

УДК 524.35-337

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ И РОДСТВЕННЫХ ИМ ЗВЕЗД. 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2016 ГОДА И АНАЛИЗ БЛИЖАЙШИХ ПЕРСПЕКТИВ

© 2017 И. И. Романюк*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 17 апреля 2017 года; принята в печать 8 июня 2017 года

Мы проанализировали более 90 работ в направлении «Магнитные поля и физические параметры химически пекулярных и родственных им звезд», опубликованных в основном в 2016 году. Главные итоги рассматриваемого периода следующие.

Продолжались поиски новых магнитных звезд. Много измерений выполнено на 6-м телескопе САО РАН, получены новые данные о магнетизме звезд в ассоциации Орион OB1. Начато систематическое изучение магнитных полей звезд с большими аномалиями в распределении энергии в континууме. Получены новые данные о сверхмедленных магнитных ротаторах — химически пекулярных звездах с периодами вращения годы и десятилетия.

Успешные наблюдения по поиску новых магнитных звезд выполнены среди объектов южного неба в Чили на спектрополяриметре FORS2 VLT.

Развивалось новое направление — изучение двойных магнитных звезд. В зависимости от соотношения масс и расстояния между компонентами может возникнуть взаимодействие с магнитосферой и, возможно, магнитное торможение. Изучение деталей этого процесса имеет важное значение для теории формирования звездных магнитных полей.

Продолжались поиски крупномасштабных, но слабых магнитных полей (величиной единицы и десятки Гс) у не СР-звезд. Найдены такие поля у Am-звезд. Не найдено полей у классических Be-звезд. Детально исследовались холодные звезды разных типов. У них найдены магнитные поля сложной структуры. Выполнялось их картирование, найдены изменения топологии поля на временах порядка нескольких лет.

Изучалась спектральная и фотометрическая переменность. Десятки новых потенциально магнитных звезд открыты в результате обзоров ASAS-3, Super WASP, Stereo и Kepler. На наноспутнике BRITe выполнены высокоточные наблюдения быстро осциллирующих звезд. Продолжались работы по исследованиям магнитной и фотометрической переменности белых карликов.

И, наконец, представлен обзор нескольких работ по экзопланетам, имеющим отношение к теме нашего исследования.

Ключевые слова: *звезды: химически пекулярные* — *звезды: магнитные поля*

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие значительно увеличилась эффективность наблюдений магнитных полей звезд и точность их определения. Магнитные измерения стали массовыми, резко возросло количество публикаций. Ежегодно проводится несколько международных конференций по этой теме. Исследования звездного магнетизма перестали быть уделом узкой группы специалистов, поэтому очевидной становится необходимость систематизации полученных результатов.

Поскольку остается определенная специфика в методике наблюдений и анализе полученных данных, не всегда имеющиеся сведения могут быть

адекватно оценены специалистами, не работающими в области магнитных измерений. С этой целью мы делаем ежегодный обзор важнейших полученных результатов. В работе [1] был опубликован обзор основных результатов 2014 года, а в работе [2] — результатов 2015 года. Как и ранее, нам хотелось-бы отметить очень важную работу издателя электронного журнала «A Peculiar Newsletter» Д-ра Лука Фоссати (Dr. Luca Fossati) по отслеживанию и публикации работ, индексированных в базе данных NASA ADS. Мы широко используем эти данные в нашей работе.

Рубрикация остается примерно такой же как в работах [1] и [2], с некоторыми очевидными изменениями: значительно уменьшилось количество методических статей; стало активнее развиваться

*E-mail: roman@sao.ru

направление по исследованию двойных магнитных звезд — это результат начала работы проекта BINAMICS; обнаружены очень слабые поля крупномасштабной структуры у звезд нескольких типов. Использовались те же телескопы, оборудование и методы обработки, что и в указанных предыдущих двух статьях. Все больше внимания уделяется спектрополяриметрическим исследованиям звезд с экзопланетами.

Проведено несколько международных конференций, на которых обсуждались результаты исследований магнитных и родственных им звезд. Ссылки на опубликованные доклады этих конференций помещены в соответствующих местах статьи.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

В рассматриваемом году особых методических достижений не было — ни в изготовлении новых телескопов и спектрополяриметров, ни в методике получения и анализа данных. Были опубликованы новые компьютерные программы и результаты расчетов, а также предложены проекты новых спектрополяриметров.

2.1. Приборы и методика наблюдений

В 2016 году наблюдения магнитных полей проводились на тех же приборах, что и в предыдущие 2 года. Это спектрополяриметры низкого разрешения FORS1/FORS2 (VLT ESO), умеренного разрешения ОЗСП (6-м телескоп БТА) и высокого разрешения HARPSol (ESO), ESPaDOnS (CFHT) и NARVAL (TBL). Описание этих инструментов приведено в работе [1].

Тем не менее новые проекты предлагаются. В работе [3] представлен расчет поляризационного модуля для волоконного спектрографа высокого разрешения для 6-м телескопа, показана его высокая световая эффективность.

Спектрограф умеренного разрешения рассчитан в работе [4]. Основу спектрографа составляет каскад последовательно расположенных объемных голографических решеток, каждая из которых формирует индивидуальный спектр с разрешающей силой около 6000 с шириной полосы пропускания 80 нм. Решетки обеспечивают центрирование каждого из сформированных ими спектральных диапазонов таким образом, чтобы обеспечить равномерное покрытие как можно более широкого диапазона длин волн. Обсуждаются достоинства и недостатки новой схемы спектрографа, а также астрономические задачи, для которых этот спектрограф может быть использован.

Для космической миссии Ageo в работе [5] предлагается спектрополяриметр, работающий в

области от 119 до 888 нм для определения магнитных полей по эффекту Зеемана. Основная проблема — создание эффективного поляриметра, работающего в широком диапазоне длин волн и в космосе. Авторы выбрали полихромную временную модуляцию для измерения всех 4-х параметров Стокса. Модулятор состоит из нескольких двупреломляющих пластинок из флюорида магния. Этот поляризационный модулятор следует за поляризационным расщепителем луча для анализа состояния света. После поляризационного анализа свет попадает в спектрограф высокого разрешения. Выполнена теоретическая оптимизация поляриметра и прибора в целом, а также сделаны первые лабораторные проверки этой концепции.

Чунтонов [6] описывает дихроичный анализатор круговой поляризации с двойным резателем изображений (по семь срезов на каждую поляризацию), разработанный для Основного звездного спектрографа 6-м телескопа БТА. Он предназначен для измерений магнитных полей звезд по эффекту Зеемана и представляет собой более совершенную версию по сравнению с анализаторами поляризации, использовавшимися ранее. Приведены его характеристики и оценки точности проводимых измерений.

В работе [7] приведена математическая модель орбитальных и наземных спектрографов скрещенной дисперсии. Представлены методика и алгоритм численного моделирования спектральной аппаратуры высокого разрешения. Приводятся результаты моделирования эшелле-спектрографов нового поколения, работа над созданием которых ведется в настоящее время. В качестве проверки алгоритмов построения математической модели даны результаты моделирования спектрографа НЭС 6-метрового телескопа БТА. Сравнение синтетических и реальных изображений спектров, получаемых на НЭС, свидетельствует о хорошем соответствии между построенной моделью и экспериментальными данными.

Пискунов [8] описывает ИК-спектрометр высокого разрешения для телескопа VLT. Запланирована модернизация работавшего ранее в ESO спектрометра CRISES. Для реализации этого проекта создан консорциум из нескольких университетов. В работе приведен план реконструкции. Спектрометр будет предназначен для изучения атмосфер планет в ближней ИК-области, поисков экзопланет вокруг холодных звезд.

2.2. Методика анализа данных

В этом разделе мы представим всего одну, но очень важную работу. Пискунов и Валенти [9] описывают усовершенствование созданного ими и широко используемого пакета программ The

Spectroscopy Made Easy (SME). Он стал особенно популярным для анализа звездных спектров, в котором используются большие объемы наблюдательных данных, в частности при исследовании экзопланет. SME значительно эволюционировал по сравнению с 1996 годом, когда он был впервые описан. Несмотря на то, что осталось много подводных камней, с которыми сталкиваются пользователи, сделаны большие усилия для улучшения работы SME. В работе описываются основные компоненты SME: уравнения состояния, непрозрачности и лучистый перенос; рассматривается анализ и процедура фиттинга, исследуются различные источники ошибок; описывается текущее состояние, представлены новые алгоритмы и методы, предлагаются наилучшие практические варианты использования этого пакета. Улучшения в SME: более надежные данные о линиях, новые модели атмосфер, что делает более реалистичными звездные спектры. Однако, во многих случаях систематические ошибки по-прежнему превосходят неточности измерений.

3. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ОВА-ЗВЕЗД ГП

Исследования показали, что примерно 10% горячих (ОВА)-звезд Главной последовательности имеют крупномасштабные магнитные поля достаточно простой топологии. В то же время, у более холодных (FGK) звезд с конвективными атмосферами структура поля сложнее. Методика исследований полей холодных звезд несколько отличается от применяемых для горячих звезд. Мы начинаем наш обзор с результатов исследования, полученных для горячих звезд. Регулярные наблюдения этих объектов выполняются практически только в 3–4-х обсерваториях, включая САО РАН.

3.1. Выделение новых химически пекулярных из нормальных А- и В-звезд

Измерения магнитных полей — достаточно сложная задача, требующая больших затрат наблюдательного времени крупных телескопов. Измерять все звезды подряд (как, например, это делается при изучении лучевых скоростей) абсолютно неэффективно, при существующих точностях измерений поле будет обнаружено в лучшем случае у единиц процентов наблюдаемых объектов.

Наибольшее количество магнитных звезд находят среди химически пекулярных (СР). В связи с этим логично искать магнитные звезды в первую очередь среди них. Мы вступили в эпоху, когда получены сведения о миллионах объектов, и надо

научиться выделять СР-звезды среди этого массива данных. Поэтому разработка способов такого выделения пекулярных звезд является актуальной задачей.

Химически пекулярные звезды находят всюду, уже и в Магеллановых облаках. Однако ранее не было работ, посвященных наблюдательным проявлениям этих объектов в новых очень больших обзорах, например, в ближнем ИК-обзоре 2MASS. Этот обзор распространяется на очень далекие области. Если будут найдены отличия СР-звезд от нормальных по каким-то параметрам, мы получим эффективный метод их выделения из общего массива объектов.

В работе [10] для анализа тщательно была выделена выборка нормальных (непекулярных) звезд с доступными астрометрическими данными, всего 639 объектов. Были также отобраны 622 СР-звезды. После учета покраснения были определены температуры и светимости, построены изохроны. Оказалось, что нет различия астрофизических параметров, полученных по данным ИК-обзора 2MASS и UVV-фотометрии Джонсона для нормальных и пекулярных звезд.

Более того, на диаграммах (цвет—цвет и цвет—звездная величина) нет статистически значимых отклонений. Таким образом, нет возможности обнаруживать новые СР-звезды только при помощи цветов обзора 2MASS. Также для всех СР-звезд были получены оценки эффективных температур.

3.2. Магнитные поля ОВА-звезд

Так как не удается найти критерии для массового выявления потенциально магнитных СР-звезд по фотометрическим данным, остается только детальное изучение индивидуальных спектров. Как правило, наблюдательный материал получается для скоплений и других звездных группировок. И магнитные звезды следует искать прежде всего среди объектов с явными аномалиями в распределении энергии в континууме, а также — среди имеющих многочисленные линии редкоземельных элементов в спектрах.

