магнитных полюсов, поэтому он хорошо выделен в спектрах нереверсивных магнитных звезд, преимущественно видимых с полюсов. Звезды Si+ видны также и со стороны магнитного экватора, поэтому мы можем наблюдать аномалии не только кремния, но и других химических элементов. В целом, для быстрых ротаторов имеем 19 нереверсивных и 7 реверсивных, а для медленных — 9 нереверсивных и 13 реверсивных магнитных звезд с аномальными линиями кремния. В среднем, поле больше для звезд-членов скоплений как для быстрых, так и для медленных ротаторов.

#### 4.4.3. Звезды с аномальными линиями стронция, хрома и европия

Эти объекты не показывают таких различий между медленными и быстрыми ротаторами, как звезды предыдущих типов. С увеличением периода наблюдается увеличение покраснения.

И, наконец, анализ 26 звезд с наиболее сильными полями  $B_e(extr) > 3$  кГс показывает, что 20 из них нереверсивные, 5 — реверсивные, а для оставшейся одной проведено недостаточное количество измерений.

Объяснить это явление еще предстоит. На наш взгляд, некоторую роль могут играть эффекты наблюдательной селекции (звезды, видимые с полюсов, легче обнаружить). Видимо, в целом атмосфера звезды в области магнитных полюсов горячее, чем в области магнитного экватора.

#### 4.5. Магнитное поле и аномалии в распределении энергии

Аномалии в распределении энергии в континууме магнитных звезд были обнаружены еще в 60-е годы XX века: уменьшение бальмеровского скачка [168] и наличие нескольких депрессий, наиболее выраженной из которых является особенность на длине волны  $5200 \text{ \AA}$  [169]. 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 они исчезают.

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

Еще в 1980 г. Крамер и Мидер [170, 171] нашли положительную корреляцию между силой поля на поверхности магнитной звезды  $B_s$  и величиной Z-параметра фотометрической 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 характеристиками магнитных CP-звезд.

Детально об этом можно прочитать в работе Романиюка и др. [172]. В ней проведено сопоставление силы магнитных полей и параметров вращения магнитных CP-звезд с сильными и слабыми аномалиями в распределении энергии в континууме. Ниже обсудим некоторые выводы указанной работы. Показано, что наиболее эффективным способом обнаружения новых магнитных звезд является изучение кандидатов, отобранных среди объектов с наибольшими аномалиями в континууме. Наблюдения доказывают, что хотя имеется реальная связь между величиной поля на поверхности CP-звезды и степенью аномальности ее континуума, однако не ясно, существует ли простой линейный рост глубины депрессии с усилением поля. Корреляция между этими величинами достаточно слабая, наблюдаются большие отклонения индивидуальных объектов от средней зависимости. На наш взгляд,

одной из возможных причин этого является то, что 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.

В работе [172] были получены некоторые новые результаты, которые кратко приведены ниже.

#### 4.5.1. Магнитные поля звезд с сильными и слабыми аномалиями

Сравним магнитные поля звезд с сильной и слабой депрессией на  $5200 \text{ \AA}$ .

Так как кривые переменности продольного компонента поля с фазой периода вращения имеют-ся лишь для  $1/3$  магнитных звезд, а мы хотим использовать максимально возможное количество этих объектов, то здесь в качестве количественного индикатора магнитного поля вынуждены рассматривать только среднеквадратическую величину его продольной компоненты  $\langle B_e \rangle$ .

Как нами было показано в статье [7], величина  $\langle B_e \rangle$  и экстремальная величина продольной компоненты поля  $B_{\text{ext}}$  имеют примерно одинаковое распределение — количество звезд уменьшается с увеличением поля по экспоненциальному закону. Поэтому использование величины  $\langle B_e \rangle$  для сравнительного анализа вполне допустимо. Ее определение приведено в [7].

Гистограмма распределения звезд по величине  $\langle B_e \rangle$  приведена на Рис. 2. На Рис. 2а представлены звезды с сильной депрессией, а на Рис. 2б — со слабой.

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

Констатация этого факта важна. Как мы уже отмечали выше, слабая корреляция между величиной депрессии и напряженностью магнитного поля часто служила поводом для сомнений в реальности связи между ними.

Наша точка зрения по этому вопросу излагалась неоднократно (см., например, диссертацию Романюка [167]). Она заключается в том, что некоторая общая связь между величиной поля на поверхности звезды и степенью аномальности ее континуума существует, ее можно использовать для отбора кандидатов 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.

#### 4.5.2. Скорости вращения звезд с сильными и слабыми аномалиями

Распределение звезд с сильными и слабыми депрессиями по скоростям вращения представлено на Рис. 3. На Рис. 3а гистограмма для 80 звезд с сильными депрессиями. Медианное значение  $v \sin i$  для звезд этой выборки  $26.0 \pm 2.3 \text{ км/с}$ . На Рис. 3б гистограмма для 42 звезд со слабыми депрессиями. Медианное значение  $v \sin i$  для объектов этой выборки  $48.5 \pm 6.3 \text{ км/с}$ .

