

УДК 524.35-337

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ И РОДСТВЕННЫХ ИМ ЗВЕЗД. 4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2017 ГОДА И АНАЛИЗ БЛИЖАЙШИХ ПЕРСПЕКТИВ

© 2018 И. И. Романюк^{1,2*}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 10 июня 2018 года; принята в печать 8 июля 2018 года

Приводится литературный обзор около сотни работ, выполненных в направлении “Магнитные поля и физические параметры химически пекулярных и родственных им звезд”, опубликованных в основном в 2017 году. Рассмотрены инструментальные и методические вопросы, приведены первые результаты, полученные со спектрополяриметром сверхвысокого разрешения PEPSI, описаны новые программы обработки и анализа данных. Открыты новые магнитные химически пекулярные звезды в ассоциации в Орионе, найдены слабые (на уровне одного Гаусса) магнитные поля у звезд других типов. Предпринята первая попытка обнаружить магнитные звезды за пределами Галактики. Построены магнитные карты и карты распределения элементов по поверхности звезд разных типов, найдена эволюция пятен у холодных звезд. Получены новые магнитные, спектральные и фотометрические данные для магнитных белых карликов и вырожденных звезд других типов.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования магнитных химически пекулярных и родственных им звезд ведутся с высокой интенсивностью. Активно работает около 10 групп в разных странах мира. В последние 10–15 лет ежегодно публикуется около 300 статей, проводится несколько конференций различного уровня: от Симпозиумов МАС до собраний рабочих групп. Получено много новой разнообразной информации. Отслеживать ее в полном объеме затруднительно, поэтому несколько лет назад мы пришли к выводу о необходимости проведения систематической работы по выделению новых результатов в данной области. Важнейшие итоги работ по исследованию магнитных химически пекулярных и родственных им звезд в 2014–2016 гг. представлены в обзорах [1–3]. Настоящая статья является продолжением этой серии публикаций.

Как и ранее, хотелось бы отметить очень важную работу издателя электронного журнала “A Peculiar Newsletter”, Луки Фоссати, по отслеживанию и публикации работ, индексированных в базе данных NASA ADS. Мы широко используем эти данные в нашей работе.

Кроме статей в регулярных журналах в обзор включены работы, опубликованные в сборниках докладов двух крупных международных конференций, посвященных магнитным звездам: “Stars: from collapse to collapse”¹, “Stars with a Stable Magnetic Field: from Pre-Main Sequence to compact remnants”², а также несколько статей из сборников других конференций.

Рубрикацию разделов и последовательность изложения мы оставили примерно такой же, как и в работах [1–3].

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Методическим вопросам исследователи уделяют очень много времени, так как с повышением точности наблюдений и совершенствованием методов их анализа приходится учитывать все большее количество факторов, которыми ранее можно было

¹ASP Conference Series, v.510, 2017 Proceedings of the International Conference held at Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhys, Russia. October 3–7 2016. Eds: Yu. Yu. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk and I. A. Yakunin

²held in Brno, Czech republic, August 28 – September, 1, 2017. Proceedings published in Contributions of Skalnaté Pleso Observatory, v. 48, 2018. Eds: M. Netopil, E. Paunzen and V. Petit

*E-mail: roman@sao.ru

пренебречь. При измерениях предельно слабых величин неучет различных погрешностей может привести к искажению полученных результатов.

2.1. Приборы и методика наблюдений

Основные наблюдения магнитных полей выполнялись в 2017 году на тех же приборах, что и в предыдущие 3 года. Это спектрополяриметры низкого разрешения FORS1/FORS2 (VLT ESO) [4], умеренного разрешения ОЗСП (6-м телескоп БТА) [5] и высокого разрешения HARPSol (ESO) [6], ESPaDOnS (CFHT) и NARVAL (TBL) [7]. Детальное описание этих инструментов приведено в работе [1].

Значительным вкладом в развитие мировой инструментальной базы для измерений магнитных полей звезд явился запуск нового спектрополяриметра PEPSI, созданного сотрудниками Потсдамской обсерватории. В работах [8–10] приведены первые результаты, полученные на этом прибором.

В статье [8] сообщается о реализации ключевого проекта Потсдамской обсерватории — создании спектрографа очень высокого разрешения PEPSI (Potsdam Echelle Polarimetric and Spectroscopic Instrument). Он установлен на Большом бинокулярном телескопе (LBT): системе из двух 8-м телескопов (Аризона, США). В качестве первого испытания проведены наблюдения Солнца. Получены высокоточные солнечные спектры с разрешением 270 000 в области длин волн 383–914 нм и отношением С/Ш от 2000 до 8000 в зависимости от длины волны. Калибровка по длинам волн осуществлялась по лампе Th-Ag и одновременно по эталону Фабри-Перо для получения точности измерения лучевых скоростей лучше 10 м с^{-1} при исследованиях Солнца, как звезды.

Во второй статье серии [9] представлены результаты наблюдений 48 ярких AFGKM-звезд, часть из которых имеет солнечный спектр, являясь аналогом Солнца. Каждый глубокий спектр состоит из набора усредненных индивидуальных экспозиций. В среднем спектральное разрешение $R = 220\,000$ (1.36 км с^{-1}), область спектра от 383 нм до 912 нм, с отношением С/Ш от 70 для наиболее слабых звезд в синей области спектра до 6000 для ярчайших звезд в красной области. Определены новые звездные параметры для 70 Vir и α Tau. Обнаружены изменения интенсивностей линий кальция H и K и водородной линии H α у Арктура (величиной в несколько процентов) по сравнению с атласом.

В статье [10] представлены результаты анализа химического состава старой родительской звезды Kepler-444. Наблюдения велись на телескопе LBT на спектрографе PEPSI с разрешением

$R = 250\,000$. Определено фотосферное содержание 18 химических элементов. По оценкам авторов возраст звезды — 10 ± 1.5 млрд лет, что согласуется с астросейсмическим возрастом 11 ± 1 млрд лет. Определены и другие параметры системы. Показана возможность использования спектрографа для таких тонких работ.

Таким образом, PEPSI в настоящее время является спектрографом наиболее высокого разрешения в мире, имеет поляриметрическую моду и позволяет измерять 4 параметра Стокса.

Предложены новые идеи и различные варианты модернизации существующих уже приборов.

Пискунов [11] сообщил о модернизации спектрографа CRISES (проект CRISES+) в рамках развития ИК-спектроскопии высокого разрешения для телескопов VLT ESO. Предполагается, что это будет основной спектрометр высокого разрешения для наблюдений в ближней ИК-области на VLT. В статье представлены научные направления, в которых он может работать, технические решения и структура проекта. Проект реализуется консорциумом из нескольких организаций.