3.2.1. Поиск магнитных звезд, Ар- и Вр- звезды в скоплениях разного возраста

Одним из важных проектов, приведших к обнаружению большого количества новых магнитных звезд являлся проект MiMES (Magnetism in Massive Stars). Подробно он был описан в [1]. Проект был предложен в 2008 году и закончен в 2013. Работа [11] — первая из серии, в которой подводятся итоги проекта. Это наиболее крупный и успешный проект по исследованию магнетизма массивных звезд предпринимавшийся когда-либо ранее. В ходе его выполнения было получено

более 4800 циркулярно поляризованных спектров 560 ранних В- и О-звезд. Наблюдения проводились на ESPaDOnS (Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars), Narval и HARPSpol на 3.6-м телескопе в ESO (La Silla). В работе [11] представлены научная мотивация и цели, описывается выборка звезд, сделан обзор инструментов и методики обработки. Показано, что чувствительность метода позволяет определять поля величиной до 100 Гс на поверхности. Обсуждаются инструментальные проблемы.

Работа Романюка и др. [12] является продолжением исследований на 6-м телескопе САО РАН магнитных звезд в группировках разного возраста. Приводятся результаты измерений магнитного поля четырех химически пекулярных (CP) звезд — членов звездной ассоциации Орион OB1. Наблюдения выполнены с анализатором круговой поляризации. Все изученные звезды относятся к подклассу Вр-звезд с ослабленными линиями гелия. У трех из них (HD 35456, HD 36313 и HD 36526) канадским астрономом Э. Борра по наблюдениям с бальмеровским магнитометром ранее было найдено магнитное поле. HD 35881 с целью поиска магнитного поля наблюдалась впервые. Получены следующие результаты: 1) HD 35456 — магнитная звезда с пределами изменения продольного поля от +300 до +650 Гс с периодом 4.9506 суток; 2) HD 35881 — вероятно, новая магнитная звезда, продольный компонент поля меняется от -1 до $+1$ кГс с периодом 0.6998 суток, однако малое количество сильно уширенных вращением линий не позволяет выполнить точные измерения; 3) HD 36313 — двойная звезда с близкими по блеску компонентами, главный компонент — магнитная звезда с очень широкими линиями, магнитное поле у вторичного компонента (звезды с узкими линиями) найти не удалось. Измерения по линии водорода $H\beta$ показали изменение продольной компоненты от -1.5 до $+2$ кГс с периодом 1.17862 суток; 4) у звезды HD 36526 найдено сильное продольное поле (от 0 до +3000 Гс), меняющееся с периодом вращения звезды 3.081 суток. Во всех случаях наблюдаются существенные расхождения с ранее полученными оценками магнитных полей этих объектов.

В работе [13] этой же группы обобщены результаты исследований магнитных полей CP-звезд — членов различных группировок. Авторами для наблюдений на 6-м телескопе было отобрано 17 звездных скоплений и ассоциаций разного возраста. Наибольшее количество CP-звезд — 85 — содержится в ассоциации молодых звезд Орион OB1. Наблюдательный материал — спектры с анализатором круговой поляризации — получен для всех объектов, проводится его обработка. В качестве примера приводятся результаты

исследований обнаруженной авторами уникальной двойной магнитной звезды HD 34736, обладающей очень сильным магнитным полем сложной конфигурации.

О результатах выполнения программы поисков магнитных звезд на 6-м телескопе сообщают Романюк и др. [14].

Анализируются наблюдения 2009 года. В статье представлены оценки продольного магнитного поля (B_e), скорости вращения ($v \sin i$) и лучевой скорости (V_r) для 44 звезд. Магнитное поле CP-звезд HD 5441, HD 199180, HD 225627, BD +00.4535 обнаружено впервые. Установлено, что для одних и тех же звезд продольное поле B_e , измеренное по ядру линии водорода $H\beta$ и по линиям металлов, может отличаться на величину от 10% до 2–3 раз. За редким исключением, измеренное по линиям металлов магнитное поле сильнее. Авторы считают, что эффект имеет физическую природу: зависит от топологии магнитного поля и физических условий в конкретной звезде. Наблюдения стандартных звезд без магнитного поля подтверждают отсутствие систематических ошибок, способных внести искажения в результаты измерений. В статье даны комментарии к результатам для каждой из звезд.

В еще одной работе [15], выполненной на 6-м телескопе, исследована HD 5601. Это химически пекулярная звезда с сильной депрессией континуума на 5200 Å и усиленными линиями кремния в спектре. Авторы обнаружили у нее сильное магнитное поле. Продольный компонент поля B_e имеет отрицательную полярность и меняется от -300 до -2000 Гс с периодом 1.756 суток. С таким же периодом происходят фотометрические изменения блеска. Обнаружена переменность лучевой скорости на временах порядка десятков лет, указывающая на возможную двойственность объекта. Построена магнитная модель звезды. Определены углы наклона оси ее вращения к лучу зрения $i = 20^\circ$, и оси диполя к оси вращения $\beta = 116^\circ$, а также величина поля на полюсе $B_p = 10$ кГс. У звезды обнаружен дефицит гелия почти на порядок величины, избыток кремния и металлов более чем на порядок, в частности, кобальта — на три порядка величины.

Знакомимся с результатами полученных в наблюдениях на южном небе, выполненных в Чили.

В работе [16] сообщается об обнаружении новой магнитной звезды с очень сильным полем CPD –622124. Спектрополяриметрия выполнена на FORS2 и HARPSpol и независимые команды провели обработку данных. Авторы [16] приходят к заключению, что величина продольного поля достигает величины 5.2 кГс. Поле, полученное методом LSD, несколько меньше -4.5 кГс. Найдены параметры атмосферы $T_e = 23\,650 \pm 250$ К,

$\log g = 3.95 \pm 0.10$ dex. Содержание металлов солнечное, за исключением Mg, Si и S, которое слегка отличается от солнечного. Широкая (300 км с^{-1}) эмиссия в $H\alpha$ свидетельствует о центробежной магнитосфере. Таким образом, CPD –62 2124 — звезда обладающая одним из наиболее сильных магнитных полей.

Шоллер и др. [17] подводят итоги выполнения программы «B fields in OB stars» (BOB). Были проведены наблюдения с низким разрешением на 8-м телескопе FORS2 ESO VLT. Найдены новые магнитные звезды CPD-57 3509, CPD-62 2124 и HD 164492C. Подтверждено наличие поля у HD 54879. Было получено, что доля магнитных звезд составляет от 3% до 9% от всей выборки из 69 звезд, наблюдавшихся на FORS2. Если взять только медленные ротаторы с $v \sin i < 60 \text{ км с}^{-1}$, то среди них то доля магнитных — примерно 5%.

В статье [18] сообщается об обнаружении магнитного поля у звезды с усиленными линиями гелия CPD –57 3509 (B2 IV) — члена рассеянного скопления NGC 3293. Определены фундаментальные параметры звезды. Спектрополяриметрические наблюдения выполнялись на FORS2 и HARPSpol. Для анализа использовались два независимых подхода, в результате было найдено продольное поле с максимальной амплитудой B_e порядка 1 кГс. При дипольной конфигурации поле на полюсе диполя должно быть больше 3.3 кГс. Звезда — быстрый ротатор: период вращения менее 1 суток. Так как $v \sin i = 35 \text{ км с}^{-1}$, это означает малую величину угла i . Масса звезды около 9.5 солнечных, радиус 5 солнечных, возраст — 13 млн лет — определен по возрасту скопления. CPD –57 3509 — одна из наиболее проэволюционировавших звезд с усиленными линиями гелия которые известны. Возраст надежно определен по возрасту скопления.

3.2.2. Сверхмедленные магнитные ротаторы

Исследования, выполненные в последние 2 десятилетия, показали, что около 10% всех магнитных CP-звезд имеют очень узкие линии, по которым можно найти расщепленные зеемановские компоненты. Часть из этих объектов — сверхмедленные магнитные ротаторы с периодом вращения годы и десятилетия. Систематическим изучением звезд с расщепленными на зеемановские компоненты линиями на протяжении многих лет занимается Гаутье Матис.

В 2016 году им была опубликована очень большая фундаментальная работа [19]. В ней представлены результаты изучения магнитных полей и других параметров всех найденных к настоящему времени (в основном автором) звезд с расщепленными

зеемановскими компонентами спектральных линий. Это изучение базируется на измерениях среднего модуля магнитного поля, среднего продольного магнитного поля, кроссовера, среднего квадратического магнитного поля и лучевой скорости для 43 звезд, определение указанных величин для которых выполнено непосредственно автором и еще дополнительно для 41 звезды, сведения о параметрах которых взяты в литературе. Большинство звезд с расщепленными линиями — это медленные ротаторы, их рассмотрение позволяет по новому взглянуть на долгопериодический «хвост» в распределении периодов Ар-звезд. Корреляция между периодами вращения и магнитными свойствами представляет собой важный ключ для понимания механизмов торможения, который имел место на ранних стадиях звездной эволюции. Геометрическая структура магнитных полей Ар-звезд с магнитно-расщепленными в целом отличается от центрально дипольной, но не экстремально сильно. Однако, имеется несколько важных исключений, которые нуждаются в дальнейшем рассмотрении. Автор [19] предполагает, что у некоторых звезд наблюдается пульсационный кроссовер. Подтверждение этого предположения откроет дверь к изучению нерадиальных пульсационных мод степени ℓ , слишком высоких для фотометрических и спектральных наблюдений. Среди двойных звезд, содержащих Ар-компонент с магнитно-расщепленными линиями, отсутствуют системы с короткими орбитальными периодами. Существование корреляции между периодами вращения и обращения в двойной системе поддерживает теорию слияния при рождении Ар-звезд.

Для многих медленных ротаторов выполнены лишь эпизодические наблюдения. Но для построения магнитной модели такой звезды необходимы многолетние наблюдения, позволяющие найти период ее вращения. В работе [20] исследуется звезда с расщепленными зеемановскими компонентами HD 18078. Наблюдения были выполнены в Южной европейской обсерватории и в САО РАН на 6-м телескопе в период с 1990 по 2005 гг. Был найден период вращения HD 18078 $P = 1358 \pm 12$ days. Геометрическая структура поля согласуется с дипольной, при этом ось диполя не проходит через центр звезды. Таким образом, HD 18078 является только пятой звездой с периодом вращения более 1000 суток, период которой был точно определен. Сильная ангармоничность переменности продольного поля B_e и взаимный сдвиг экстремумов продольного и поперечного поля являются исключительными и свидетельствует о весьма необычной магнитной структуре звезды.

Продолжается мониторинг магнитного поля звезды с расщепленными зеемановскими компонентами HD 965 [21]. Наблюдения, которые

выполняются на 6-м телескопе уже более 15 лет, показывают, что звезда является сверхмедленным ротатором. Период ее вращения еще не найден, но явно видно, что он превышает 20 лет. Кривая переменности продольной компоненты поля B_e несколько ангармонична, что может указывать на достаточно сложную структуру магнитного поля звезды. Модель поля можно будет построить, когда будет получена полная кривая B_e .

3.2.3. Двойные магнитные звезды

В последнее время появился ряд работ, в которых исследуется связь между магнетизмом CP-звезд и их двойственностью. Гипотеза реликтового поля этих объектов является преобладающей. Влияние магнитного поля зависит от температуры звезды. С одной стороны, в A-звездах магнитное поле воздействует только на верхние слои атмосферы, создавая сильные химические пекулярности и стратификацию. В O- и горячих B-звездах магнитные поля образуют сложную и очень динамичную магнитосферу внутри нескольких звездных радиусов и могут даже существенно изменить процессы перемешивания. Магнитное поле влияет также и на угловой момент, для ряда звезд видно замедление вращения. Статистически надежно показано, что магнитные звезды вращаются медленнее немагнитных.

Присутствие компаньона должно влиять на эволюцию звезды. В первоначально эксцентрической двойной несинхронизованной системе с непараллельными осями вращения компонент — произойдет циркуляризация орбит, синхронизации системы согласования осей вращения. В случае, если компаньон разделен всего на несколько радиусов, то в зависимости от соотношения их масс может возникнуть взаимодействие с магнитосферой, с ветром, может возникнуть магнитное торможение.

Для изучения взаимодействия полей в двойных системах и его влияния на структуру, окружение и эволюцию звезды был предложен проект BINAMICS [22].

В рамках проекта в обозреваемый нами период было выполнено и опубликовано несколько работ по исследованию связи между двойственностью и магнетизмом.