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

По критерию Колмогорова-Смирнова выборки значимо различаются. Для скоростей вращения уровень значимости (вероятность того, что они получены из общего распределения составляет 0.023 (соответствующая достоверность — 97.7%)

Наши выборки достаточно представительны, поэтому полученные различия мы считаем надежными. Дополнительно наш вывод подтверждается следующим фактом — среди звезд с сильными депрессиями значительно меньше доля быстрых ротаторов: из 80 звезд только 16 (т.е. 20%) имеют проекции скоростей вращения  $v \sin i > 40 \text{ км/с}$ . В то же время, из 42 звезд со слабыми депрессиями  $v \sin i > 40 \text{ км/с}$  имеют 19 объектов (т.е. 45%). На Рис. 3а,б это наглядно видно.

#### 4.5.3. Периоды вращения звезд с сильными и слабыми аномалиями

Периоды вращения  $P$  определяются независимо от скоростей вращения, поэтому — если действительно нами установлена общая закономерность, что звезды со слабыми депрессиями являются более быстрыми ротаторами, то периоды вращения звезд с сильными депрессиями в целом должны быть больше, чем у звезд со слабыми, независимо от выборки объектов.

Гистограммы распределения магнитных СР-звезд по периоду вращения из указанных двух выборок приведены на Рис. 4.

На Рис. 4а приведено распределение 75 звезд с сильными депрессиями. Среднее значение логарифма периода:

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

Подобное распределение для 40 звезд со слабыми депрессиями изображено на Рис. 4б. Среднее значение логарифма периода для них:

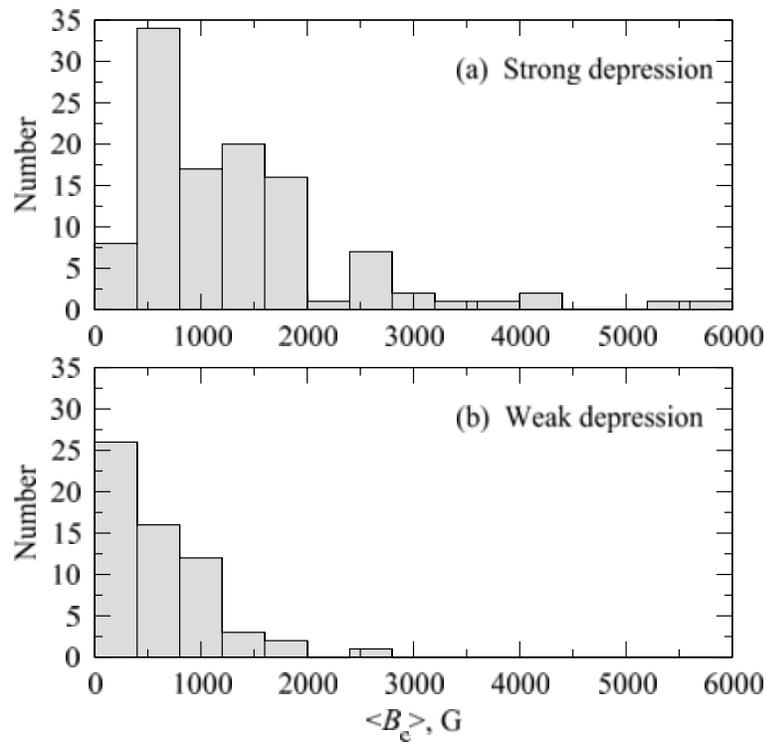


Рис. 2. Гистограмма распределения звезд по величине  $\langle B_e \rangle$  с сильными (а) и слабыми (б) депрессиями.

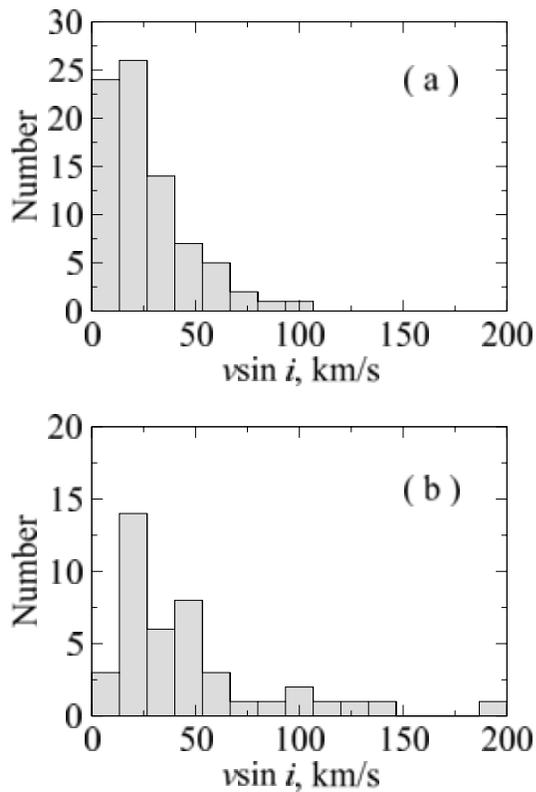


Рис. 3. Распределение звезд с сильной (а) и слабой (б) депрессией на  $\lambda 5200 \text{ \AA}$  по скоростям вращения  $v_e \sin i$ .