Продолжается строительство волоконного спектрографа высокого разрешения для 6-м телескопа.

Предложена двухкомпонентная анаморфотная система засветки щели с хорошим пропусканием и достаточно низкой ценой. Она описана в работе Сазоненко и др. [12]

Кукушкин и др. [13] методом компьютерного моделирования анализируют инструментальную поляризацию в спектрографе высокого разрешения с волоконным входом для 6-м телескопа САО РАН. Предложен алгоритм для вычислений коэффициентов деполяризации, возникающей из-за отражения на главном зеркале БТА. Использовался метод матриц Мюллера. Построена карта искажений поляризации, вызванных главным зеркалом БТА и приборами.

В проекте [14] рассматривается возможность построения инструмента, работающего в двух модах — спектральной и прямых изображений. Ключевыми узлами такого инструмента являются блок фильтров и диспергирующий элемент из двух узкополосных голографических решеток. Описываются различные схемы такого прибора.

Панчук и др. [15] предлагают эшелле-спектрограф для телескопов 1-м класса. Он может использоваться при мониторинге ярких объектов с разрешением $R = 35\,000$.

Научные задачи для нового интерферометра видимого диапазона рассматриваются в работе Сти и

др. [16]. Высокое пространственное разрешение играет ключевую роль при изучении различных астрофизических явлений. В настоящее время имеются инструменты VLT и CHARA, которые используются для решения большого круга задач. Однако даже при использовании в будущем супертелескопа E-ELT удастся достичь в видимой области углового разрешения 4 миллисекунды дуги, в то время как угловые размеры ближайших звезд Галактики не превышают 1 миллисекунды дуги. При успехе интерферометрии с длинной базой эти ограничения будут вскоре преодолены. Сочетая большее число телескопов и смещаясь в видимую область, можно расширить область научных исследований.

2.2. Методика анализа данных

Пискунов и Валенти в работе [17] развивают возможности своего популярного пакета программ SME (The Spectroscopy Made Easy) для анализа звездных спектров, в частности, при работе с большими массивами данных, получаемых при исследовании экзопланет. Со времени первого описания пакета в 1996 г. сделаны значительные обновления: улучшены данные о линиях, используются более реалистичные модели атмосфер. Однако еще во многих случаях систематические ошибки доминируют над ошибками измерений.

Аронсон и Пискунов [18] предложили новый метод анализа данных трансмиссионной спектроскопии. С его помощью только по кривым блеска, получаемым при наблюдениях транзита экзопланеты, не привлекая теоретические модели звезд и планет, можно восстановить спектр поглощения экзопланеты, определить ее радиус и одновременно характерные интенсивности родительской звезды. Метод применен для анализа наблюдений экзопланет на VLT FORS2. Результаты данной работы и более ранних исследований согласуются между собой в высокой степени.

Кочухов [19] провел расчеты химических пятен у CP-звезд. Численные эксперименты показали, что современные программы доплеровского картирования могут успешно реконструировать химические аномалии в виде круглых пятен на различных широтах или в виде пояса на магнитном экваторе. В оптимальном случае, при использовании полудюжины линий, ошибка в определении химсостава не превышает 0.1 dex, по одной—двум линиям — повышается до 0.15 dex. Неучет дипольного поля величиной 2.5 кГс приводит к ошибке в 0.2 dex, в максимуме достигающей 0.3 dex. Большинство ранее опубликованных карт пятен свободно от этого эффекта.

Он же в работе [20] обсуждает магнитную и химическую поверхность звезд ранних типов. Подвергаются критике теоретические попытки интерпретировать эмпирические магнитные и химические карты, полученные по наблюдениям, в рамках реликтового поля и теории атомной диффузии. По мнению этого автора трехмерные MHD-модели затухания магнитного поля хорошо согласуются с наблюдениями. В то же время даже самые современные расчеты атомной диффузии в зависимости от времени не воспроизводят разницу в горизонтальном распределении содержания, найденном в реальных магнитных звездах.

Семенко и Семенова [21] описывают новую компьютерную программу для обнаружения и измерения магнитных полей CP-звезд по наблюдениям на 6-м телескопе. Поскольку в современных исследованиях используются большие массивы наблюдательных данных, то очень остро стоит вопрос о повышении скорости их обработки без потери точности, при одновременном сохранении совместимости с предыдущими исследованиями. В данной работе предпринята попытка решить эту проблему.

3. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Настоящий раздел посвящен традиционной теме — исследованиям магнитных полей химически пекулярных звезд верхней части главной последовательности. Хотя с момента обнаружения Бэбкокком первой магнитной звезды прошло почти 70 лет, проблема остается актуальной. Главной причиной является достоверность измерений сильных магнитных полей у таких звезд и их высокая относительная точность, что позволяет изучать разные взаимосвязи между полем и другими физическими параметрами.

3.1. Выделение химически пекулярных из нормальных A- и B-звезд

Так как все магнитные звезды имеют аномальный химический состав, то их поиски ведутся исключительно среди химически пекулярных звезд. В нашем обзоре [3] мы отметили, что пекулярные звезды найдены уже и за пределами Галактики, в Магеллановых облаках.

При изучении нормальных A-звезд с узкими линиями Моньер и др. [22] нашли звезду HR 8844, у которой обнаружили аномалии химического состава. Для поиска подобий и различий было проведено сравнение спектра высокого разрешения указанной звезды со спектрами четырех медленно вращающихся звезд, близких к спектральному

классу A0. Анализ химического состава показал недостаток легких элементов, небольшое увеличение содержания Ti, V, Cr, Mn, и существенное увеличение содержания тяжелых элементов. Уверенно отмечается увеличение сверхобилия с ростом атомного номера. Авторы предполагают, что HR 8844 является промежуточным объектом между самыми холодными Hg-Mn-звездами и Am-звездами.

Исследования химически пекулярных звезд в рассеянных скоплениях дают ценную информацию об их эволюционном статусе. Карриди и др. [23] изучили при помощи Δa -фотометрии молодое скопление Hogg 16 (возрастом 25 млн лет). Эта фотометрия позволяет измерять характерную для пекулярных звезд депрессию континуума на 5200 Å. Авторы идентифицировали несколько пекулярных кандидатов. Две В-звезды (CD –60 4701, CPD –60 4706) с отрицательным индексом Δa , видимо, являются звездами с эмиссионными линиями. Третий кандидат (CD –60 4703) — Ве-звезда, возможно, является фоновым свехгигантом, пекулярность которого нельзя исключить. Четвертый объект (CD –60 4699) может быть магнитной звездой. Три других кандидата в магнитные CP-звезды найдены среди ранних F-звезд.