Алециан и др. [23] выбрали для изучения SB2 звезду HD 5550. В наблюдениях на NARVAL (TBL) было проведено 25 спектрополяриметрических наблюдений с высоким разрешением. Была применена стандартная методика анализа данных — LIBRE ESPRIT. Сначала были проанализированы спектры интенсивности. В результате были определены эффективная температура, микротурбулентная скорость и содержание некоторых химических элементов. Затем авторы применили LSD-методику анализа интенсивности

и циркулярной поляризации в спектрах обеих компонент. Было найдено, что главный компонент является магнитной Ap-звездой с величиной поля на полюсе 65 ± 20 Гс. Вторичный компонент имеет все характеристики Am-звезды, верхний предел магнитного поля 40 Гс. Период вращения звезды (около 6.8 суток) очень близок к орбитальному периоду системы. Продольное магнитное поле B_e имеет отрицательную полярность и меняется от -13 до -26 Гс с типичной ошибкой ± 4 Гс, в статье приводится только периодограмма (по которой нашли период), а самой кривой нет. Наличие такого поля ставит под сомнение «магнитную пустыню».

С другой стороны — Ap-компонент HD 5550 имеет более высокую температуру ($11\,400$ К) по сравнению со звездами изученными ранее Орьером и др. [24, 25]. Возможно нижний предел поля в 100 Гс существует только для звезд холоднее $10\,000$ К, а при повышении температуры он размывается. Похоже, что система синхронизовалась, период вращения главного компонента совпадает с орбитальным периодом, а ось вращения и орбитальная ось одинаково ориентированы. Согласно теоретическим работам последних лет достаточно тесные двойные системы могут сформироваться только в слабо замагниченном облаке, сильное поле уменьшает фрагментацию и затрудняет их образование. Авторы работы [23] приводят много очень полезных ссылок на работы, касающиеся влияния магнитного поля на эволюцию звезд.

В работе [26] изучено магнитное поле иерархически тройной системы HD 35502, главным компонентом которой является магнитная звезда. Наблюдения проводились в течение 5 лет разными методами на разных телескопах. Представляется кратка сводка. Спектрополяриметрия выполнена на DimaPol (24 спектра с разрешением $R = 10\,000$). 32 неполяризованных спектра получены на FEROS ($R = 48\,000$) 2.2-м телескопа LaSilla, Чили. Кроме того, на спектрополяриметрах высокого разрешения получено: на ESPADONS CFHT (10 спектров) и Narval BLT (19 спектров). Было выявлено, что HD 35502 — спектроскопически тройная звезда. Главный компонент — магнитная звезда с эффективной температурой $18\,400 \pm 600$ К, масса 5.7 ± 0.6 солнечных и полярный радиус около 3 солнечных. Два вторичных компонента — практически одинаковые A-звезды с эффективными температурами $8\,900 \pm 300$ К, массами 2.1 ± 0.2 солнечных и радиусами 2.1 ± 0.4 солнечных. Орбитальная система — иерархическая, в которой вторичные двойные образуют близкую систему с орбитальным периодом 5.668 суток, в то время как их обращение вокруг главного компонента происходит с периодом около 40 лет. В LSD-профилях наблюдаются

явные признаки V-профиля Стокса, что указывает, на измеряемое магнитное поле В-звезды от -4 кГс до 0 кГс с медианной неопределенностью 0.4 кГс. Переменность продольной компоненты поля происходит по синусоидальному закону, его оценки хорошо совпадают для всех трех источников данных. Величина продольного поля B_e измерялась по разным элементам и все оценки согласуются, кроме полученного по железу. Поле B_e по линиям железа меняется от -2 до $+2$ кГс. Эти измерения вместе с переменностью, вызванной сильной эмиссией в $H\alpha$, были использованы для определения периода вращения звезды, который оказался равен 0.853807 d. Авторы нашли, что $v \sin i = 75 \pm 5$ км с $^{-1}$ для В-звезды. Это означает угол $i = 24^\circ$, $\beta = 63^\circ$, поле на полюсе $B_p = 14$ кГс. По их вычислениям Алвенский радиус В-звезды составляет 41 солнечных, а Кеплеровский — 2.1 солнечных. Делается заключение, что В-звезда находится в режиме центробежной магнитосферы.

За Кеплеровский радиус принимается такой, на котором достигается баланс между силами гравитации и центробежными. Алвенский радиус характеризует точку, внутри которой магнитное поле доминирует над ветром. Если $R(A)/R(K) < 1$ — магнитосфера динамическая, а если $R(A)/R(K) > 1$, центробежная.

Ландстрит и др. [27] обнаружили магнитную короткопериодическую SB2 систему BD-19 5044L. Это CP-звезда, которая является одновременно членом двойной системы и членом рассеянного звездного скопления IC 4725 = M-25. Она принадлежит короткопериодической двойной системе ($P = 17.63$ сут) с достаточно большим эксцентриситетом ($e = 0.477$). Спектрополяриметрические наблюдения были выполнены на ESPaDOoS (CFHT). Главный компонент — магнитная звезда с переменным продольным полем. Моделирование показывает, что поле на полюсе диполя равно 1400 Гс и угол наклона малый. Вторичный компонент — горячая Am-звезда, магнитное поле которой не обнаружено. Период вращения главного компонента 5.04 суток, не синхронизован с орбитальным. Расстояние между компонентами в периастре составляет примерно 12 радиусов главной звезды. Это очень редкий случай тесно взаимодействующей SB2 системы, содержащей магнитную Ap/Vp звезду.

Семенко [28] представил результаты изучения магнитного поля и физических параметров двух кратных систем — HD 6757 и HD 96003. Иерархическая кратная (как минимум, тройная) система HD 6757 обладает сильным полем, продольный компонент которого превышает 2 кГс. HD 96003

обладает слабым полем с продольным компонентом не более 250 Гс. Похоже, что эта система представляет собой широкую пару.

В работе [29] представлены результаты определения магнитного поля, фундаментальных параметров и химического состава 4-х новых магнитных звезд: HD 2887, HD 5601, HD 19712, HD 27404. Все объекты имеют большие депрессии континуума на 5200 Å. Эффективные температуры объектов находятся в пределах от 9000 до 10000 К, обнаружены магнитные поля у каждого из объектов. Величина продольного поля не превосходит 2 кГс. Магнитная кривая HD 27404 имеет сложную ангармоничную форму.

Разработана новая программа для обработки спектров, полученных с зеемановским анализатором на 6-м телескопе. Ее краткое описание дано в статье [30]. Реализованы классический метод измерений Бэбкока, метод LSD и метод корреляций.

Лиска [31] провел подробные исследования ϕ Dra — яркой кратной звездной системы. Главный компонент является пекулярной A-звездой. Определены орбитальные периоды двух других звезд. Найдено, что компоненты AB имеют период 308 лет, компоненты Aab — период 128 суток.

3.3. Поиски крупномасштабных слабых полей горячих не Ap/Vp-звезд

В статье [32] описывается большая программа BRITE — спектрополяриметрический обзор всех звезд ярче 4-й величины (573 объекта) с использованием Narval (TBL), ESPaDOoS (CFHT), и HarpsPol (ESO) как наземной поддержки для наноспутника BRITE. Цель программы измерения магнитных полей объектов BRITE и получение для всех звезд спектров высокого разрешения и высокого качества, обзор близок к завершению. Уже удалось обнаружить 42 новых магнитных звезды и подтвердить несколько более ранних открытий. Проведены продолжительные наблюдения примерно дюжины из этих магнитных звезд, что позволило найти характеристики их магнитных конфигураций и величину магнитного поля.

Вайд и др. [33] дают интерпретацию результатов фотометрии BRITE для спектральных классов позже B2. Магнитное поле стабилизирует атмосферные движения и приводит к накоплению химических элементов и появлению особенностей в их обилии и распределении. У звезд более ранних спектральных классов поле канализирует звездный ветер, затрудняя плазме ветра образование сложных коротационных магнитосфер. Некоторые магнитные звезды расположены в тесных двойных системах, фотометрическая переменность которых вызвана затмениями, тесным взаимодействием и

потенциально влиянием переноса массы и энергии. Наконец, некоторые магнитные В-звезды размещены в полосе нестабильности и имеют пульсации типа β Сер и SPB.

Очень слабые зеемановские характерные особенности необычной формы были обнаружены при анализе поляризованных спектров двух звезд с усиленными линиями металлов β Ursae Majoris и Θ Leonis [34]. Серия спектрополяриметрических наблюдений с очень высоким отношением S/N была получена на спектрополяриметре NARVAL (BLT France). Все спектры были проанализированы методом мультилинейной LSD процедуры. Для улучшения отношения Сигнал/Шум и получения возможности детектирования слабых особенностей V-параметра Стокса были сложены все доступные спектры обеих звезд (более 150 для каждой). Авторы [34] обнаружили, что профили круговой поляризации имеют ту же особенность, которая ранее была обнаружена для Сириуса — некий горб положительной поляризации [35]. Эти новые обнаружения свидетельствуют о том, что магнитные поля присутствуют у значительной доли звезд промежуточных масс. Сильно асимметричные профили зеемановских особенностей, найденные у двух Am-звезд (с доминированием одной полярности), не описываются стандартной теорией эффекта Зеемана и могут быть связаны с вертикальными градиентами скорости и величины магнитного поля.

Еще одна работа [36] посвящена поиску очень слабых магнитных полей у Am-звезд. Обнаружено слабое магнитное поле у очень яркой звезды γ Gem (Alhena). Ранее очень слабое (порядка 1 Гс) магнитное поле было найдено у трех Am-звезд: Sirius A, β UMa и Θ Leo (см. предыдущую работу [34]). Детально описан магнитный анализ — он аналогичен более ранним работам. Наблюдения проводились на NARVAL. Поле имеет величину несколько Гс с типичными зеемановскими особенностями — есть положительная и отрицательная полуволна V-параметра Стокса. Три измерения на протяжении двух лет дали величину продольного поля около -5 Гс. Нет оснований сомневаться в том, что поле существует. Таким образом, найдено, что Am-звезды имеют поля порядка единиц Гс.

Фоссати и др. [37] нашли доказательства распада магнитного поля CP-звезд на Главной последовательности. Авторы скомпилировали каталог из 389 массивных звезд ГП, из них 61 магнитная, и определили их фундаментальные параметры и возраста. Составили две выборки: магнитные и немагнитные звезды. Обе выборки содержат объекты ярче 9 величины V, с интервалами масс от 5 до 100 солнечных. Было найдено, что относительный возраст всех рассматриваемых звезд распределен

так, как и ожидалось для ограниченной по звездной величине выборки, в то время как для магнитных звезд он явно уменьшается к краю ГП. Этот недостаток старых магнитных звезд не зависит от выбора треков звездной эволюции и проявляется еще заметнее, когда рассматриваются только самые массивные звезды. Авторы показывают, что тенденция к уменьшению в распределении является существенно более сильной, чем ожидается из сохранения магнитного потока. Fossati и др. [37] также обнаружили, что «омоложение» в двойных системах и подавление конвекции в ядре магнитным полем вряд-ли могут объяснить наблюдаемый недостаток более старых магнитных звезд. Делается заключение, что самой вероятной причиной является распад магнитного поля за время большее, чем время жизни наименее массивных из рассматриваемых звезд, и меньшее для наибольших масс. Рассмотрен вопрос о возрасте медленно вращающихся магнитных звезд по замедлению вращения. Фоссати и др. нашли, что он превышает звездный возраст во многих случаях. Большая доля очень медленно вращающихся магнитных звезд является независимым аргументом распада магнитного поля.

Одним из больших направлений исследований в обзоре MiMeS было проведение наблюдений с анализатором циркулярной поляризации 85 классических Ве-звезд с целью поиска магнитного поля на их поверхности [38]. Ни для одной из них не найдено указаний на присутствие магнитного поля в отличие от значимого числа обнаружений поля (5–10%) у не Ве-звезд ГП.