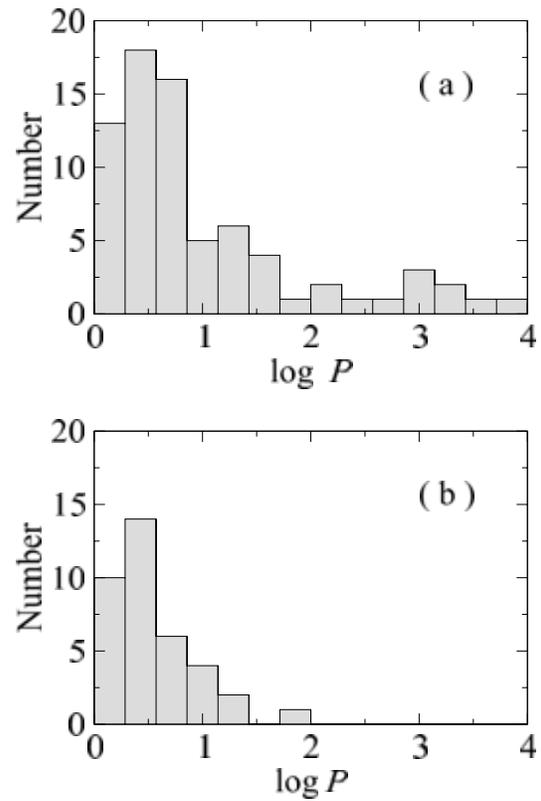


Рис. 4. Распределение звезд с сильной (а) и слабой (б) депрессией на  $\lambda 5200 \text{ \AA}$  по периодам вращения  $P$ .

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

По критерию Колмогорова–Смирнова уровень значимости составляет 0.006, т.е. с достоверностью 99.4% выборки различаются.

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. 4а и 4б 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%.

Итак, короткие периоды (не более 4 суток) имеет менее половины звезд с сильными депрессиями и почти 3/4 звезд со слабыми.

Таким образом, анализ магнитных СР-звезд с сильными и слабыми депрессиями в континууме привел к двум уверенным выводам: звезды с сильными депрессиями имеют 1) вдвое большие магнитные поля, чем звезды со слабыми депрессиями, и 2) вращаются медленнее примерно втрое, чем звезды со слабыми депрессиями.

Магнитные СР-звезды со слабыми депрессиями занимают промежуточное положение между нормальными А- и В- 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. Исследованные нами параметры полей и депрессий меняются не скачкообразно, а постепенно. Можно полагать, что магнитные СР-звезды с большими и малыми депрессиями являются однопородными объектами, но физические условия, в которых они формировались, привели к тому, что на Главную последовательность они вышли с разными скоростями вращения.

#### 4.6. Эволюционный статус магнитных Ар-звезд.

Эволюционный статус магнитных звезд широко обсуждается в литературе со времени обнаружения космических магнитных полей. Мы рассмотрим современные работы по эволюции магнитных СР-звезд.

Тем не менее, считаем своей обязанностью отметить здесь, что в восьмидесятые годы XX века на 6-м телескопе была проведена большая серия работ под руководством И. М. Копылова (например, [173]), в которой показано, что во время жизни СР-звезд на Главной последовательности у них не изменяются ни степень пекулярности, ни скорость вращения. Глаголевский и др. [174] обнаружили, что и магнитное поле на Главной последовательности не различается у звезд-членов молодых и старых звездных скоплений.

Но, вернемся к более современным работам. Хубрик и др. [175] представили соображения, основанные на данных ГИППАРХ, что магнитные Ар-звезды с массами ниже 3 солнечных, прожили по крайней мере 30% своей жизни на ГП. По их данным, большинство магнитных звезд концентрируется к центру полосы ГП.

Однако в целом ряде работ это утверждение подвергается сомнению. Например, в [176] изучили эволюционный статус магнитных СР-звезд. Было найдено, что звезды с массой более 3 солнечных равномерно распределены по всей ширине полосы ГП, в то же время, звезды с массами менее 2 солнечных имеют тенденцию концентрироваться к центру полосы. Авторы делают вывод, что механизмы, которые формируют магнитные поля звезд больших и малых масс, должны быть разными.

Баньюло и др. [177] провели статистическое изучение магнитной структуры СР-звезд. Для этого было проведено моделирование выборки из 34-х звезд, топология поля предполагалась в виде суперпозиции диполя и произвольно ориентированного квадруполья. Подтвердился вывод работы [152] о том, что углы  $\beta$  типично большие для быстрых ротаторов и типично малые для медленных.

Важный вопрос о магнетизме предшественников магнитных СР-звезд — объектов типа Ae/Be Хербига. Первые поиски полей у них были проведены Глаголевским и Чунтоновым [178]. Не было найдено магнитных полей более 500 Гс у звезд HD 53367 и HD 250550. В работе [179] они же сообщают об отрицательном результате измерений поля еще для 9-ти звезд типа Ae/Be Хербига (с такой-же точностью) на 6-м телескопе.