В работе этих же авторов [24] представлен каталог результатов фотометрических измерений в молодом скоплении Hogg 16. Наблюдения выполнены в La Silla на 3.6-м телескопе ESO с использованием фотометрической системы Δa . Получены результаты для 150 звезд, среди которых найдено несколько химически пекулярных.

3.2. Магнитные поля OBA-звезд

Крупнейший в своей области в последние годы международный проект MIMES по изучению массивных магнитных звезд завершился, и основные результаты были опубликованы в предыдущие годы (детали см. в [3]).

Значительным событием оказалась публикация фундаментальной работы Матиса [25] в начале 2017 года. Длительное время она будет источником сведений о магнитных полях на поверхности CP-звезд. В ней приведены результаты наблюдений около 100 звезд с узкими линиями, у которых удалось обнаружить расщепленные зеемановские компоненты.

Основные работы по измерениям магнитных полей звезд, опубликованные в 2017 году, представляют результаты наблюдений на 6-м телескопе, а также на спектрополяриметрах HARPSpol, ESPaDOnS, NARVAL, и только в отдельных случаях на других приборах.

3.2.1. Поиск магнитных звезд, магнитные Ap- и Bp-звезды в скоплениях разного возраста

Начнем с обзора нескольких публикаций, выполненных на основании наблюдений на 6-м телескопе. В статье Романюк и др. [26] приведены результаты измерений магнитного поля четырех CP-звезд с аномалиями содержания гелия — членов ассоциации Ori OB1. Можно заключить, что HD 36540 — звезда со слабым полем, продольный компонент B_e не превышает 4500 Гс. Продольное поле HD 36668 меняется с периодом $P = 2^d 11884$ и амплитудой от -2 до $+2$ кГс. Магнитное поле звезды HD 36916 имеет в основном отрицательную полярность, меняясь от 0 до -1 кГс с периодом $P = 1^d 565238$. HD 37058 — магнитная звезда, продольное поле которой меняется от -1.2 до $+0.8$ кГс с периодом $P = 14^d 659$. Характер переменности поля B_e у звезд HD 36916 и HD 37058 имеет простой гармонический вид. Продольное поле HD 36668 лучше всего описывается комбинацией из двух гармонических функций (“двойная волна”). Период переменности HD 36540 остается неопределенным.

В работе Семенко и др. [27] исследовано магнитное поле звезды HD 27404 с сильной депрессией в континууме. Как магнитная она была обнаружена на 6-м телескопе. Наблюдения, проводившиеся несколько лет, показали у нее наличие сильного магнитного поля с продольной компонентой, меняющейся сложным образом в пределах от -2.5 до $+1$ кГс. Оценка фундаментальных параметров звезды ($T_{\text{eff}} = 11\,300$ К, $\lg g = 3.9$) получена путем анализа фотометрических индексов в женеvской системе и системе Стремгрена—Кроуфорда. Экспресс-оценка содержания ряда ключевых химических элементов позволяет говорить о HD 27404 как о химически пекулярной звезде A0–B9 типа SiCr или Si+.

Романюк и др. [28] отмечают уменьшение с возрастом доли магнитных звезд относительно нормальных в ассоциации Орион OB1. Выводы сделаны на основании результатов наблюдений, проведенных на 6-м телескопе. Авторы получили более 500 спектров для 55 химически пекулярных звезд ассоциации. Найдено 8 новых магнитных звезд в дополнение к 20 известным ранее. Исследование показало, что частота встречаемости Ap/Bp-звезд среди нормальных A- и B-звезд и частота встречаемости магнитных звезд относительно всех Ap- и Bp-звезд в ассоциации Орион OB1 уменьшается с возрастом. Обнаруженная авторами скорость уменьшения частоты встречаемости на порядок превышает величину, предсказанную теорией.

Работа [29] продолжает серию публикаций о полных результатах измерения магнитных полей

звезд по данным 6-м телескопа и представляет результаты наблюдений 2010 года. Измерения магнитных полей, лучевых скоростей и скоростей вращения выполнены для 92 объектов, в основном химически пекулярных звезд главной последовательности. Наблюдения проводились на ОЗСП БТА с зеemanовским анализатором. Обнаружено 12 новых магнитных звезд: HD 17330, HD 29762, HD 49884, HD 54824, HD 89069, HD 96003, HD 113894, HD 118054, HD 135679, HD 138633, HD 138777 и BD+53 1183. Заподозрено наличие поля у HD 16705, HD 35379 и HD 35881. Наблюдения стандартных звезд без магнитного поля подтверждают отсутствие систематических ошибок, способных внести искажения в результаты измерения продольного поля.

Для получения данных о происхождении и эволюции крупномасштабных магнитных полей магнитных CP-звезд на 6-м телескопе проводятся наблюдения этих объектов в группировках разного возраста. Первые результаты изучения одной из отобранных 17 скоплений и ассоциаций — ассоциации Орион OB1 — представлены в статье [30]. К известным ранее 17 магнитным звездам добавлено 6 новых, еще у 10 наличие поля заподозрено. Найдена звезда со сложной структурой поля — HD 34736.

Переходя к обзору результатов измерений магнитных полей, выполненных на спектрополяриметрах высокого разрешения, отметим, что для вычисления продольного магнитного поля, как правило, применяется методика LSD (least-squares deconvolution). Она достаточно подробно описана в наших предыдущих обзорах и цитируемой в них литературе.

В работе [31] рассмотрены результаты измерений магнитного поля 97 звезд типа O, включенных в обзор MIMES. Полученные методом LSD профили I и V параметров Стокса использованы для определения продольных магнитных полей, лучевой скорости и скорости вращения. Найдены две новые мультилинейные спектроскопические системы (HD 46106, HD 204827) и подтверждено наличие компаньона у HD 37041. Также подтверждено наличие поля у шести звезд и найдены 3 новые магнитные звезды. В целом для всех исследованных 108 O-звезд доля магнитных составляет $7 \pm 3\%$, включая O-звезды в кратных системах. Она та же, что и для B- и A-звезд. Однако имеется группа Of?p-звезд, в которой у всех найдено магнитное поле.

В работе [32] методом спектрополяриметрии исследовалась HD 164492C — спектрально-кратная звезда раннего B-типа, находящаяся в молодом рассеянном скоплении M 20. В спектре видно присутствие трех компонентов: ранней B-звезды с широкими линиями (HD 164492C1), ранней B-звезды

с узкими линиями (HD 164492C2) и поздней B-звезды (HD 164492C3). У компонентов C2 и C3 регистрируются большие вариации лучевой скорости (более 100 км с^{-1}) с периодом около 12.5 суток, наблюдается эксцентрическое движение в двойной вокруг общего центра. Магнитной является главная звезда — (C1), имеющая широкие линии. Продольное поле меняется с периодом ее вращения 1.37 суток. Сильная эмиссия в линии H_{α} тоже меняется с тем же периодом. Это находится в согласии с выводом о существовании центростремительной магнитосферы вокруг быстро вращающегося магнитного компонента C1.