Статья [39] является методическим приложением к предыдущей работе. В ней описываются свойства указанной выше выборки 85 Ве-звезд, методика наблюдений и анализа данных, качество наблюдательного материала.

В работе [40] представлены результаты 6 ночей наблюдений на спектрополяриметре ESPaDOnS (CFHT) звезды с усиленными линиями гелия спектрального класса B1 ALS 3694. Во всех 6 наблюдениях продольное поле было величиной около 2 кГс, примерно постоянное, без изменения знака полярности. Зарегистрированная во все ночи линия $H\alpha$ показывает переменность эмиссии. Эмиссию авторы интерпретируют как доказательство наличия центробежной магнитосферы.

Магнитные поля величиной от нескольких кГс до сотен МГс обнаружены у нескольких сотен белых карликов. Только некоторые из них имеют поля слабее 1 МГс. В работе [41], по наблюдениям на телескопах Canada-France-Hawaii telescope, the William Herschel Telescope (WHT), the European Southern Observatory, и CAO РАН авторы обнаружили магнитный белый карлик LTT 16093 = WD 2047+372 со средним полем 57 кГс. Это третий

из достоверно обнаруженных магнитных карликов со слабым полем.

В работе [42] исследуются химические пятна на поверхности звезды типа Ae Хербига HD 101412, обладающей сильным магнитным полем. Звезда имеет период вращения 42 суток. Поляризованные спектры HD 101412 с высоким разрешением получены на HARPS в несколько эпох. Найдена спектральная переменность с фазой периода вращения. Однако, в отличие от линий Mg, Si, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, и Sr со схожим и синхронным характером переменности профилей, интенсивность линий гелия меняется в противофазе с ними. Проведены измерения поля по выборкам линий трех элементов Ti, Cr и Fe, имеющим наиболее многочисленные линии в спектре. Найдено, что продольное поле B_e меняет знак с периодом вращения. Элементы железного пика концентрируются в области магнитного экватора.

Для исследования наличия магнитных полей у звезд типа Вольфа-Райе Хубриг и др. [43] отобрали несколько таких звезд в Галактике и одну — в Большом Магеллановом облаке. Наблюдения проводились на FORS 2 на протяжении двух ночей. У звезды WR6 найдено поле ($\langle B_z \rangle = 258 \pm 78$ Гс). Среди других объектов наибольшая величина продольного магнитного поля $\langle B_z \rangle = 327 \pm 141$ Гс, зарегистрирована у объекта BAT 997 из БМО. Изменения продольного поля WR6 соответствуют синусоидальному закону с известным ранее периодом 3.33 суток, существенно увеличивая надежность обнаружения. Переменность линейной поляризации на протяжении 2-х ночей не зарегистрирована.

В работе [44] продолжена интерпретация наблюдений Ae-звезды HD 101412. Было получено и проанализировано 30 ИК-спектров в области попадания линий He I 10830 и Pa- γ , которые формируются в области аккреции. Авторы нашли модуляцию, обусловленную вращением, с периодом около 20.5 суток, что соответствует примерно половине 42-дневного периода магнитной переменности. Это значит, что материя падает на звезду в областях, близких к магнитным полюсам.

Среди ранних В-звезд наибольшие поля крупномасштабной структуры имеют Вр-звезды типа He-rich. Топология поля преимущественно дипольная. Так как несколько лет назад у одной из таких звезд, HD 96446, нашли пульсации типа β Cep, авторы работы [45] решили провести достаточно длительные спектрополяриметрические наблюдения звезды. В результате наблюдений было найдено, что во всех фазах периода продольное поле имеет отрицательную полярность и изменяется от -800 до -1200 Гс с периодом вращения 23.38 сут. Поле на полюсе $B_p = 4$ кГс.

4. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ У ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД

Другое активно развиваемое направление исследований звездного магнетизма — это поиск и анализ магнитных полей холодных звезд. Так как поля, обнаруженные у этих объектов, имеют значительно более сложную топологию, чем у рассмотренных ранее горячих звезд, имеются и значительные отличия в методике их анализа. Поэтому магнитные поля холодных звезд мы рассматриваем отдельно. Исследования возможны только с использованием спектрополяриметрии высокого разрешения.

При прохождении пробела Герцшпрунга у звезд промежуточных масс развивается конвективная оболочка. Ожидается, что во время этой эволюционной фазы быстрые ротаторы ГП или потомки Ар-звезд становятся активными субгигантами. Для решения вопроса о происхождении магнетизма и высокой активности у двух активных быстровращающихся красных гигантов, имеющих примерно одинаковые массы и спектральные классы, но разные периоды вращения: OU And ($P_{\text{rot}} = 24.2$ d) и 31 Com ($P_{\text{rot}} = 6.8$ d), авторы работы [46] сравнили магнитные поля на поверхности и индикаторы активности этих объектов.

Наблюдения проводились на спектрополяриметре NARVAL (BLT, Pic du Midi, France). Данные, полученные в 2008 и 2013 гг., были обработаны с использованием метода LSD для экстракции профилей I и V параметров Стокса с высоким отношением Сигнал/Шум для нахождения земановских особенностей магнитного поля. Далее авторы применили целый комплекс различных методов (Зееман-Допплеровское картирование, мониторинг индикаторов активности) и точно определили физические параметры звезды. Использовались также ультрасовременные модели звездной эволюции, учитывающие вращение на Главной последовательности, что позволило интерпретировать результаты наблюдений применяя теоретические числа Россби.

Результаты были следующими. У OU And было найдено магнитное поле, продольная компонента которого достигает 40 Гс и меняется по синусоидальному закону с переменной полярностью. Магнитное поле этой звезды имеет крупномасштабную структуру с преимущественным вкладом полоидального поля и существенной дипольной компонентой. Имеется также заметная тороидальная компонента. У 31 Com магнитное поле тоже обнаружено, но оно слабее, и согласно магнитной карте более сложной топологии. Полоидальная и тороидальная компоненты вносят равный вклад. Эволюционные модели свидетельствуют, что предшественники OU And и 31 Com должны были вращаться со скоростями, составляющими 30% и

53%, соответственно, критической скорости вращения на начальной главной последовательности. Обе звезды OU And и 31 Com имеют одинаковые массы (2.7 и $2.85 M_{\odot}$), и они обе находятся в пробеле Герцшпрунга. Выводы: OU And, по-видимому, является потомком магнитной Ар-звезды, а 31 Com — потомком относительно быстрого ротатора ГП. Поскольку вращение в пробеле Герцшпрунга быстрое, это приводит к появлению конвективной оболочки и работе динамо.

В работе [47] изучалась Бетельгейзе — М-сверхгигант с огромными пятнами и гранулами на поверхности. Ранее авторы нашли линейно-поляризованные особенности в спектрах холодных проэволюционировавших звезд и решили посмотреть — имеются ли подобные поляризованные детали у Бетельгейзе. Наблюдательный материал с очень высоким отношением С/Ш был получен на спектрополяриметре NARVAL. При обработке использовалось LSD-приближение и получен средний линейно поляризованный профиль. Было обнаружено, что у Бетельгейзе имеется линейная поляризация. Она оказалась достаточно сильной (несколько сотых долей процента) как в отдельных линиях, так и в LSD-профиле в целом. Изучая ее свойства, а также сигнал, полученный в резонансных линиях натрия D1 и D2, авторы [47] пришли к выводу, что в основном наблюдается деполяризация континуума линиями поглощения. Линейная поляризация в континууме Бетельгейзе возникает из-за анизотропии поля излучения, индуцируемого пятнами яркости на поверхности и Релеевским рассеянием в атмосфере. Для объяснения наблюдаемой поляризации разработана геометрическая модель в которой определяется наличие двух пятен яркости и их положение на поверхности Бетельгейзе, что позволяет составить карту пятен яркости. Поскольку наблюдения продолжались 1.4 года авторы изучили эволюцию пятен и атмосферы.

Скорости вращения на поверхности для молодых звезд солнечного типа очень быстро меняются — от конца стадии, предшествующей ГП, до ГП — и ранней ГП. Важные изменения в работе динамо могут быть результатом этой эволюции, которая должна быть наблюдаемой в поверхностных магнитных полях. В статье [48] приводятся результаты работы по наблюдениям эволюции магнитных полей в этот критический период времени. Для изучения этого процесса было проведено исследование эволюции магнитных полей у молодых звезд солнечного типа. Авторы указанной работы наблюдали звезды в рассеянных скоплениях и использовали метод зееман-доплеровского картирования (ZDI) для исследования сложных полей крупномасштабной структуры.

Проведен анализ данных для 15 звезд из 4-х ассоциаций с возрастом от 20 до 250 миллионов

лет, массами от 0.7 до 1.2 солнечных и периодом вращения от 0.4 до 6 суток. Авторы работы [48] нашли поле сложной глобальной со средним глобальным значением от 14 до 140 Гс. Виден ясный четкий тренд в направлении уменьшения величины среднего крупномасштабного поля с возрастом, и тесная корреляция между величиной магнитного поля и числом Россби. Сравнивая магнитные свойства своей выборки звезд ГП нулевого возраста с более молодыми и старыми объектами, авторы показали, что магнитная эволюция звезд солнечного типа до выхода на ГП преимущественно управляется структурными изменениями их внутренних областей.

Методы Zeeman Doppler Imaging (ZDI) используют для изучения широкого круга звезд. Если наблюдать в разные эпохи, то можно попытаться найти изменения в структуре крупномасштабного поля. В статье [49] авторы проверяют магнитные свойства звезд с известным периодом вращения, определенным по хромосферным линиям. Они нашли некоторые доказательства того, что звезды в активной фазе имеют существенное тороидальное поле, которое значительно изменяется, в то время как при низкой активности — оно имеет преимущественно полоидальное поле. Это подтверждает идею, что на каждой ветви работают разные вращающиеся слои, а также является доказательством того, что быстрые переключения полярности характерны для неактивной фазы, в то время, как более длинный, определенный по хромосферным линиям период — характеризует активную фазу. Таким образом можно объяснить рассогласование между магнитным и хромосферным циклами, найденными для некоторых звезд. Результаты работы — это первая попытка найти связь между свойствами глобального магнитного поля определенного из ZDI и циклами активности.

Видотто и др. [50] исследовали влияние магнитного поля на отношение «потеря массы — рентгеновский поток» для солнцеподобных карликов: смогут ли значительные изменения топологии магнитного поля препятствовать генерации звездного ветра. Каких-либо подтверждений значимых различий характеристик дипольного поля у активных и неактивных звезд не обнаружено.

В работе [51] выполнены детальные исследования богатой азотом звезды dzeta Cas. Для изучения магнитного поля и его топологии получено 82 наблюдения со спектрополяриметром NARVAL. Обработка проводилась методом LSD. У dzeta Cas было найдено поле на полюсе 100–150 Гс. Это наиболее слабое поле, обнаруженное у массивной звезды ГП. Дифференциальное вращение поверхности исключено, согласно теории, магнитное поле звезды достаточно сильно из-за твердотельного внутреннего вращения в радиационных зонах.

Поэтому, звезда вращается, как твердое тело в оболочке. Авторы исключают перемешивание, вызванное вращением, как причину повышения содержания азота. Обсуждается перенос химических элементов от ядра на поверхность с внутренними гравитационными волнами.

Цветкова и др. [52] изучали магнитную активность позднего гиганта 37 Com, которая относится к классу звезд с ослабленной G-band полосой — с большим дефицитом углерода. Указанная работа — часть глобального исследования свойств и формирования магнитного поля холодных гигантов. Использовались спектрополяриметрические данные, одновременно измерялось продольное поле, индикаторы активности линий и лучевая скорость. Использовался метод LSD, реконструкция карт выполнялась методом ZDI. Найден период вращения — 111 суток. Структура магнитного поля сложная и свидетельствует о существенном тороидальном компоненте. Видно признаки эволюции магнитного поля от 2008 до 2011 гг. Авторы считают, что магнитная активность звезды вызвана работой динамо.