В наблюдениях на FORS1 VLT в работе [180] нашли существенные доказательства наличия поля порядка 1 кГс у нескольких звезд Ae/Be Хербига. Авторы отмечают, что этот результат противоречит выводам [175] о том, что СР-звезды с малыми массами концентрируются к центру полосы ГП. Магнитные звезды наблюдаются уже на начальной стадии ГП.

В следующей работе Вэйд и др. [181] провели 68 наблюдений 50 звезд Ae/Be Хербига на FORS1

VLT. Магнитное поле величиной порядка 1 кГс было найдено примерно у 10% наблюдавшихся звезд, что хорошо согласуется с долей магнитных CP-звезд среди A и B-звезд ГП. Точность измерений магнитных полей по линиям водорода и металлов составила примерно 200 Гс. Эти результаты находятся в полном согласии с теорией реликтового происхождения магнитных полей CP-звезд.

На том же поляриметре FORS1 VLT проведены несколько рядов наблюдений Ap/Bp звезд, членов молодых скоплений. В работе [182] подведены некоторые итоги этих исследований. Найдено, что магнитные поля присутствуют у звезд по всей ширине полосы от ZAMS до TAMS. Статистически для звезд с массами больше 3-х солнечных поля ослабевают с возрастом примерно так, как ожидается при условии сохранения потока (при увеличении радиуса звезды) или даже быстрее до возрастов порядка 30 млн. лет. А звезды малых масс не показывают уменьшения величины поля вплоть до возрастов 100 млн. лет.

До недавних пор было общепризнано, что наблюдения не показывают никаких признаков замедления вращения магнитной звезды во время ее жизни на ГП. И только в недавней работе [183] найдено увеличение периода уникальной звезды HD 37776 со сложным и сильным полем на 17.7 сек за 31 год наблюдений (период ее вращения  $P=37$  часов). Данные получены из анализа 1895 фотометрических, спектральных и магнитных измерений. Звезду окружает эмиссионная туманность, поэтому потеря массы и момента вращения могут иметь объяснение.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение магнитных полей Ap-звезд имеет наиболее длинную после Солнца историю. Фундаментальный вопрос — происхождение магнитных Ap/Bp-звезд и их эволюция постепенно решается, однако многие детали этого процесса остаются невыясненными. Большинство данных наблюдений указывает на реликтовую природу магнитного поля CP-звезд, найденные недавно регулярные поля у звезд-предшественников химически пекулярных звезд — сильный аргумент в ее пользу. Второй существенный аргумент — сильные килогауссные поля у CP-звезд с периодами вращения в десятки лет (например,  $\gamma Eql$ ,  $P = 75$  лет). Так как магнитное торможение на ГП отсутствует, эти звезды уже пришли на начальную Главную последовательность практически невращающимися и механизмом динамо в ядре такие поля генерировать и поддерживать невозможно.

Кажется твердо установленным, что аномальное содержание химических элементов, наблюдаемое

на поверхности магнитных Ap-звезд, является результатом диффузии элементов во внешних слоях, как результат соревнования между гравитационным погружением и лучевым всплытием. Механизм впервые предложен Мишо. Магнитное поле при этом играет существенную роль, стабилизируя атмосферу, определяя горизонтальную миграцию элементов по поверхности, включая наблюдаемые неоднородности. Его эффекты в звездном ветре — это фактор, который важен для интерпретации явления He-wk и He-g звезд.

Показано, что на уровень в несколько десятков килогаусс приходится предел, больше которого величины магнитных полей CP-звезд Главной последовательности быть не могут. Хотя кривые переменности продольного и поверхностного поля успешно моделируются комбинацией мультиполей низких порядков, более детальные исследования, выполняемые на основании анализа 4-х параметров Стокса, во многих случаях дают существенно более сложную картину поля.

Если наличие большого радиального градиента поля подтвердится, возникнет вопрос об адекватности применяемых нами методов обработки и интерпретации данных. Не исключено, что ответ на этот вопрос будет дан только после того, как поверхности магнитных CP-звезд будут разрешены методами интерферометрии. Тогда пятна химсостава и особенности топологии магнитных полей можно будет непосредственно наблюдать.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит своих коллег по группе “Магнитные звезды” САО РАН за сотрудничество, которое позволило написать этот обзор, в частности, Д. О. Кудрявцева за прочтение и критические замечания. С. В. Карпову благодарен за консультации по статистической обработке данных.

Автор благодарит Российский Фонд Фундаментальных исследований (грант РФФИ 09-02-00002а), Федеральную Целевую программу “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.” (грант П 1244) и программу “Научная школа” (грант НШ-5473.2010.2) за частичную финансовую поддержку настоящего исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. I. Romanyuk, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 64 (2005).
2. I. I. Romanyuk, Astrophysical Bulletin **62**, 62 (2007).
3. G Michaud, Astrophys. J. **160**, 641 (1970).
4. H. W. Babcock, Astrophys. J. Suppl. **30**, 141 (1958).
5. G Preston, Astrophys. J. **164**, 389 (1971).