На 8-м телескопах VLT ESO для наблюдений слабых звезд используется спектрополяриметр низкого разрешения FORS 2. Подробное описание приведено в наших предыдущих обзорах (например, [1]) и литературе, приведенной в них. Используя этот прибор, Багнуло и др., [33] впервые предприняли попытку измерить магнитные поля звезд за пределами Галактики, что возможно было сделать только для наиболее ярких O-звезд. Для изучения магнитных полей за пределами Галактики авторы отобрали пять внегалактических Of?p-звезд и провели их спектрополяриметрические наблюдения с типичной ошибкой от 0.2 до 1.0 кГс в зависимости от яркости объекта и погоды. Ни у одного из объектов магнитное поле найдено не было. Однако есть косвенные указания (переменность спектра, эмиссии) на его присутствие.

В статье [34] Муноз и др. обсуждают ту же проблему. Все известные Of?p-звезды Галактики имеют сильные упорядоченные магнитные поля. В Магеллановых облаках найдено 5 Of?p-звезд. У них наблюдается фотометрическая и спектральная переменность — типичная для модели наклонного ротора, но магнитного поля до настоящего времени не обнаружено.

Матис [35] представил каталог лучевых скоростей 43 Ar-звезд с расщепленными зеemanовскими компонентами, полученных в разные эпохи. Ошибки измерений составили примерно $\pm 2 \text{ км с}^{-1}$ при наблюдениях в круговой поляризации на спектрографе ESO CASPEC и около $\pm 1 \text{ км с}^{-1}$ при наблюдениях I -параметра Стокса с высоким разрешением на других спектрографах.

Ниже рассмотрим несколько работ, выполненных в ESO, в основном Потсдамской группой (проект BOB — B field of OB stars). Отметим большой вклад Светланы Хубриг в реализацию указанного проекта.

Кастро и др. [36] сообщают об обнаружении очень сильного магнитного поля у проэволюционировавшей звезды с усиленными линиями гелия CPD-62 2124 спектрального класса B2IV. Наблюдения были выполнены на спектрополяриметрах

FORS2 и HARSPol. Наблюдается очень широкая (300 км с^{-1}) эмиссия в линии $\text{H}\alpha$, что свидетельствует о наличии центростремительной магнитосферы, поддерживаемой сильным полем. Таким образом, CPD-62 2124 обладает одним из сильнейших магнитных полей. Среди звезд с усиленными линиями гелия она является и одной из наиболее проэволюционировавших (провела более 60% своего времени жизни на главной последовательности).

Гонзалес и др. [37] рассматривают тройную звезду с сильным магнитным полем HD 164492C, об обнаружении поля которой сообщалось ранее [32]. В работе анализируются спектральные и спектрополяриметрические наблюдения с высоким разрешением на промежутке времени более двух лет. Определены физические, химические и магнитные свойства. Результат совпадает с выводом работы [32]. Расстояние до системы оценивается в 1.5 кпк, а возраст — 10–15 млн лет.

В работе [38] найдена периодическая переменность продольного магнитного поля В-звезды HD 345439 с периодом $P = 0^{\text{d}}.77$ и максимальной величиной 3 кГс. Кривая продольного поля синусоидальна, что свидетельствует о преобладании дипольной компоненты в структуре поля. Линии кремния и гелия в спектре меняются в противофазе, это указывает на противоположное распределение пятен по поверхности, что чаще всего и наблюдается у химически пекулярных звезд.

Хюбриг и др. [39] изучали магнитное поле и распределение химических элементов по поверхности звезды CPD-57 3509 с сильными линиями гелия. Были определены геометрия поля и распределение кремния и гелия по поверхности. Период 6.36 сут обнаружен при измерениях магнитного поля. Вариации можно представить синусоидальной кривой, указывающей на дипольное поле с величиной на полюсе диполя около 4 кГс. Доплеровское картирование показало, что пятна гелия концентрируются вокруг полюсов диполя с более сильной концентрацией вокруг положительного полюса. Наблюдается сильная концентрация пятен кремния в области магнитного экватора.

Для исследования вращательной переменности и пульсаций CPD-62 2124 — звезды с сильными линиями гелия и очень сильным магнитным полем, недавно обнаруженным Потсдамской группой [36], Хюбриг и др. [40] использовали данные 17 спектрополяриметрических наблюдений низкого разрешения, проведенных на FORS2, и 844 фотометрических наблюдений на ASAS3. Все параметры (продольное поле, эквивалентные ширины линий и переменность блеска в фильтре V) меняются с

одинаковым периодом 2.628 суток, который отождествляется как период вращения. Построена модель дипольного поля с величиной поля на полюсе 21 кГс, с углами $\beta = 28^\circ$ и $i = 20^\circ$.

3.2.2. Двойные и кратные магнитные звезды

Семенко [41] рассматривает скрытые магнитные двойные системы на примере двух звезд HD 6757 и HD 96003. Магнитное поле у них найдено, двойственность требует подтверждения. Возможно, HD 6757 — тройная система.

Ряд публикаций сделан в рамках проекта BinaMIcS (<http://binamics.lesia.obspm.fr/>).

Назе и др. [42] провели поиск упорядоченных крупномасштабных магнитных полей во взаимодействующих или пост-взаимодействующих массивных двойных системах, исходя из необычных свойств звезды Пласскетта (Plaskett's star). Она относится к спектральному классу O, является быстрым ротатором, входит в двойную систему, где имеет место сильное взаимодействие между компонентами. Для проверки его потенциальной роли в генерации магнитного поля были исследованы 15 звезд: HD 1337, HD 25638, HD 35652, HD 35921, HD 57060, HD 100213, HD 106871, HD 115071, HD 149404, HD 152248, HD 190967, HD 209481, HD 228854, LSS 3074 и XZ Cep. Наблюдения с низким разрешением проводились на FORS2, а с высоким — на ESPaDoNS и Narval. Ни в одной из исследованных двойных магнитного поля найдено не было. Верхний предел поля — 200 Гс. Сделано заключение о том, что взаимодействие в двойной системе не играет систематической роли в магнетизме таких массивных систем.

Назе и Алесиан [43] выполнили обзор работ, касающихся проблемы магнитных полей звезд промежуточной и большой массы в двойных системах с короткими периодами. Большинство массивных звезд ГП живут в кратных системах. В случае малого разделения возникает взаимодействие, которое влияет на звездную эволюцию, а присутствие магнитного поля открывает двери для объяснения многих явлений (перенос масс, ветер, тесное взаимодействие и др.). Однако накладываются сильные ограничения на модели звездной эволюции и генерации магнитного поля, поэтому необходимы наблюдения таких систем.