Бычков и др. [53, 54] опубликовали вторую версию каталога средних полей магнитных звезд разных типов. По сравнению с первой версией значительно увеличилось число объектов и точность измерений магнитных полей. Наибольшее количество — 182 объекта — это Ar- и Vr-звезды.

5. ПОСТРОЕНИЕ МАГНИТНЫХ КАРТ ЗВЕЗД РАЗНЫХ ТИПОВ

В наших прошлых обзорах [1], [2] мы неоднократно описывали методы Зееман-Допплеровского (ZDI) (или магнитного) картирования. Авторы метода, в частности Олег Кочухов, активно развивали его и в обозреваемое нами время. Строились магнитные карты звезд разных типов.

Кочуков и Вайд [55] исследовали магнитное поле ранней B-звезды τ Sco. Согласно прежним результатам авторов, оно необычно сложное, но слабое. Топология поля ранее изучалась методом ZDI — анализа циркулярно поляризованных спектров высокого разрешения. В цитируемой работе авторы решили оценить надежность получаемых ими карт с использованием другого ZDI-кода, в котором для картирования используются данные не только круговой, но и линейной поляризации, вызванной эффектом Зеемана в линиях. Распределение поля, найденное новым методом, отличается от полученного ранее, поле получилось более сильным и с более сложной топологией. Новые наблюдения подчеркивают хорошо известную проблему неуникальности решения при инверсии V-параметра Стокса при ZDI. Сравнились общее

гармоническое разложение и прямое воспроизведение магнитного поля. Эти карты предполагают равный вклад тороидального и полоидального поля. Авторы цитируемой статьи обнаружили, что доступные данные о V-параметре Стокса удачно воспроизводятся гармоническим разложением, при этом полоидальное поле можно не учитывать. Или принимать во внимание азимутальный и радиальный компонент полоидального поля, требуемого при широко используемом методе экстраполяции потенциального поля. Описание магнитного поля в терминах общего гармонического разложения приводит к большому набору степеней свободы, избыточному для отдельных случаев ZDI. Например, необходимо включать тороидальную компоненту поля. Результаты ZDI авторов отличаются от результатов общего гармонического разложения, полученными ранее. Для магнитных звезд, свойства которых подобны τ Sco (достаточно медленное вращение и сложное поле) итоговая магнитная реконструкция сильно зависит от принятой параметризации поля, фотосферного магнитного картирования и определения расширяющейся магнитосферы. Только использование «Q»- и «U»-параметров Стокса может дать однозначный ответ о топологии магнитного поля.

Русомаров и др. [56] провели реконструкцию магнитного поля (в виде карты), Ar-звезды HD 125248, а также построили карту распределения химических элементов по ее поверхности. Первые магнитные измерения выполнил еще Бэбкок, впоследствии магнитное поле измерялось неоднократно. Было найдено, что продольное поле V_e меняется примерно от -2 до $+2$ кГс, и его удавалось промоделировать простой дипольной моделью. Для построения более совершенной карты получен новый наблюдательный материал высокого качества. На спектрополяриметре HARPSpol было проведено 36 отдельных измерений 4-х параметров Стокса на протяжении 12 ночей. Отмечается хорошее фазовое покрытие. Для обработки данных применена методика магнитного доплеровского картирования. Использовалась модель атмосферы, в которой учтено влияние сильного магнитного поля и принят во внимание несолнечный химический состав. В результате выполнения работы уточнены параметры атмосферы звезды: $T_e = 9850 \pm 250$ К и $\log g = 4.05 \pm 0.10$. Проведен детальный анализ обилия элементов, подтверждающий, что HD 125248 имеет содержание, типичное для Ar-звезд. Найден существенный вертикальный эффект стратификации по ионам Cr II и Fe II. Были вычислены LSD-профили Стокса, используя маски для нескольких линий, соответствующих железному пику и редкоземельным элементам и изучили их поведение с фазой вращения звезды. Комбинируя с предыдущими

измерениями продольного поля и с собственными результатами авторов, они улучшили период вращения звезды $P_{\text{rot}} = 9.29558 \pm 0.00006$ d. Магнитное доплеровское картирование показывает, что магнитное поле звезды в основном полоидальное и квази-дипольное с двумя большим пятнами разной полярности и величины поля. Химические карты Fe, Cr, Ce, Nd, Gd, и Ti показывают контраст от 0.9 до 3.5 dex. Среди этих элементов, только содержание железа не показывает высококонтрастных особенностей. Отмечается сверхобилие хрома вокруг отрицательного магнитного полюса величиной примерно 3.5 dex. Редкие земли и титан в сверхобилии вокруг положительного магнитного полюса. Сделан вывод о том, что магнитное поле HD 125248 имеет сильные отклонения от классической модели наклонного диполя. Сравнение магнитной топологии HD 125248 с результатами для других звезд на основании карт, построенных методом магнитного доплеровского картирования, показывает, что топология поля упрощается с возрастом. Карты содержания показывают слабую корреляцию с геометрией магнитного поля, но не согласуются с теоретическими расчетами атомной диффузии, согласно которым элементы накапливаются в области горизонтальных магнитных полей.

В работе [57] Олег Кочухов выполнил компьютерное моделирование для выяснения некоторых особенностей метода Доплеровского картирования. Это мощный метод, позволяющий превратить серию профилей линий в двухмерную карту неоднородностей на поверхности. Он многократно применялся при анализе различных Ar/Vr-звезд. Автором были промоделированы искусственно сгенерированные спектральные наблюдательные данные для двух пятен железа с контрастом 1.5 dex и в присутствии относительно сильного дипольного магнитного поля. Химические карты были реконструируемы с использованием набора спектральных линий при разных предположениях о формировании линий при вычислениях инверсии. Проведенные численные эксперименты показали, что современные коды DI удачно воспроизводят химические пятна, заданные в виде круглых пятен на разных широтах или пояса со сверхобилием на экваторе. Для оптимальной реконструкции, основывающейся на половине дюжины спектральных интервалов, средняя ошибка реконструкции не превышает 0.10 dex. Ошибки возрастают до 0.15 dex при использовании одной или нескольких блендированных линий. Игнорирование дипольного поля 2.5 кГс может привести к ошибке 0.2 dex. Автор [57] показал, что принятая им инверсия, основанная на одной или двух спектральных линиях, с упрощающими допущениями о не-магнитном лучистом переносе одномерной моделью атмосферы в целом реалистично воспроизводит реалии, если поле

не превышает 2–3 кГс и контраст пятен не менее 0.3 dex. Это значит, что большинство опубликованных химических карт не искажены систематическими ошибками, рассмотренными в цитируемой статье.

Цель работы [58] — найти связи между топологией магнитного поля на поверхности молодых звезд солнечного типа и холодными фотосферными пятнами на примере трех звезд этого типа. Наблюдения с высоким разрешением получены на спектрополяриметре HARPSpol 3.6-м телескопа ESO. Для обработки применялась методика LSD. Для расчетов распределение яркости по поверхности и магнитных карт использовался метод ZDI. У всех трех звезд обнаружены явные признаки холодных пятен и магнитное поле. Одна из звезд, V1358 Ori, показывает наличие доминирующей несимметричной моды. У двух других — полоидальное поле существенно сильнее тороидального. Это означает, что конвекция доминирует над слабым дифференциальным вращением. В двух случаях видна слабая антикорреляция между холодными пятнами и величиной радиального магнитного поля. Однако корреляция значительно слабее, чем в случае солнечных пятен. Сравнение с более ранними картами показало, что у звезды HD 29615 магнитное поле поменяло полярность между 2009 и 2013 гг.

Глаголевский своим методом проанализировал магнитные кривые B_e примерно для сотни звезд [59]. Он нашел, что 15% объектов имеют сложные структуры поля, остальные дипольные. Звезд с диполями, смещенными поперек оси 8%, с диполями, смещенными вдоль оси — 30% и 17% — это звезды с центральными диполями. Для 30% звезд структура не определена.

В другой работе [60] Глаголевский и Назаренко приводят результаты моделирования магнитных полей 26 CP-звезд методом «магнитных зарядов», в течение длительного времени развиваемого авторами.

Мартин Штифт по-прежнему критикует методы доплеровского картирования [61]. Его критика основывается на том, что численное моделирование атомной диффузии в магнитных атмосферах Ar- и Vr-звезд предполагает наличие колец на магнитном экваторе в дипольной геометрии магнитного поля, а на картах преобладают пятнистые структуры. Штифт считает, что многочисленные опубликованные карты — ложные или потому, что не учитывается магнитное поле или потому, что фотонный шум на них превышает сигнал (при использовании спектров плохого качества). Даже, если доступны спектры с высоким отношением

Сигнал/Шум, невозможно одновременно корректно воспроизвести форму, положение и содержание элементов в большинстве пятен, даже если используются все 4 параметра Стокса и известна геометрия магнитного поля. Инверсия, основывающаяся на 1–2 линиях в случаях сложных карт содержания имеет множество решений. Поэтому нет гарантии, что подходящим образом выбранная регуляризация дает верную карту содержания. Предлагается вниманию тот факт, что необходимо изучить влияние соотношений между стратификацией, зависящей от поля структуры содержаний, предсказываемых теорией диффузии, и эмпирическими картами, полученными с использованием канонических ZDI, т.е. средней атмосферой и нестратифицированным содержанием. Также обращается внимание на трудности, возникающие при анализе 3D природы процессов диффузии в CP-звездах.

6. СПЕКТРАЛЬНАЯ И ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД

В последние несколько лет на орбиту вокруг Земли запущено несколько малых спутников с целью изучения фотометрической и спектральной переменности звезд. Основная задача этих проектов — поиски экзопланет. В качестве побочного продукта проводились исследования переменности химически пекулярных звезд.

В большой работе Паунзена и др. [62] даются краткие характеристики каждому рассматриваемому космическому проекту и анализируется вращение пекулярных звезд, открытых в результате обзоров ASAS-3, Super WASP, Stereo и Kepler.

All Sky Automated Survey (ASAS) — проект фотометрии всего неба для поиска любой переменности. ASAS-3 — один из подпроектов: типичная экспозиция в фильтре *V* составляет около 3 минут. Это позволяет выполнить фотометрию 10 млн объектов звездных величин от 7 до 14. Методической особенностью обзоров всего неба является фрагментарность наблюдений. Каждое поле наблюдается один два или три дня, что приводит к сильным алиасам в представленных данных с периодом сутки. Составлена выборка из 323 фотометрически переменных CP-звезд. У 246 из них переменность открыта впервые. Подтвердить переменность необходимо для 31 A- и поздних B-звезд.

Solar TERrestrial RElations Observatory (STEREO) состоит из двух спутников. Главная цель проекта — получение трехмерной картины солнечной короны. Попутно в поле попало очень много звезд. Наблюдения в одной каденции длились 40 минут и охватывали интервал времени 4.5 года. При этом наблюдения одной и той же области длились 20 суток с перерывом в 1 год.

Врейт и др. (2012) (см. ссылки в [62]) получили и проанализировали 337 кривых блеска CP-звезд. Они обнаружили значимую фотометрическую переменность и нашли соответствующие периоды для 82 CP-звезд. Для 48 из них поиски периода выполнены впервые.

SuperWASP стартовал в 2004 году и предназначен для получения длительных фотометрических рядов. Обзор охватывает обе полусферы, наблюдения ведется в широкой полосе 4000–7000 Å с точностью лучше 1% для объектов в интервале от 8 до 15 величины. В общем случае наблюдения состоят из двух 30-секундных накоплений, разделенных промежутком времени 10 мин. Главная цель проекта — поиски транзитов экзопланет, но получены фотометрические данные для множества CP-звезд. Бернард и др. (2015) проанализировали их для 579 CP-звезд разных типов из каталога Ренсона и Манфруа (2009). Удалось найти переменность 80 из них, при этом для 74 — впервые.