6. G Mathys, ASP Conf. Series **248**, 267 (2001)
7. I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **63**, 139 (2008).
8. I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, E. A. Semenko, and I. A. Yakunin *Astrophysical Bulletin* **66**(in preparation).
9. J-F. Donati, C. Catala, G. A. Wade, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **134**, 149 (1999).
10. G. A. Wade, J-F. Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **313**, 851 (2000).
11. S. Bagnulo, T. Szeifert, G. A. Wade, et al., *Astronom. and Astrophys.* **389**, 191 (2002).
12. S. Hubrig and G. Mathys, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 475 (1997).
13. G. Mathys, S. Hubrig, J. D. Landstreet, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **123**, 353 (1997).
14. L. M. Freyhammer, V. G. Elkin, D. W. Kurtz, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **389**, 441 (2008).
15. J-L. Leroy, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **114**, 79 (1994).
16. P. Didelon, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **53**, 119 (1983).
17. I. I. Romanyuk, in *Proceedings of Intern. meeting, "Magnetic fields of CP and related stars"*, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1999, Ed. by: Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (SAO RAS, Moscow, 2000), p. 18
18. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astronom. and Astrophys.* **407**, 631 (2003).
19. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astronom. and Astrophys.* **430**, 1143 (2005).
20. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **394**, 1338 (2009).
21. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **132**, 521 (1960).
22. I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, D. O. Kudryavtsev, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 83 (1998).
23. G. Preston, *Astrophys. J.* **158**, 251 (1969).
24. V. G. Elkin, Yu. V. Glagolevskij, and I. I. Romanyuk, *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **25**, 24 (1987).
25. G. Preston, *Astrophys. J.* **150**, 871 (1967).
26. G. Preston and K. Stepien, *Astrophys. J.* **151**, 583 (1968).
27. G. Preston and K. Stepien, *Astrophys. J.* **154**, 971 (1968).
28. G. Preston and K. Sturch, In: *"Magnetic and Related stars"*, (Mono Book Corp., Baltimore, 1965), p. 111.
29. G. Preston, *Astrophys. J.* **158**, 243 (1969).
30. S. C. Wolff, *Astrophys. J.* **158**, 1231 (1969).
31. G. Preston and K. Stepien, *Astrophys. J.* **151**, 577 (1968).
32. G. W. Preston and S. C. Wolff, *Astrophys. J.* **160**, 1071 (1970).
33. G. Preston, *Astrophys. J.* **157**, 247 (1969).
34. G. Preston, *Astrophys. J.* **160**, 1059 (1970).
35. G. W. Preston, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **83**, 571 (1971).
36. D. Pyper, *Astrophys. J. Suppl.* **18**, 1 (1969).
37. R. N. Kumajgorodskaya and I. M. Kopylov, *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **4**, 50 (1972).
38. van den Heuvel, *Astronom. and Astrophys.* **11**, 461 (1971).
39. W. Bonsack and C. Pilachowski, *Astrophys. J.* **190**, 327 (1974).
40. W. Bonsack, *Astronom. and Astrophys.* **59**, 195 (1977).
41. S. C. Wolff and W. K. Bonsack, *Astrophys. J.* **176**, 425 (1972).
42. W. K. Bonsack, C. Pilachowski, and S. C. Wolff, *Astrophys. J.* **187**, 265 (1974).
43. G. Scholz, *Astron. Nachr.* **292**, 279 (1971).
44. G. Scholz, *Astron. Nachr.* **292**, 281 (1971).
45. G. Scholz and E. Gerth, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **195**, 853 (1981).
46. Yu. V. Glagolevskij, K. I. Kozlova, R. N. Kumajgorodskaya, et al., *Pis'ma Astronom. Zh.* **3**, 500 (1977).
47. Yu. V. Glagolevskij, V. D. Bychkov, I. I. Romanyuk, et al., *Pis'ma Astronom. Zh.* **8**, 26 (1982).
48. Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, V. D. Bychkov, and V. S. Lebedev, *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **18**, 57 (1984).
49. Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, V. D. Bychkov, and N. M. Chunakova, *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **19**, 28 (1985).
50. Yu. V. Glagolevskij and N. M. Chunakova, *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **19**, 37 (1985).
51. I. I. Romanyuk, *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **12**, 3 (1980).
52. I. I. Romanyuk, *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **33**, 53 (1991).
53. N. E. Piskunov and V. L. Khokhlova, *Pis'ma Astronom. Zh.* **9**, 665 (1983).
54. V. L. Khokhlova, In: *"Itogi nauki i tekhniki"*, Ed. by R. A. Syunyaev (VINITI, Moscow, 1983), vol. 24, p.283-299.
55. J. Huchra, *Astrophys. J.* **174**, 435 (1972).
56. S. J. Adelman, *Astrophys. J. Suppl.* **27**, 242 (1974).
57. N. Cramer and A. Maeder, *Astronom. and Astrophys.* **88**, 135 (1980).
58. Yu. V. Glagolevskij, V. D. Bychkov, I. Kh. Iliev, et al., *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **15**, 14 (1982).
59. I. I. Romanyuk, *Pis'ma Astronom. Zh.* **18**, 443 (1984).
60. S. C. Wolff, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **90**, 412 (1978).
61. Yu. V. Glagolevskij, V. G. Klochkova, and I. M. Kopylov, *Astronom. Zh.* **64**, 360 (1987).
62. N. E. Piskunov and V. L. Khokhlova, *Pis'ma Astronom. Zh.* **10**, 449 (1984).
63. N. E. Piskunov, *Pis'ma Astronom. Zh.* **11**, 44 (1985).
64. A. B. Severny, *Astrophys. J.* **159**, 73 (1970).
65. J. R. P. Angel and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **162**, 261 (1970).
66. Yu. V. Glagolevskij, G. A. Chuntunov, I. D. Naidenov, et al., *Soobshch. SAO* **25**, 5 (1979).