Шульц и др. [44] изучили магнитную тесную тройную HD 156324, представляющую собой SB3 (B2V/B5V/B5V) систему в ассоциации Sco OB4. Главный компонент — He-strong звезда — обладает одновременно сильным магнитным полем и эмиссией в линии $\text{H}\alpha$, возникающей, как считается, в центростремительной магнитосфере. По лучевым скоростям видно, что система состоит из двух подсистем, обозначенных авторами как A и

В. При периодическом анализе лучевых скоростей трех компонентов определены их орбитальные периоды: $P_{orb} = 1^d.5806(1)$ для компонентов Аа и Аб и $P_{orb} = 6^d.67(2)$ для компонента В, который является звездой типа PGa. Продольная компонента магнитного поля $\langle B_z \rangle$ и интенсивность эмиссии в линии H α меняются также с периодом около 1.58 суток. Поскольку для HD 156324Аа $P_{orb} = P_{rot}$, компоненты Аа и Аб должны быть связаны приливным взаимодействием. В согласии с этим орбиты циркуляризованы, а ось вращения и орбитальная ось совпадают.

3.3. Поиски крупномасштабных магнитных полей на Ар/Вр-звезд

По-видимому, кроме химически пекулярных, только О-звезды обладают магнитными полями величиной порядка кГс. У звезд других типов, если магнитные поля и существуют, то они намного слабее, порядка единиц Гаусс, и для их обнаружения необходимо использовать спектрополяриметрию высокого разрешения с высоким отношением S/N.

Нейнер и др. [45] обнаружили магнитное поле пульсирующей звезды ρ Pup спектрального класса F2 типа δ Sct. Высокоточные спектрополяриметрические наблюдения были проведены с ESPaDoNS на CFHT в рамках обзора BRITe. Надежно зафиксировано присутствие продольного магнитного поля величиной менее 1 Гс. Таким образом, ρ Pup является после HD 188774 второй звездой типа δ Sct, у которой обнаружено ультраслабое магнитное поле.

Спектроскопию высокого разрешения и спектрополяриметрию избранных звезд типа δ Sct выполнили Йоши и др. [46]. Для изучения эволюционного статуса была взята выборка Am-звезд. Параметры атмосфер определялись путем сравнения наблюдаемых спектров с синтетическими. Оказалось, что объекты выборки находятся в полосе неустойчивости в области звезд δ Sct. Ни у одного из них продольного магнитного поля не обнаружено, что подтверждает класс пекулярности Am.

Бутковская и др. [47] провели спектрополяриметрические исследования классической Ар-звезды θ Aur в линиях Si II 6347 и 6371. Не найдено никаких статистически значимых различий в оценках величины поля, полученных по этим линиям. Наблюдения выполнены в Крымской астрофизической обсерватории.

3.4. Фундаментальные параметры магнитных CP-звезд

Хуммерич и др. [48] исследовали четыре химически пекулярные звезды, меняющие блеск с фотометрическим периодом менее 12 часов. Среди них — три достоверные CP-звезды и один кандидат в CP-звезды. Для анализа использованы результаты фотометрии, выполненной на ASAS-3 и SuperWASP (детали см. в [3]). Найдено, что HD 67983 и HD 77013 имеют мультипериодическую переменность. HD 81076 — звезда типа δ Sct. Ар-звезда HD 98000 имеет монопериодическую переменность с периодом 0.466 суток, который интерпретируется как период вращения. Это самый короткий период, найденный для Ар-звезд из всех известных до настоящего времени.

Отметим три публикации Мартина Нетопила с соавторами по анализу вращения и других фундаментальных параметров CP-звезд.

В работе Нетопил и др. [49] рассмотрено вращение магнитных химически пекулярных звезд. На основании анализа очень большой выборки (более 500 объектов) с известными периодами вращения изучены свойства вращения mCP-звезд. Используя точные параллаксы, полученные в миссиях спутников Hipparcos и Gaia, надежные фотометрические калибровки и современные модели эволюции, авторы определили положение рассмотренной выборки звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Были вычислены астрофизические параметры, такие как массы, эффективные температуры, радиусы, наклон оси вращения, критические скорости вращения. Авторы подтверждают сохранение величины углового момента на протяжении эволюции на ГП, признаков магнитного торможения не обнаружено. Углы наклона осей вращения распределены случайно, хотя и наблюдается избыток быстрых ротаторов со сравнимыми углами наклона. Найдено, что для нескольких звезд, характеристики которых не могут быть объяснены текущими моделями, отношение $V/V_{crit} > 0.5$.

В работе [50] представлен компилятивный каталог периодов и астрофизических параметров химически пекулярных звезд, а в работе [51] приведены сведения о металличности, полученные на основании данных Женевской фотометрии.

Абсолютное большинство химически пекулярных звезд вращается со строго постоянным периодом. Однако есть и исключения. Микулашек и др. [52] исследуют такие объекты. Они отмечают, что имеется несколько CP-звезд, период которых на промежутке времени в десятилетия немного меняется, при этом форма кривой остается неизменной. Так, у двух звезд, CU Vir и V901 Ori, обнаружены циклические вариации периода.

4. ПОСТРОЕНИЕ МАГНИТНЫХ КАРТ ЗВЕЗД РАЗНЫХ ТИПОВ

Исследование топологии магнитных полей звезд разных типов — одно из основных направлений исследований магнитных звезд. Развита различная методика доплеровского и магнитного картирования. Однако, как было установлено в работе Штифта и Леоне [53], зашумленные спектры приводят к ложным доплеровским картам. Эмпирически построенные карты часто отличаются от теоретически предсказанных результатов численных расчетов атомной диффузии в магнитных атмосферах Ар/Вр-звезд. На примере двух звезд HD 3980 и HD 50773 показывается, что сильные неоднородности в картах химического состава могут быть существенно уменьшены, если учесть сильное магнитное поле и шумы на спектре.

4.1. Картирование химически пекулярных звезд

Безусловным лидером, внесшим наибольший вклад в развитие методов магнитного картирования CP-звезд, является группа в университете Уппсала (Николай Пискунов и Олег Кочухов). В последнее десятилетие на основании наблюдаемых профилей поляризованных линий были выполнены конкретные расчеты карт магнитного поля и распределения элементов по поверхности для дюжины звезд. Остановимся на нескольких работах 2017 года.