Еще один проект — миссия Кеплер для поиска планет вокруг солнечно-подобных звезд — также позволяет осуществлять поиск CP-звезд. Уже получена исключительно точная фотометрия 150 тысяч объектов. Благодаря высокой точности к настоящему времени обнаружено уже более 50 новых переменных CP-звезд. В цитируемой статье приводятся кривые блеска 3-х звезд: HD 63204, HD 96537, KID 6950556, в т.ч. в едином масштабе для сравнения данных разных обзоров. Результаты фотометрии пекулярных звезд будут рассмотрены ниже в соответствующем подразделе.

6.1. Спектры магнитных звезд

В этом разделе сделан обзор статей, посвященных изучению химического состава магнитных звезд.

Хубриг и др. [63] провели спектрофотометрический мониторинг быстрого ротатора сверхгиганта O4 Ief dzeta Pup — убегающей звезды. Она может быть продуктом взаимодействия в прошлом в двойной системе примерно 2 млн. лет тому назад. Спектральные наблюдения проведены на FORS 2, установленном на 8-м телескопе Antu. Обнаружена переменность спектра с возможным периодом 1.78 суток. Однако, магнитного поля у звезды не найдено.

Проблемой при изучении металличности звезд в рассеянных скоплениях является отсутствие большой и однородной выборки данных. Авторы [64] скомпилировали большое количество литературных данных, позаботились об однородности полученной выборки. Эти данные, а также выборка цефеид были использованы для исследования радиального градиента металличности и эффектов

возраста. В итоге определена металличность для 172 рассеянных скоплений. Спектральные данные для 100 объектов использованы для определения металличности и зависимости ее от возраста. Подтверждение найденного возможного увеличения металличности будет доказательством существования радиальной миграции. При сравнении рассеянных скоплений и цефеид и современных моделей Галактики в целом есть хорошее согласие. Однако, модели не воспроизводят плоского градиента для скоплений во внешнем диске. Представленная выборка является наибольшей на настоящий момент пригодной для изучения популяции рассеянных звездных скоплений в Галактике и эволюционных исследований.

Катанзаро и др. [65] провели комплексный анализ ртутно-марганцевой звезды HD 49606 по наблюдениям на различных инструментах. Проведено изучение движений в этой SB1 двойной и определены фундаментальные параметры, характеризующие орбиту. Обсуждается природа невидимого компонента. Найденны параметры атмосферы и химический состав: He, O, Mg, S и Ni в недостатке, солнечное содержание углерода и сверхобилие всех остальных элементов. Авторы нашли изменения содержания с оптической глубиной, что указывает на возможность стратификации. Методами спектродопляриметрии магнитное поле не обнаружено.

Любимков [66] показал, что в случае ранних В-звезд ГП соотношения N/C, C/O, и N/O могут рассматриваться, как индикаторы звездной эволюции. Автор [66] считает наиболее реалистичным отношение N/O, так как другие отношения N/C и C/O могут содержать систематические ошибки, связанные с тем, что при $T_e > 18\,500$ К не учитывается сверхионизация ионов C II. Отношение N/O было изучено для 46 звезд. Проверена зависимость этого отношения от температуры, возраста, вращения и массы звезды. Найдено более высокое отношение N/O для быстровращающихся звезд ($V = 200\text{--}300$ км с⁻¹)

В работе [67] выполнен статистический анализ результатов определения содержаний в Hg-Mn звездах. Авторы рассмотрели большую выборку этих объектов. Используются данные спектроскопии. Подтверждается главный тренд, а именно, рост сверхобилия с увеличением атомного номера тяжелого элемента и большой разброс величин содержания от звезды к звезде. Для всех измеренных элементов рассмотрена корреляция между содержанием и эффективной температурой. В дополнение к известной корреляции для Mn некоторые другие элементы также показывают эту корреляцию. Не замечена какая-либо зависимость от кратности звезды.

В работе [68] построена модель атома углерода для C I—C II с использованием всех доступных данных в NLTE-приближении. Расчеты для А- и поздних В-звезд, выполненные авторами работы, вычисления авторов предсказывают появление эмиссий в некоторых линиях углерода при $T_e > 9250$ К. Проведен анализ линии C I по спектрам высокого разрешения семи звезд. У 4-х самых горячих из них эмиссия в линиях углерода была обнаружена в полном согласии с вычислениями авторов.

Недавно опубликованные эмпирические карты, полученные методом ZDI, не согласуются с химическими структурами, предсказываемыми численными моделями при расчетах атомной диффузии в магнитных Ap/Vp-звездах. В качестве первого шага для разрешения противоречия, в работе [69] представлена последняя сетка моделей атмосфер со стратификацией в атмосфере магнитной звезды с $T_e = 10\,000$ К и $\log g = 4.0$. Описано поведение 16 элементов, включая предсказания о сверхобилии или недостатке на звездной поверхности. Обсуждается возможное влияние физических процессов, которые в настоящее время не принимаются во внимание.

В работе [70] представлен первый анализ химсостава 44 поздних В-, А- и F-звезд молодого рассеянного скопления M6 (NGC 6405, возраст 75 млн лет). Методом синтетического спектра найдено содержание 20 элементов от гелия до ртути для 19 поздних В-, 16 А- и 9 F-звезд. Средняя металличность скопления $[Fe/H] = 0.07 \pm 0.03$ dex по содержанию элементов у F-звезд. Найдено 5 новых химически пекулярных звезд: одна мягкая Am, одна Am, одна Fm (HD 318091, CD-32 13109, GSC 07380-01211, CP1), одна HgMn-звезда (HD 318126, CP3), и одна He-weak P-rich (HD 318101, CP4) звезда. Для HD 318101 выполнено детальное моделирование.

В работе Зверко и др. [71] продолжены исследования звезд, у которых существенно различается скорость вращения, определенная по линиям кальция и магния ($v \sin i = 15$ км с⁻¹ по линии магния 4481 и $v \sin i = 160$ км с⁻¹ по линии кальция 3933). В статье показано, что химически пекулярная звезда HD 182255 является двойной, второй компонент — холодная звезда существенно повлиял на уширение линии кальция 3933 и не повлиял на линию магния 4481.

6.2. Фотометрия звезд

Првак и др. [72] предложили модель фотометрической переменности CP звезды ϕ Dra, основанную на предположении о неоднородном распределении тяжелых элементов на ее поверхности. Сравнение

полученной модельной переменности с наблюдаемой показало, что полученная в визуальной и ИК-областях модельная кривая очень хорошо согласуется с наблюдаемой. Таким образом, получено доказательство того, что наблюдаемая фотометрическая переменность звезды является следствием неравномерного распределения тяжелых элементов. Значит, пятна можно выделять не только на основании данных спектроскопии, но и по фотометрии тоже.

На наноспутниках BRITE выполнены высокоточные наблюдения гоAr-звезды α Cir [73]. Это хорошо изученная звезда, даже интерферометрически. Спутники наблюдали звезду 146 суток или 33 цикла вращения. Период вращения 4.479 суток, существенные различия есть в кривых в двух цветах (в синем и красном). Предлагается модель, в которой имеются два крупномасштабных фотометрически ярких пятна. За 20 лет не обнаружено изменений частоты пульсаций.

Микулашек и др. [74] предложили феноменологический метод для учета трендов в фотометрии Kepler и MOST, обусловленных инструментальной систематикой, например, двух химически пекулярных переменных звезд KIC 6950556 и HD 37633. В принципе, он может быть применен и при наземных фотометрических наблюдениях. Как побочный продукт, было установлено, что KIC 6950556 является магнитной химически пекулярной звездой с переменностью типа ACV.

The Nainital-Cape Survey [75] был задуман для поиска пульсирующих Ar-звезд в северном полушарии. С использованием методов высокоскоростной фотометрии. Кандидаты были отобраны по Стремгеновским фотометрическим индексам, так же как и ранее известные гоAr-звезды. Результаты: были проведены наблюдения 337 кандидатов. В предыдущей статье серии представлены 7 новых пульсирующих звезд и 229 нулевых результатов. В статье [75] представлены кривые блеска, частотные спектры и различные астрофизические параметры еще 108 звезд.

В работе [76] впервые найдены 2 дополнительные частоты у известной гоAr звезды HD 177765. Наблюдения выполнялись на телескопе Кеплер, найдены низко-амплитудные пульсации (4–11 micro mag), ранее не видимые по фотометрии. Установлено, что пульсации за период наблюдений стабильные. Найденные пульсации оказываются значительно меньше предсказанных теорией.

Анализ наблюдений первой миссии Кеплера K2 по поиску быстрых пульсаций у звезды HD 24355 ($V = 9.65$) [77] представлен в работе [77]. Эта звезда была открыта в широкополосной SuperWASP фотометрии с частотой 224.31 d^{-1} (2596.18 Hz ;

$P = 6.4 \text{ min}$) и амплитудой 1.51 mmag. Последующая спектроскопия показала, что это A5 Vp SrEu звезда. Высокоточные данные Кеплера позволили обнаружить 13 разделенных вращением боковых лепестков от главной пульсационной частоты HD 24355. Такое количество боковых лепестков в комбинации с необычными изменениями фазы вращения показывает, что звезда является более искаженным квадруполем, чем ранее считалось. Установлено, что звезда имеет частоту пульсаций выше критической. В настоящее время это единственная Ar-звезда наблюдавшаяся на спутнике Кеплер в высокочастотном режиме по сравнению с наземными наблюдениями. Не найдено других мод пульсаций, которые отождествлялись бы по данным K2, показывая что звезда пульсатор с единственной модой.

В работе [78] проведены наблюдения Ar-звезды HD 240121. Ранее у нее была найдена переменность в противофазе в цветах B и V . Были проанализированы все имеющиеся в литературе и собственные данные, а также данные из архивов NSVS и Hipparcos. Определены физические параметры звезды. HD 240121 является молодой звездой позднего типа B, кремниевой подгруппы. Период вращения типичен для CP-звезд. Антифазовая переменность в кривых блеска в полосах B и V встречается гораздо реже и требует наличие нулевой длины волны, на которой переменность отсутствует.

В работе [79] описывается The All Sky Automated Survey (ASAS) — мониторинг южного и части северного неба (до $\delta < +28^\circ$). Используется 20-см телескоп обсерватории Las Campanas в Chile, детектор — матрица ПЗС $2K \times 2K$. В базе данных ASAS более 10 млн источников ярче 14 величины. Составлен список кандидатов в Ar/Vp-звезды и объекты с аномальными линиями гелия на основании каталога Ренсона и Манфруа (2009).

Результаты мониторинга семи B-звезд (HD 121790, HD 122980, HD 129116, HD 133242, HD 144294, HD 145482, и HD 145502) на спутниках BRITE представлены в работе [80]. Определено их место на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. У одной из звезд найдена переменность, вызванная вращением (HD 122980, $P \sim 80 \text{ d}$). Одна двойная (HD 145502, $P \sim 5.6 \text{ d}$)

Большинство магнитных звезд имеют стабильный период вращения. Однако имеется несколько магнитных звезд, период которых меняется на шкале времени порядка десятилетий, в то время как форма кривой переменности остается неизменной. CP-звезды с нестабильными периодами вращения исследуют Микулашек и др. [81]. В случае 2-х звезд CU Vir (HD 124224) и V901 Ori (HD 37776) они

обнаружили циклические вариации периода. Продемонстрировано, что осцилляции периода $CU\ Vir$ можно объяснить взаимодействием внутреннего магнитного поля и дифференциального вращения.

6.3. Переменность магнитных белых карликов

В работе [82] приводятся результаты поляризованного и фотометрического исследования холодного белого карлика WD1748+508. Наблюдения проводились в течение четырех последовательных ночей на телескопах Крымской астрофизической обсерватории. В результате в полосе V у звезды обнаружено наличие круговой поляризации на уровне $0.36 \pm 0.09\%$ и фотометрической переменности с периодом ориентировочно от пяти часов до двух дней. Амплитуда переменности постоянна в течение всего сета наблюдений и составляет $0.01\ mag$. Ненулевая круговая поляризация прямо указывает на наличие у этого белого карлика глобального магнитного поля напряженностью от 10 МГс и более. Найденная фотометрическая переменность интерпретируется в рамках вращательно-модулированной переменности магнитных свойств атмосферы этой звезды.