67. A. B. Severny, V. M. Kuvshinov, and N. S. Nikulin, *Izvestija CrAO*, **50**, 3 (1974).
68. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **185**, 139 (1973).
69. J. D. Landstreet, E. F. Borra, J. R. P. Angel, and M. E. Illing, *Astrophys. J.* **201**, 624 (1975).
70. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **212**, 141 (1977).
71. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **42**, 421 (1980).
72. E. F. Borra, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astrophys. J. Suppl.* **53**, 151 (1983).
73. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **249**, 139 (1981).
74. I. B. Thompson, D. A. Bohlender, and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **64**, 219 (1987).
75. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **258**, 639 (1982).
76. Yu. V. Glagolevskij, V. D. Bychkov, I. D. Naidenov, and I. I. Romanyuk, *Pis'ma Astronom. Zh.* **11**, 107 (1985).
77. V. G. Shtol, V. D. Bychkov, N. A. Vikuliev, et al., *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)* **19**, 66 (1985).
78. Z. Mikulasek, Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, and V. G. Shtol, in *Proceedings of Intern. Meeting "Magnetic Stars"*, Salaspils, USSR, 1984, Ed. by V. L. Khokhlova, D. A. Ptitsyn, and O. A. Lielausis, (IF, Riga, 1984), p. 13.
79. I. Kh. Iliev, I. S. Barzova, Yu. V. Glagolevskij et al., in *Proceedings of Intern. Meeting "Magnetic Stars"* Nizhnij Arkhyz, USSR, 1987, Ed. by I. M. Kopylov and Yu. V. Glagolevskij, (Nauka, Leningrad, 1988), p. 87.
80. I. Kh. Iliev, I. S. Barzova, Yu. V. Glagolevskij, et al., *Potsdam obs. contr.*, n.125, 78 (1990).
81. P. North, Yu. V. Glagolevskij, V. G. Elkin, and I. I. Romanyuk, in *Proceedings of Intern. Meeting "Stellar magnetism"*, Nizhnij Arkhyz, USSR, 1991, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Nauka, Saint Petersburg, 1992), p. 51.
82. Yu. V. Glagolevskij, V. G. Elkin, I. I. Romanyuk, and V. G. Shtol, in *Proceedings of Intern. Meeting "Magnetic stars"*, Nizhnij Arkhyz, USSR, 1987, Ed. by I. M. Kopylov and Yu. V. Glagolevskij, (Nauka, Leningrad, 1988), p. 22.
83. Yu. V. Glagolevskij, V. G. Elkin, I. I. Romanyuk, and V. G. Shtol, *Potsdam obs. contr.*, №125, 53 (1990).
84. D. O. Kudryavtsev, N. E. Piskunov, I. I. Romanyuk, et al., in *Proceedings of Intern. Meeting "Magnetic Fields of CP and related stars"*, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1999, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Moscow, 2000), p. 64.
85. J-F. Donati and G. A. Wade, *Astronom. and Astrophys.* **341**, 216 (1999).
86. G. Mathys, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **89**, 121 (1991).
87. G. Mathys and T. Lanz *Astronom. and Astrophys.* **256**, 169 (1992).
88. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Paunzen *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **372**, 1804 (2006).
89. G. Mathys, *Astronom. and Astrophys.* **293**, 733 (1995).
90. G. Mathys, *Astronom. and Astrophys.* **293**, 746 (1995).
91. G. Mathys and T. Lanz, *Astronom. and Astrophys.* **323**, 881 (1997).
92. G. Mathys, S. Hubrig, J. D. Landstreet, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **123**, 353 (1997).
93. G. Mathys and T. Lanz, *Astronom. and Astrophys.* **230**, 21 (1990).
94. T. Lanz and G. Mathys, *Astronom. and Astrophys.* **280**, 486 (1993).
95. G. Mathys, C. Stehl, S. Brilliant, and T. Lanz, *Astronom. and Astrophys.* **358**, 1151 (2000).
96. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **188**, 287 (1974).
97. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **193**, 699 (1974).
98. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **326**, 967 (1988).
99. J. D. Landstreet, P. K. Barker, D. A. Bohlender, and M. S. Jewison, *Astrophys. J.* **344**, 876 (1989).
100. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **352**, 5 (1990).
101. D. A. Bohlender and J. D. Landstreet, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **247**, 606 (1990).
102. J. D. Landstreet, *Astron. Astrophys. Rev.* **4**, 35 (1992).
103. D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson *Astronom. and Astrophys.* **269**, 355 (1993).
104. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **228**, 809 (1979).
105. I. B. Thompson and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **289**, L9 (1985).
106. D. A. Bohlender, D. N. Brown, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astrophys. J.* **323**, 325 (1987).
107. D. A. Bohlender and J. D. Landstreet, *Bull. Amer. Astr. Soc.* **21**, 1198 (1990).
108. F. G. Kopylova and I. I. Romanyuk, in *Proceed. of Internatinal Meeting "Stellar magnetism"*, Nizhnij Arkhyz, USSR, 1991, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Nauka, Saint Petersburg, 1992), p. 54.
109. I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and V. G. Shtol, in *Proceed. of Internatinal Meeting "Stellar magnetism"*, Nizhnij Arkhyz, USSR, 1991, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Nauka, Saint Petersburg, 1992), p. 57.
110. V. L. Khokhlova, D. V. Vasilchenko, V. V. Stepanov and I. I. Romanyuk, *Pis'ma Astronom. Zh.* **26**, 217 (2000).
111. S. I. Plachinda, *Izv. CrAO* **74**, 46 (1986).
112. Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, I. D. Naidenov and V. G. Shtol, *Astrofiz. issled. (Izv. SAO)*, **27**, 34 (1989).
113. G. A. Wade, V. G. Elkin, J. D. Landstreet, et al., *Astronom. and Astrophys.* **313**, 209 (1996).
114. G. A. Wade, D. A. Bohlender, D. N. Brown, et al., *Astronom. and Astrophys.* **320**, 172 (1997).
115. G. A. Wade, V. G. Elkin, J. D. Landstreet, and I. I. Romanyuk, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **297**, 748 (1997).