Кочухов и др. [54] исследовали топологию магнитного поля и распределение химических элементов у молодой быстровращающейся химически пекулярной звезды HR 5624 (HD 133880). Для нее характерна необычно сильная несинусоидальная переменность продольного магнитного поля. Ранее такое поведение интерпретировалось как доказательство сильного поля с доминирующей квадрупольной геометрией. Были построены карты поля и химических пятен с целью проверки, действительно ли поле квадрупольное. Проанализировав методом магнитного доплеровского картирования серию поляризованных спектров высокого разрешения, Кочухов и его коллеги установили, что магнитная структура звезды значительно проще, а величина магнитного поля значительно ниже, чем получено в более ранних исследованиях. Было найдено, что локальный максимум магнитного поля составляет 12 кГс, а величина среднего поля — 4 кГс, что примерно в 3 раза ниже, чем предсказывалось в модели квадрупольного поля. Топология поля лучше описывается асимметричным диполем, нежели осесимметричным квадруполем. Авторы заключают, что топология магнитного поля HR 5624 не такая необычная, как предполагалось ранее. Рассматривая этот результат наряду с предыдущими, они приходят к выводу о том, что ожидавшаяся у значительного числа горячих магнитных звезд

квадрупольная структура поля у реальных звезд вероятно не существует. Это согласуется с MHD-вычислениями эволюции реликтового поля, стабилизирующего внутренние слои в недрах звезды.

В работе [55] исследуется сложная топология магнитного поля холодной Ар-звезды 49 Cam. Сложность структуры профилей параметров Стокса у нее отмечалась ранее. В настоящей работе представлены магнитная и химическая карты поверхности, полученные с использованием кода Invers10 магнитного доплеровского картирования и спектрополяриметрических данных высокого разрешения по наблюдениям со спектрополяриметрами ESPaDOnS и Narval на CFHT. Карта магнитного поля 49 Cam имеет относительно сложную структуру. При описании с помощью сферических гармоник существенным оказывается вклад гармоник до $\ell = 3$, включая тороидальные компоненты. Наблюдения не могут быть объяснены простой мультиполярной структурой низкого порядка. Для 49 Cam характерна такая степень сложности магнитного поля, которая не отмечается на магнитных картах других холодных звезд. Также построены карты распределения по поверхности 9 химических элементов, включая Ca, Sc, Ti, Cr, Fe, Ce, Pr, Nd и Eu. Сравнив их с геометрией поля, авторы не обнаружили явной зависимости между распределением содержания некоторых химических элементов и магнитными картами, хотя для ряда других элементов какие-то связи были найдены.

Русомаров и др. [56] исследовали топологию магнитного поля и распределение химических пятен по поверхности Ар-звезды HD 119419. Для анализа были использованы спектры круговой и линейной поляризации, полученные на спектрополяриметре HARPSpol на 3.6-м телескопе. Эти данные были проанализированы с помощью мультилинейной диагностической техники, а детальное моделирование проводилось программой магнитного доплеровского картирования MDI. Были получены новые данные о продольном магнитном поле, уточнен период вращения и определены фундаментальные параметры звезды. Измерения четырех параметров Стокса показали, что звезда имеет умеренно сложное магнитное поле со средней величиной 18 кГс на поверхности, при этом максимальная величина локального поля достигает 24 кГс. Доминирует полоидальная дипольная компонента, однако виден существенный вклад сферических гармоник высокого порядка. Комбинация диполь+квадруполь не воспроизводится в параметрах Стокса Q и U . Распределение of Fe, Cr, Ti, и Nd характеризуется большими градиентами содержания и отсутствием четкой корреляции со структурой магнитного поля.

Оксала и др. [57] провели магнитное и химическое картирование Вр-звезды 36 Lynx (HD 79158).

Предыдущие исследования этой звезды показали наличие у нее умеренно сильного поля и неравномерное распределение элементов по поверхности. Новые измерения продольного магнитного поля B_l проведены с помощью мультилинейной LSD-методики. Построена кривая B_l с фазой периода вращения, которая указывает на наличие сильного поля с отклонениями от чистого диполя. Авторы нашли существенный вклад тороидальной компоненты. Она предсказана теоретически, но как правило, не наблюдается у Ap/Vp-звезд.

Согласно химической карте содержание гелия возрастает в областях с сильным радиальным магнитным полем. Усиление кремния отмечается в двух областях, также там, где радиальное поле сильнее. Увеличение содержания титана и железа примерно такое же, как и у гелия, но повышенная концентрация наблюдается в областях, где радиальное поле слабое, близко к магнитному экватору.

Кочухов и Рябчикова [58] провели численное моделирование процессов диффузии в намагниченной атмосфере и сравнили результаты вычислений с картами распределения химического состава по поверхности, полученными из наблюдений. Такое сравнение в целом неблагоприятно для современной теории диффузии, так как очень немногие химические элементы наблюдаются в форме колец с увеличенным содержанием в области горизонтального поля, как предсказывается теорией, и имеется много примеров аккумуляции элементов в области зон радиального поля, что расчетами диффузии не может быть объяснено.

Кочухов [59] выполнил обзор последних результатов по картированию магнитной и химической поверхности звезд ранних спектральных классов. Рассматривается надежность методики картирования при использовании спектрополяриметрической инверсии. Критически оцениваются теоретические попытки интерпретации магнитных и химических карт в рамках, например, теории реликтового поля и теории атомной диффузии.

Шульц и др. [60] обсуждают вопрос о вкладе исследований ранних магнитных В-звезд в изучение ранних В-звезд в целом. Для определения магнитных и вращательных свойств, авторы проанализировали большой объем спектрополяриметрических данных. Из выборки, включающей 51 магнитную звезду в интервале спектральных классов В0–В5, у 15 объектов определен новый период вращения. Найдены физические параметры, магнитные поля и время магнитного торможения. Оказалось, что звезды с сильной эмиссией $H\alpha$ вращаются быстрее, более сильно намагничены и моложе, чем вся популяция в целом.

Сикора и др. [61] исследовали пекулярные звезды в ограниченной пространственной выборке —

на расстояниях до 100 пк. Было найдено 139 таких объектов. При анализе данных для поиска магнитного поля не найдено ни одной звезды с полем менее 300 Гс на полюсах диполя, что подтверждает существование “магнитной пустыни”. Углы наклона оси вращения к лучу зрения i распределены в пространстве случайным образом, а в распределении углов наклона оси диполя к оси вращения β наблюдается небольшой избыток для $\beta \lesssim 30$.

Глаголевский и Назаренко [62] построили модели магнитных полей трех звезд HD 18078, HD 37776 и HD 149438. Оказалось, что структуру поля каждой из них можно представить тремя диполями с разным взаимным расположением диполей.