Валявин и др. [83] представили результаты магнитометрических исследований классической массивной рентгеновской двойной звезды X Per. Анализировалась магнито-индуцированная циркулярная поляризация в сильных спектральных линиях. Было найдено крупномасштабное продольное поле, меняющееся с амплитудой от -400 до $+400$ Гс с периодом около 0.7 суток. Ошибки измерений имеют величину около 100 Гс.

В работе Валеева и др. [84] приводятся результаты фотометрических наблюдений ряда магнитных белых карликов с целью поиска у них переменности блеска. Найдена переменность у двух известных магнитных белых карликов, вероятно связанная с вращением. В работе приведена обновленная диаграмма «период вращения—магнитное поле» для этих объектов.

6.4. Некоторые общие вопросы

Шнайдер и др. [85] исследовали магнитные поля тесных двойных. Отмечается недостаток магнитных звезд среди тесных двойных. Процесс генерации сильных магнитных полей только у некоторых может быть результатом слияния звезд ГП и находящихся на стадии ей предшествующей. Авторы нашли доказательства, что двойная система не может быть предшественником двойной магнитной звезды. Они демонстрируют, что магнитные звезды HR 2949 и $\tau\ Sco$ моложе, чем потенциальный компаньон двойной HR 2948 и ассоциация Uprg- Sco . Возраста компаньонов очень сильно разнятся.

В обоих случаях все согласуется, если мы имеем слияние компонент и допуская, что магнитное поле может образоваться по этому каналу. Поэтому исследование различий в возрасте магнитных звезд — это мощный способ, позволяющий выяснить какая доля магнитных звезд приобрела сильные магнитные поля при слиянии звезд ГП и лучше понять магнетизм массивных звезд и их остатков.

Стифт и Алециан [86] изучили атомную диффузию в магнитных Ap/Bp-звездах и ее влияние на структуру их атмосфер. Выполнялись вычисления для нестационарного случая. Изучалось влияние начальных и граничных условий в верхних слоях атмосферы, исследовалось как зависит стратификация от угла наклона магнитного поля и его величины. Вычислены профили линий для разных моделей наклонного ротатора.

В работе [87] представлена автоматическая процедура одновременного определения T_e , $\log g$, $v \sin i$ для A-звезд. Процедура реализована на инверсионном методе анализа принципиальных компонент. Авторы выбрали 322 A-звезд и область спектра $4000-5000 \text{ \AA}$ в которой много линий металлов, и линия $H\beta$. Метод оказался эффективным. Полученные параметры находятся в прекрасном согласии с найденными ранее (для контрольных звезд). Метод является очень быстрым, практическим и надежным средством для определения параметров атмосфер AFGK-звезд.

7. ЭКЗОПЛАНЕТЫ, ГОРЯЧИЕ ЮПИТЕРЫ

В работе [88] представлены 6 эпох спектрополяриметрических наблюдений звезды $\tau\ Boo$, окруженной горячими Юпитерами, чтобы расширить исключительный многолетний набор данных о ее крупномасштабном магнитном поле. Результат, полученный по наблюдениям проведенным между декабром 2013 и маем 2014 года и между январем и мартом 2015 года, подтверждает, что крупномасштабное магнитное поле $\tau\ Boo$ меняется циклически. Авторы также установили, что поле эволюционирует широко в противовес с остальными F-звездами. Также показывалось, что хромосферная и магнитная активность в циклах коррелируют.

Бревер и др. [89] представили каталог определенным единообразно содержания 1617 F-, G-, K-звезд из обзора CPS (California Planet Survey). Для создания однородного каталога использовалась автоматическая процедура спектрального синтеза. Наблюдения всех звезд выполнены на спектрографе HIRES 10-м телескопа Кек. Она предполагает, что один и тот же список линий используется для моделирования всех спектров. Определены эффективные температуры, металличность, скорость

вращения и содержание 15 элементов. Дополнив спектральные результаты сведениями имеющимися для 60% звезд выборки о параллаксах и фотометрии в полосе V , авторы нашли массы, радиусы и светимости этих объектов и их возраста. Однородная структура каталога и его большой размер позволяют использовать его для изучения формирования экзопланет

В списке Gemini Planet Imager Exoplanet Survey (GPIES) имеется 600 молодых близких звезд. Первые результаты изучения звезд из него представлены в работе [90]. Между 2013 и 2016 гг. выполнялся мониторинг HD 95086b. В периастре она приближается на 51 AU. Распределение энергии в спектре соответствует температуре $T = 800\text{--}1300$ K. Видны остатки двух дисков, из которых могла сформироваться планетная система. Наблюдения в ИК-области выявляют асимметрию, также указывающую на наличие остатков пылевого диска. Подобные остатки также найдены у звезды HD 61005.

В работе [91] исследуется стабильность многопланетных систем в двойных системах. В таких исследованиях два параметра — критическую большую полуось, задающую расстояние, внутри которой планеты стабильны от воздействия другой звезды, и минимальное расстояние между планетами — обычно принимают во внимание. Расчеты авторов показали, что резонансы в случае двух планет практически не отличаются от таковых для однопланетной системы, но возрастает уровень хаотичности. В статье делается вывод о том, что суперпозиция различных резонансов между двумя и более планетами и компаньоном двойной препятствуют возникновению или существованию стабильной динамической конфигурации. Следует принимать во внимание применимость различных критериев стабильности близких многопланетных систем для исключения взаимных столкновений в двойных.

По фазовой модуляции пульсаций в пределах зоны обитания [92] найдена планета с массой 12 Юпитеров, вращающаяся вокруг А-звезды ГП. Орбитальный период планеты 840 ± 20 суток и эксцентриситет 0.15. Все до сих пор известные планеты вокруг А-звезд ГП были найдены по транзиту или из прямых изображений. При отсутствии обнаружений планет по астрометрии или лучевым скоростям, представлен случай, который является первым, когда планету удалось открыть благодаря орбитальным движениям. Это первая А-звезда, у которой планета обнаружена внутри обитаемой зоны. Это поддерживает идею, что А-звезды скапливают массивные планеты на широких орбитах.

В работе [93] представлены эмпирические измерения радиусов 116 звезд с транзитными планетами. Эффективные температуры и параллаксы

получены из первых данных Gaia. Авторы определили массу, радиус и плотность каждой звезды. Медианная ошибка определения радиуса и массы составляет примерно 8% и 30%, а результирующая неопределенность в радиусах и массах планет равна приблизительно 9% и 22%, соответственно. Определены радиусы 242 звезд без транзитных планет с точностью порядка 2%.

В работе [94] представлены параметры звезды HD 209458 и ее гигантской транзитной планеты. Угловой диаметр звезды 0.2254 ± 0.0017 mas — или 1.2 солнечных радиуса — получен по параллаксу из данных Гиппарха. С миссией Гайа эта величина будет существенно уточнена. Радиус экзопланеты $R_p = 1.41 \pm 0.06 R_J$ вычислен по глубине транзита и по полученному авторами радиусу звезды. Найдена температура звезды $T_e = 6071 \pm 20$ K, что прекрасно согласуется с величиной 6070 ± 24 K, вычисленной по угловому диаметру и распределению энергии.

Результаты поляриметрического исследования солнцеподобной звезды, вокруг которой имеются планеты HD 147513 (G5V) представлены в работе [95]. В несколько разных эпох наблюдалось продольное поле от 1.0 до 3.2 Гс. Вариации лучевой скорости происходят на такой же временной шкале, как и изменения продольного поля. Такие вариации могут быть следствием вращательной модуляции активной области звезды скорее, чем проявляемая орбитальная переменность на временах ($P_{\text{orb}} = 528$ d). В рассматриваемом случае поле и лучевая скорость меняются с периодом около 10 суток. Все вместе свидетельствует о малом угле наклона $i = 18^\circ$. Представлена примерная магнитная карта — найдено простое полоидальное крупномасштабное поле. Звезда имеет типичный уровень активности для подобного периода вращения и спектрального класса.

Выполнены измерения магнитного поля звезды κ^1 Cet, представляющей молодое Солнце на том этапе, когда возникла жизнь на Земле. В работе [96] представлены результаты анализа магнитных свойств, полученных из спектрополяриметрических наблюдений и реконструкции крупномасштабного магнитного поля для определения магнитного окружения, ветра и потока частиц. Проведенный анализ показал, что атмосфера более замкнутая, а потеря массы в 50 раз большая, чем при текущем солнечном ветре. В результате, влияние звездного ветра на гипотетический аналог молодой Земли, потенциально влияющим на возможность жизни, оказывается большим. Взаимодействие ветра молодого Солнца с магнитным полем планеты в то время могло повлиять на молодую Землю и на условия, пригодные для жизни.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы проанализировали более 90 работ в направлении «Магнитные поля и физические параметры химически пекулярных и родственных им звезд», опубликованных в основном в 2016 году. Здесь представлены и работы 2015 года, которые по разным причинам не рассмотрены в предыдущем анализе. Часть статей была опубликована в электронных архивах в 2016 году, но к моменту написания настоящего обзора (март 2017) они появились в журналах и датированы уже 2017 годом.

В рассматриваемом году было очень мало публикаций, посвященных методическим вопросам. В основном использовались ранее сконструированные и изготовленные приборы и ранее написанные программы. Отметим здесь новую статью Пискунова и Валенти [9], в которой описываются усовершенствования в широко используемом пакете програм SME (The Spectroscopy Made Easy), написанного ими два десятка лет тому назад.

Продолжались поиски новых магнитных звезд. Много измерений выполнено на 6-м телескопе САО РАН, получены новые данные о магнетизме звезд в ассоциации Орион OB1. Начато систематическое изучение магнитных полей звезд с большими аномалиями в распределении энергии в континууме. Успешные наблюдения по поиску новых магнитных звезд выполнены в Чили на FORS2 VLT.

Получены новые данные о сверхмедленных магнитных ротаторах — магнитных CP-звездах с периодами вращения годы и десятилетия. Необходимо отметить фундаментальную работу Г. Матиса, которая (можно не сомневаться) долгое время будет источником данных о медленно вращающихся магнитных звездах.

Развивается новое направление — изучение двойных магнитных звезд. В зависимости от соотношения масс и расстояния между компонентами может возникнуть взаимодействие в магнитосфере и, возможно, магнитное торможение.

Продолжались поиски крупномасштабных, но слабых магнитных полей (единицы и десятки Гс) у не CP-звезд. Найдены такие поля у Am-звезд. Не найдено полей у классических Be-звезд.

Детально исследовались холодные звезды разных типов. У них найдены магнитные поля сложной структуры. Выполнялось их картирование, найдены изменения на временах порядка годы.

Изучалась спектральная и фотометрическая переменность магнитных звезд. Много новых магнитных звезд открыто в результате обзоров ASAS-3, Super WASP, Stereo и Kepler. На наноспутниках BRITE выполнены высокоточные наблюдения быстро осциллирующих звезд.

Продолжались работы по исследованиям магнитной и фотометрической переменности белых карликов.

И, наконец, представлено несколько работ по экзопланетам, имеющим отношение к теме нашего обзора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Российский научный фонд за финансовую поддержку настоящей работы (РНФ грант 14-50-00043).

Автор выражает искреннюю признательность ответственному секретарю редколлегии журнала В. Н. Комаровой за приложенные ею большие усилия по улучшению текста статьи.