116. G. A. Wade, D. O. Kudryavtsev, J. D. Landstreet, et al., *Astronom. and Astrophys.* **355**, 1080 (2000).
117. V. G. Elkin, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk, *Pis'ma Astronom. Zh.* **28**, 195 (2002).
118. V. G. Elkin, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk, *Pis'ma Astronom. Zh.* **29**, 455 (2003).
119. D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, In *Proceed. of Intern. Meeting "Physics of magnetic stars"*, Nizhnij Arkhyz, Russia, 2006, Ed. by D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, (SAO RAN, Nizhnij Arkhyz, 2007), p.81.
120. T. Ryabchikova, O. Kochukhov, D. Kudryavtsev, et al., *Astronom. and Astrophys.* **445**, 47 (2006).
121. E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, T. A. Ryabchikova, and I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **63**, 128 (2008).
122. V. G. Elkin, D. W. Kurtz, G. Mathys, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **358**, 1100 (2005).
123. G. A. Chountonov, in *Proceed. of Intern. Meeting "Stellar Magnetic Fields"*, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1996, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (SAO RAN Nizhnij Arkhyz, 1997), p.229.
124. G. A. Chountonov and E. I. Perepelitsyn, in *Proceed. of Intern. Meeting "Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars"*, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1999, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (SAO RAN Nizhnij Arkhyz, 2000), p.255.
125. I. I. Romanyuk, V. E. Panchuk, N. E. Piskunov, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **62**, 26 (2007).
126. V. G. Elkin, G. Mathys, S. Hubrig, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **402**, 1883 (2010).
127. G. A. Wade, J-F Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **313**, 823 (2000).
128. G. A. Wade, J-F Donati, and J. D. Landstreet, *New Astron.*, **5**, 455 (2000).
129. G. A. Wade, *Peculiar Newsletter* **38**, 1 (2002).
130. S. Bagnulo, G. A. Wade, J-F Donati, et al., *Astronom. and Astrophys.* **369**, 889 (2001).
131. S. L. S. Shorlin, G. A. Wade, J-F Donati, et al., *Astronom. and Astrophys.* **392**, 637 (2002).
132. M. Auriere, J. Silvester, G. A. Wade, et al., *Peculiar Newsletter* **39**, 1 (2003).
133. Yu. V. Glagolevskij and G. A. Chountonov, *Astrophysics* **45**, 407 (2002).
134. M. Auriere, J. Silvester, G. A. Wade, *IAU Symp.* 224, Ed. by Yu. Zverko, J. Ziznovky, S. Adelman, W. W. Weiss, p.633 (2004).
135. M. Auriere, *EAS Publications Series* **9**, 105 (2003).
136. M. Auriere, G. A. Wade, J. Silvester, et al., *Astronom. and Astrophys.* **475**, 1053 (2007).
137. M. Auriere, G. A. Wade, F. Lignieres, and J. D. Landstreet, *Contrib. of Scalnate Pleso obs.* **38** 211 (2008).
138. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, G. Lo Curto, et al., *Astronom. and Astrophys.* **403**, 645 (2003).
139. S. Bagnulo, H. Hensberge, J. D. Landstreet, et al., *Astronom. and Astrophys.* **416**, 1149 (2004).
140. S. Hubrig, D. W. Kurtz, S. Bagnulo, et al., *Astronom. and Astrophys.* **415**, 661 (2004).
141. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, E. Mason, et al., *Astronom. and Astrophys.* **450**, 777 (2006).
142. S. Hubrig, P. North, M. Scholler, and G. Mathys, *Astron. Nachr.* **327**, 289 (2006).
143. S. Hubrig, T. Szeifert, M. Scholler, et al., *Astronom. and Astrophys.* **415**, 605 (2004).
144. S. Hubrig, N. Nesvacil, M. Scholler, et al., *Astronom. and Astrophys.* **440**, 37 (2005).
145. N. Nesvacil, S. Hubrig, and E. Jehin, *Astronom. and Astrophys.* **422**, 51 (2004).
146. S. Hubrig and N. Nesvacil, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **378**, 16 (2007).
147. J. D. Landstreet, J. Silaj, V. Andretta, et al., *Astronom. and Astrophys.* **481**, 465 (2008).
148. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **159**, 1001 (1970).
149. S. C. Wolff and R. J. Wolff, *Astrophys. J.* **160**, 1049 (1970).
150. M. J. Stifft, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **169**, 471 (1974).
151. M. Goosens, W. van Assche, R. Demoitie, and L. Gadeyne, *Astrophys. and Spa. Sci.* **83**, 213 (1982).
152. J. D. Landstreet and G. Mathys, *Astronom. and Astrophys.* **359**, 213 (2000).
153. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 25 (2003).
154. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Astrophysics* **49**, 218 (2006).
155. S. Bagnulo, *ASP Conf. Series* **248**, 287 (2001).
156. N. Piskunov, *ASP Conf. Series*, **248**, 293 (2001).
157. S. Bagnulo, M. Landolfi, G. Mathys, and M. Landi Degl'Innocenti, *Astronom. and Astrophys.* **358**, 929 (2000).
158. G. A. Wade, S. Bagnulo, O. Kochukhov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **374**, 265 (2001).
159. O. Kochukhov, S. Bagnulo, and P. S. Barklem, *Astrophys. J.* **578**, 75 (2002).
160. O. Kochukhov, S. Bagnulo, G.A. Wade, et al., *Astronom. and Astrophys.* **414**, 613 (2004).
161. N. E. Piskunov and O. Kochukhov, *Astronom. and Astrophys.* **381**, 736 (2001).
162. O. Kochukhov, N. Piskunov, I. Ilyin, et al., *Astronom. and Astrophys.* **389**, 420 (2002).
163. D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, *IAU Symp.* **259**, 411 (2009).
164. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, (in preparation)
165. O. Kochukhov and G. A. Wade, *Astronom. and Astrophys.* **513**, 13 (2010).
166. J-L. Leroy, S. Bagnulo, M. Landolfi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **284**, 174 (1994).
167. I. I. Romanyuk, *Doctoral Dissertation in Mathematics and Physics*, (SAO RAN, Nizhnij Arkhyz, 2004).
168. Yu. V. Glagolevskij, *Astronom. Zh.* **43**, 73 (1966).
169. K. Kodaira, *Astrophys. J.* **157**, 157 (1969).
170. N. Cramer and A. Maeder, *Astronom. and Astrophys.* **88**, 135 (1980).
171. N. Cramer and A. Maeder, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **41**, 111 (1980).