4.2. Магнитные структуры не CP-звезд

Шульц и Ваде [63] подтвердили модель наклонного ротатора для экстремально медленно вращающейся среди всех массивных звезд O8if?p звезды HD 108. Период вращения P_{rot} составляет по крайней мере 55 лет. Шкала времени верхнего предела замедления ее вращения вдвое превосходит время жизни звезды на ГП, вычисленное по диаграмме Герцшпрунга–Рессела. Опубликованные ранее магнитные данные покрывали только малую долю (3.5%) периода вращения и, более того, в моменты этих наблюдений звезда находилась в фотометрическом и спектроскопическом низком состоянии с минимальной величиной продольного поля B_z . Новые наблюдения проведены 6 лет спустя. Звезда вернулась в спектроскопически высокое состояние, хотя эмиссионные линии еще не достигли максимума, в соответствии с предложенным 55-летним периодом. По новым измерениям поле $\langle B_z \rangle = -325 \pm 45$ Гс, что вдвое выше, чем в 2007–2009 гг., и ведет к увеличению нижнего предела дипольного поля на поверхности до величины более 1 кГс. Одновременное увеличение продольного поля и интенсивности эмиссий согласуется с моделью наклонного ротатора.

В обзоре современного состояния проблемы Кочухов и др. [64] рассматривают поверхностный магнетизм холодных не Ap-звезд. Показано, что в последние годы достигнут прогресс в проведении прямых наблюдений магнитных полей активных холодных звезд и изучении их поверхностных неоднородностей.

Нейнер и др. [65] сообщают об открытии магнитных А-сверхгигантов — потомков магнитных В-звезд главной последовательности. В рамках общей программы по комплексному изучению ярких звезд в обзоре BritePol, в которую входят наблюдения с наноспутниками BRITe (детальнее см. в [3]), авторы измерили магнитные поля всех звезд ярче 4^m . В работе представлены результаты для

трех из них. Магнитное поле найдено у всех трех, для подтверждения обнаружения поля и проверки переменности каждая наблюдалась несколько раз. Звездные параметры и эволюционный статус определялись на основании моделей, вычисленных при помощи женеvских программ. Полученный результат накладывает наблюдательные ограничения на развитие теории и будущих эволюционных моделей горячих звезд с включением реликтового магнитного поля.

В наблюдениях на GMRT Дас и др. [66] обнаружили у магнитной Вр-звезды HD 133880 когерентное радиоизлучение на частоте 610 MHz. Это только вторая магнитная звезда, у которой обнаружено когерентное радиоизлучение. Наблюдения покрыли полный цикл вращения, за исключением интервала фаз 0.17–0.24. Зарегистрировано неожиданное увеличение потока на порядок величины со 100% правой круговой поляризацией. По мнению авторов, отсутствие лево-циркулярно поляризованного излучения объясняется асимметричной топологией магнитного поля, а наблюдаемые особенности излучения обусловлены механизмом электронного циклотронного лазера.

Вейт и др. [67] использовали временные ряды спектрополяриметрических данных, а также методы доплеровского и доплер-зеemanовского картирования для изучения магнитного поля молодой умеренно вращающейся солнцеподобной звезды EK Draconis (HD 129333). Ее наблюдения проводились на спектрополяриметрах ESPaDoNS и NARVAL в течение нескольких сезонов с 2006 по 2012 год. Измеренные высокие уровни хромосферной активности указывают на переменную и активную хромосферу. В наблюдениях 2006, 2007 и 2008 гг. зарегистрированы большие пятненные структуры на средних широтах. Однако данные 2012 года свидетельствуют о существовании выраженного полярного пятна. Во все эпохи наблюдается сильное почти униполярное азимутальное поле. В ходе интенсивных 3-месячных наблюдений с декабря 2006 г. по февраль 2007 г. магнитное поле менялось от преимущественно тороидального (80%) до более сбалансированного полоидально-тороидального (40–60%). Хотя крупномасштабное магнитное поле эволюционировало за время наблюдений, в данных не видно изменений полярности.

В работе [68] изучается магнитная структура одиночного позднего гиганта 37 Com. Эта звезда относится к группе со слабой полосой G, что означает очень большой дефицит углерода в ее фотосфере. Авторы использовали данные спектрополяриметрии, что позволило одновременно измерять продольную компоненту поля, индикаторы активности линий и лучевые скорости звезды, и смогли провести прямое сравнение их переменности со

временем. Средние профили Стокса были экстрагированы методом LSD, одна карта поверхности звезды была реконструирована с использованием метода инверсии ZDI. Периодограммный анализ показал, что набор полученных данных согласуется с периодом вращения 111 суток. Согласно реконструированной магнитной карте магнитное поле звезды имеет сложную структуру с существенным вкладом тороидальной компоненты. Переменность во времени индикаторов активности, продольного поля и лучевых скоростей указывает на возможную эволюцию магнитной структуры поверхности на интервале времени 2008–2011 гг. Исследования химического состава методом синтетических спектров подтверждают аномальное содержание 37 Com. Вероятно, магнитная активность является следствием работы механизма динамо.

Основываясь на описанном в работе [4] методе измерений поперечного магнитного поля слабых звезд, Леоне и др. [69] предлагают его расширение для получения прямых измерений поперечной компоненты поля по регрессии Q и U параметров Стокса, полученных с высоким разрешением, как функции второй производной параметра Стокса I . Показано, что также становится возможным определение ориентации оси вращения в пространстве, исходя из периодической переменности поперечной компоненты вследствие ее вращения. Метод применен для данных, полученных на спектрополяриметре обсерватории Catania, для хорошо известной звезды β CrB.

Скалия и др. [70] разработали мультилинейную модификацию упомянутого выше метода наклонов и демонстрируют ее применение для измерений магнитных полей холодных звезд на примере ϵ Eri. Методика протестирована на спектрах, рассчитанных с использованием кода COSSAM, и на реальных спектрополяриметрических данных высокого разрешения. Показано, что предложенный мультилинейный метод наклонов является быстрой альтернативой методу LSD для измерений магнитных полей холодных звезд. Используя Фурье-преобразование полученных данных, авторы нашли долговременные изменения продольного поля, согласующиеся с периодом индекса активности 2.95 лет, который указывает на работу механизма звездного динамо.