Автор благодарен также редактору электронного журнала «A Peculiar Newsletter» Dr. Luca Fossati за работу по отслеживанию и публикации списка статей по теме настоящего обзора, индексируемых в базе данных NASA ADS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **70**, 191 (2015).
2. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **71**, 314 (2016).
3. D. E. Kukulshkin, D. A. Sazonenko, A. V. Bakholdin, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 249 (2016).
4. E. R. Muslimov, N. K. Pavlycheva, G. G. Valyavin, and S. N. Fabrika, *Astrophysical Bulletin* **71**, 357 (2016).
5. M. Pertenais, C. Neiner, and P. Petit, *Proc. SPIE* **9905**, 99052Y (2016).
6. G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **71**, 489 (2016).
7. M. V. Yushkin, T. A. Fatkhullin, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **71**, 343 (2016).
8. N. Piskunov, *ASP Conf. Series* **510**, 514 (2017).
9. N. Piskunov and J. A. Valenti, *Astron. and Astrophys.* **597**, A16 (2017).
10. A. Herdin, E. Paunzen, and M. Netopil, *Astron. and Astrophys.* **585**, A67 (2016).
11. G. A. Wade, C. Neiner, E. Alecian, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456**, 2 (2016).
12. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 436 (2016).
13. E. A. Romanyuk, I. I. and Semenko, I. A. Yakunin, and D. O. Kudryavtsev, *ASP Conf. Series* **510**, 214 (2017).
14. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, and A. V. Moiseeva, *Astrophysical Bulletin* **71**, 302 (2016).
15. I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, E. A. Semenko, and A. V. Moiseeva, *Astrophysical Bulletin* **71**, 447 (2016).
16. N. Castro, L. Fossati, S. Hubrig, et al., *Astron. and Astrophys.* **597**, L6 (2017).

17. M. Schöller, S. Hubrig, L. Fossati, et al., *Astron. and Astrophys.* **599**, A66 (2017).
18. N. Przybilla, L. Fossati, S. Hubrig, et al., *Astron. and Astrophys.* **587**, A7 (2016).
19. G. Mathys, *Astron. and Astrophys.* **601**, A14 (2017).
20. G. Mathys, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, et al., *Astron. and Astrophys.* **586**, A85 (2016).
21. I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, E. A. Semenko, and I. A. Yakunin, *Astrophysical Bulletin* **70**, 456 (2015).
22. E. Alecian, C. Neiner, G. A. Wade, et al., in *New Windows on Massive Stars*, Edited by G. Meynet, C. Georgy, J. Groh, and P. Stee (2015), *IAU Symposium*, vol. 307, p. 330.
23. E. Alecian, A. Tkachenko, C. Neiner, et al., *Astron. and Astrophys.* **589**, A47 (2016).
24. M. Aurière, G. A. Wade, J. Silvester, et al., *Astron. and Astrophys.* **475**, 1053 (2007).
25. M. Aurière, G. A. Wade, F. Lignières, et al., *Astron. and Astrophys.* **523**, A40 (2010).
26. J. Sikora, G. A. Wade, D. A. Bohlender, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **460**, 1811 (2016).
27. J. D. Landstreet, O. Kochukhov, E. Alecian, et al., *ArXiv e-prints* (2017).
28. E. A. Semenko, *ASP Conf. Series* **510**, 224 (2017).
29. A. Moiseeva and E. A. Romanyuk, I. I. and Semenko, *ASP Conf. Series* **510**, 237 (2017).
30. E. A. Semenko and E. S. Semenova, *ASP Conf. Series* **510**, 240 (2017).
31. J. Liška, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **461**, 939 (2016).
32. C. Neiner, G. Wade, S. Marsden, and A. Blazère, *ArXiv e-prints* (2016).
33. G. A. Wade, D. H. Cohen, C. Fletcher, et al., *ArXiv e-prints* (2016).
34. A. Blazère, P. Petit, F. Lignières, et al., *Astron. and Astrophys.* **586**, A97 (2016).
35. P. Petit, F. Lignières, M. Aurière, et al., *Astron. and Astrophys.* **532**, L13 (2011).
36. A. Blazère, C. Neiner, and P. Petit, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, L81 (2016).
37. L. Fossati, F. R. N. Schneider, N. Castro, et al., *Astron. and Astrophys.* **592**, A84 (2016).
38. G. A. Wade, V. Petit, J. H. Grunhut, et al., *ASP Conf. Series* **506**, 207 (2016).
39. M. Shultz, G. Wade, T. Rivinius, et al., *ASP Conf. Series* **506**, 251 (2016).
40. M. Shultz, G. Wade, T. Rivinius, et al., *ASP Conf. Series* **506**, 305 (2016).
41. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, A. Martin, and G. Valyavin, *Astron. and Astrophys.* **591**, A80 (2016).
42. S. P. Järvinen, S. Hubrig, M. Schöller, et al., *Astronomische Nachrichten* **337**, 329 (2016).
43. S. Hubrig, K. Scholz, W.-R. Hamann, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **458**, 3381 (2016).
44. M. Schöller, M. A. Pogodin, J. A. Cahuasquí, et al., *Astron. and Astrophys.* **592**, A50 (2016).
45. S. P. Järvinen, S. Hubrig, I. Ilyin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464**, L85 (2017).
46. A. Borisova, M. Aurière, P. Petit, et al., *Astron. and Astrophys.* **591**, A57 (2016).
47. M. Aurière, A. López Ariste, P. Mathias, et al., *Astron. and Astrophys.* **591**, A119 (2016).
48. C. P. Folsom, P. Petit, J. Bouvier, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **457**, 580 (2016).
49. V. See, M. Jardine, A. A. Vidotto, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462**, 4442 (2016).
50. A. A. Vidotto, J.-F. Donati, M. Jardine, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455**, L52 (2016).
51. M. Briquet, C. Neiner, P. Petit, et al., *Astron. and Astrophys.* **587**, A126 (2016).
52. S. Tsvetkova, P. Petit, R. Konstantinova-Antova, et al., *Astron. and Astrophys.* **599**, A72 (2017).
53. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *ArXiv e-prints* (2016).
54. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *ASP Conf. Series* **510**, 222 (2017).
55. O. Kochukhov and G. A. Wade, *Astron. and Astrophys.* **586**, A30 (2016).
56. N. Rusomarov, O. Kochukhov, T. Ryabchikova, and I. Ilyin, *Astron. and Astrophys.* **588**, A138 (2016).
57. O. Kochukhov, *Astron. and Astrophys.* **597**, A58 (2017).
58. T. Hackman, J. Lehtinen, L. Rosén, et al., *Astron. and Astrophys.* **587**, A28 (2016).
59. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **71**, 43 (2016).
60. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **71**, 453 (2016).
61. M. J. Stift, *ArXiv e-prints* (2016).
62. E. Paunzen, M. Netopil, K. Bernhard, and S. Hümmerich, *Bulgarian Astronomical Journal* **24**, 97 (2016).
63. S. Hubrig, A. Kholtygin, I. Ilyin, et al., *Astrophys. J.* **822**, 104 (2016).
64. M. Netopil, E. Paunzen, U. Heiter, and C. Soubiran, *Astron. and Astrophys.* **585**, A150 (2016).
65. G. Catanzaro, M. Giarrusso, F. Leone, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **460**, 1999 (2016).
66. L. S. Lyubimkov, *Astrophysics* **59**, 461 (2016).
67. S. Ghazaryan and G. Alecian, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **460**, 1912 (2016).
68. S. A. Alexeeva, T. A. Ryabchikova, and L. I. Mashonkina, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462**, 1123 (2016).
69. G. Alecian, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **454**, 3143 (2015).
70. T. Kılıçoğlu, R. Monier, J. Richer, et al., *Astron. J.* **151**, 49 (2016).
71. J. Zverko, I. Romanyuk, I. Iliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 199 (2016).
72. M. Prvak et al., *Astron. and Astrophys.* **584A**, 15 (2015).
73. W. W. Weiss, H.-E. Fröhlich, A. Pigulski, et al., *Astron. and Astrophys.* **588**, A54 (2016).
74. Z. Mikulášek, E. Paunzen, M. Zejda, et al., *Bulgarian Astronomical Journal* **25**, 19 (2016).
75. S. Joshi, P. Martinez, S. Chowdhury, et al., *Astron. and Astrophys.* **590**, A116 (2016).

76. D. L. Holdsworth, Information Bulletin on Variable Stars **6185** (2016).
77. D. L. Holdsworth, D. W. Kurtz, B. Smalley, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **462**, 876 (2016).
78. R. Gröbel, S. Hümmerich, E. Paunzen, and K. Bernhard, New Astronomy **50**, 104 (2017).
79. S. Hümmerich, E. Paunzen, and K. Bernhard, Astron. J. **152**, 104 (2016).
80. E. Paunzen and M. Rode-Paunzen, ArXiv e-prints (2016).
81. J. Z. Mikulasek, J. Krticha, and J. Janik, ASP Conf. Series **510**, 242 (2017).
82. K. A. Antonyuk, S. V. Kolesnikov, N. V. Pit, et al., Astrophysical Bulletin **71**, 475 (2016).
83. G. G. Valyavin, N. G. Ikhsanov, and N. G. Beskrovnaya, ASP Conf. Series **510**, 225 (2017).
84. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., Astrophysical Bulletin **72**, 44 (2017).
85. F. R. N. Schneider, P. Podsiadlowski, N. Langer, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **457**, 2355 (2016).
86. M. J. Stift and G. Alecian, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **457**, 74 (2016).
87. M. Gebran, W. Farah, F. Paletou, et al., Astron. and Astrophys. **589**, A83 (2016).
88. M. W. Mengel, R. Fares, S. C. Marsden, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **459**, 4325 (2016).
89. J. M. Brewer, D. A. Fischer, J. A. Valenti, and N. Piskunov, Astrophys. J. Suppl. **225**, 32 (2016).
90. F. Marchis, J. Rameau, E. L. Nielsen, et al., in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts* (2016), vol. 48, p. 112.03.
91. F. Marzari and G. Gallina, Astron. and Astrophys. **594**, A89 (2016).
92. S. J. Murphy, T. R. Bedding, and H. Shibahashi, Astrophys. J. Lett. **827**, L17 (2016).
93. K. G. Stassun, K. A. Collins, and B. S. Gaudi, Astron. J. **153**, 136 (2017).
94. C. del Burgo and C. Allende Prieto, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **463**, 1400 (2016).
95. G. A. J. Hussain, J. D. Alvarado-Gómez, J. Grunhut, et al., Astron. and Astrophys. **585**, A77 (2016).
96. J.-D. do Nascimento, Jr., A. A. Vidotto, P. Petit, et al., Astrophys. J. Lett. **820**, L15 (2016).

Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars. III. Main Results of 2016 and Analysis of Closest Perspectives

I. I. Romanyuk

We have analyzed more than 90 papers in the area “Magnetic fields and physical parameters of chemically peculiar and related stars,” published mainly in 2016. The main results of the period under survey are as follows. The search for new magnetic stars continued. Many measurements were made at the 6-m BTA telescope of the SAO RAS, new data on stellar magnetism in the Orion OB1 association were obtained. A systematic study of magnetic fields of stars with large anomalies in the energy distribution in the continuum was started. New data on ultra-slow magnetic rotators—chemically peculiar stars with rotation periods of years and decades are obtained. Successful observations on the search for new magnetic stars are performed among the objects of the southern sky in Chile at the FORS2 VLT spectropolarimeter. A new direction was developed, namely, the study of binary magnetic stars. Depending on the mass–distance ratio between the components, interaction with the magnetosphere and, possibly, magnetic braking may occur. The study of the details of this process is important for the theory of formation of stellar magnetic fields. The search for large-scale, but weak magnetic fields (magnitude of unities and tens of G) in non-CP stars is ongoing. Such fields are found in Am stars. No fields were found in the classical Be stars. Cool stars of various types were studied in detail. They manifested magnetic fields of a complex structure. Their mapping was performed, changes in the topology of the field were found at timescales of several years. Spectral and photometric variability was studied. Dozens of new potentially magnetic stars are discovered as a result of the ASAS-3, Super WASP, Stereo and Kepler surveys. High-accuracy observations of rapidly oscillating stars were performed with the BRITE nanosatellite. Work continued on the studies of magnetic and photometric variability of white dwarfs. Finally, an overview of several papers on exoplanets, related with the subject of our study is presented.

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