172. I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, and E. A. Semenko, *Astrophysical Bulletin* **64**, 239 (2009).
173. V. G. Klochkova and I. M. Kopylov, *Astronom. Zh.* **63**, 240 (1986).
174. Yu. V. Glagolevskij, V. G. Klochkova, and I. M. Kopylov, *Astronom. Zh.* **64**, 360 (1987).
175. S. Hubrig, P. North, and G. Mathys, *Astrophys. J.* **539**, 352 (2000).
176. O. Kochukhov and S. Bagnulo, *Astronom. and Astrophys.* **450**, 763 (2006).
177. S. Bagnulo, M. Landi Degl'Innocenti, M. Landolfi, and G. Mathys, *Astronom. and Astrophys.* **394**, 1023 (2002).
178. Yu. V. Glagolevskij and G. A. Chountonov, in *Proceed. of Intern. Meeting "Stellar Magnetic Fields"*, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1996, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (SAO RAN, Nizhnij Arkhyz, 1997), p.116.
179. Yu. V. Glagolevskij and G. A. Chountonov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 105 (1998).
180. G. A. Wade, D. Drouin, S. Bagnulo, et al., *Astronom. and Astrophys.* **442**, 31 (2005).
181. G. A. Wade, S. Bagnulo, D. Drouin, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **376**, 1145 (2007).
182. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, V. Andretta, et al., *Astronom. and Astrophys.* **470**, 685 (2007).
183. Z. Mikulasek, J. Krticka, G. W. Henry, et al., *Astronom. and Astrophys.* **485**, 585 (2008).

## MAIN-SEQUENCE MAGNETIC CP-STARS III. RESULTS OF MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS

I. I. Romanyuk

We present the third part of the survey of magnetic parameters of main-sequence magnetic CP-stars. We analyze the main definitions and terminology, basic data on the magnetic fields of CP-stars (catalogs, the history of the stellar magnetism research, the main observational results obtained over 60 years of studies). We describe the modern views on the properties of magnetic CP-stars (geometric structure, distribution of field strengths, magnetic field and rotation, magnetic field and energy distribution anomalies, and the evolutionary status of magnetic CP-stars). We conclude that the observational data mostly support the theory of the relict origin and evolution of magnetic fields of CP-stars.

Key words: *stars: magnetic field; stars: chemically peculiar*