В работе Тессоре и др. [71] рассматривается вопрос об измерении поверхностных магнитных полей красных сверхгигантов. Слабое магнитное поле было найдено недавно на поверхности α Ориона. Эта звезда пока является единственным M-сверхгигантом, у которого были проведены прямые измерения магнитных полей. Наблюдения выборки M-сверхгигантов проведены с целью проверить наличие у них магнитного поля. В результате были обнаружены слабые зеemanовские

особенности звездного происхождения у CE Tau , $\alpha^1 \text{ Her}$ и $\mu \text{ Ser}$. Для последней звезды необходимо учитывать сильную перекачку от сигнала линейной поляризации. Для всех трех звезд магнитное поле находится на уровне единиц Гаусс. Но у $\alpha^1 \text{ Her}$ продольное поле оказалось на порядок сильнее. Была найдена переменность поля у CE Tau и $\alpha^1 \text{ Her}$. Изменения согласуются с типичной динамической шкалой в атмосферах этих звезд. Отмечается, что магнитное поле не найдено на поверхности желтого сверхгиганта $\rho \text{ Cas}$. Таким образом, две звезды, CE Tau и $\mu \text{ Ser}$, имеют магнитное поле очень похожее на $\alpha \text{ Ori}$. Необнаружение поля у желтого сверхгиганта $\rho \text{ Cas}$ предполагает, что оно исчезает или, по крайней мере, становится ненаблюдаемым на самых поздних стадиях эволюции. Анализ показывает, что спектральную классификацию $\alpha^1 \text{ Her}$ необходимо изменить, отнеся ее к M-звездам асимптотической ветви гигантов.

4.3. Магнитная активность, хромосферные циклы и пятна

Отметим ряд статей И. С. Саванова с соавторами по изучению пятен и активности звезд разных типов на основании анализа результатов, полученных на спутнике Kepler. Рассматриваются очень объемные выборки объектов и используется одинаковая методика обработки и анализа данных.

В работе [72] проведен анализ запятненности и активности 1570 M-карликов. Изучены вариации параметра запятненности S с возрастом и с периодом вращения. В другой работе [73] эти авторы изучили 2846 звезд солнечного типа, имеющих эффективные температуры от 5700 K до 5800 K. Показано, что существуют две последовательности этих объектов с разной степенью активности. Активные звезды составляют примерно 10% от исследованных авторами звезд. Найдено, что активность наиболее запятненных звезд снижается с возрастом: как на уровне пятна, так и на уровне хромосферы она резко падает для звезд старше 4 млн лет.

В статье [74] исследуется активность звезд в Плеядах. Изучено 759 объектов одного возраста. Главный вывод статьи в том, что активность молодых звезд солнечного типа значительно больше, чем нынешнего Солнца. Молодые звезды солнечного типа вращаются значительно быстрее Солнца. Средний период вращения 4.3 суток. Результаты изучения маломассивных карликов в Плеядах согласуются с выводами, сделанными ранее при исследовании 1570 M-карликов (детали в работе [72]).

Колбин и Цымбал [75] проанализировали магнитную активность быстровращающихся звезд He 373 и AP 225 — членов скопления $\alpha \text{ Per}$.

Построена карта распределения пятен для обеих звезд. Пятна занимают 7% и 9% площади, соответственно. Разница температур — около 1000 градусов. Профили линии $\text{H}\alpha$ для обеих звезд переменны.

В работе [76] получены дополнительные доказательства субгодовой магнитной хромосферной циклической активности и активности скачков фазы в центральной звезде планетной системы $\tau \text{ Boo}$. Рассмотрены данные об S-индексе для этой ближайшей F-звезды, для поиска возможных циклических изменений на шкале времени менее 1 года и поиска эпизодов скачков фазы в наблюдениях S-индекса активности. $\tau \text{ Boo}$ наблюдалась 1278 отдельных ночей с очень неравномерным распределением покрытия: от 2 до 137 наблюдений в год. Наблюдения показали наличие периодической переменности на временах порядка 110–120 суток. Были найдены также скачки, когда наблюдаемый S-индекс активности падал от максимального до минимального уровня на шкале 1–2 недели.

5. ФОТОМЕТРИЯ. ПУЛЬСАЦИИ ЗВЕЗД

Смаддей и др. [77] представили результаты изучения большой выборки нормальных A- и Am-звезд — спектральные данные получены на LAMOST, а фотометрические на WASP. Обнаружено, что в противовес нормальным звездам, пульсации типа $\delta \text{ Sct}$ в Am-звездах ограничиваются в интервале эффективных температур от 6900 до 7600 K. Авторы нашли доказательства, что сфера действия пульсаций уменьшается с увеличением металличности (степени пекулярности). Максимум амплитуды пульсаций Am-звезд существенно не меняется с металличностью.

Такада-Нилаи и др. [78] провели спектроскопический и астросейсмический анализ A-звезды главной последовательности KIC 11145123. Согласно астросейсмическим моделям авторов наблюдается небольшой избыток гелия и низкая масса, равная 1.4 солнечной. Эти параметры указывают на то, что звезда является голубой убегающей звездой II типа населения. Период вращения довольно большой — около 100 суток. Наблюдения авторов отвергают идею принадлежности к Am- или Ap-звездам, подтверждая статус убегающей звезды. Однако, в рамках возможных сценариев образования убегающих звезд в результате различных процессов образования двойных, в случае KIC 11145123 не найдено никаких свидетельств присутствия вторичной компоненты.

Холдсворс и др. [79] зарегистрировали у быстроосциллирующей goAp звезды 2MASS J19400781–4420093 (J1940; $V = 13.1$) сильно искаженные квадрупольные пульсации. Звезда

была ранее обнаружена авторами статьи, которые нашли у нее большую амплитуду переменности в осцилляциях на уровне 34 mmag. Период осцилляций равен 8.2 минуты. Была организована кампания наблюдений этого объекта на всемирном телескопе, основные данные получены в Южно-Африканской обсерватории. При наблюдениях получено, что пульсации происходят в искаженной квадрупольной моде с необычной фазовой кривой. Спектральный анализ показывает, что звезду можно классифицировать как химически пекулярную A7 Vp Eu(Cr).

Друри и др. [80] сообщают, что большие изменения блеска у Кеплеровской звезды KIC 2569073 $V = 14.22$. Эта звезда, найдена авторами в скоплении NGC 6791. BVRI-фотометрия показала переменность блеска, вызванную пятнами, с периодом 14.67 суток и амплитудой 0.034 mag, одной из наибольших для Ar-звезд. Блеск в цвете V меняется в противофазе с VRI. Фотометрия Кеплер показала значительное увеличение амплитуды переменности по сравнению с наземными наблюдениями, проведенными 20 лет тому назад.

Микулешек и др. [81] исследуют вращение CP-звезд. В статье дан обзор последних результатов авторов по изучению звезд с нестабильными периодами вращения. Утверждается, что изменения этого периода отражают вертикальное дифференциальное вращение с флуктуацией только верхних слоев атмосферы. Эффект найден пока у трех звезд.

6. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химический состав выборки звезд типа δ Sct был исследован в работе [82]. Найдены фундаментальные параметры и химический состав 8 объектов. Авторы работы показали, что в целом химический состав солнечный, однако некоторые элементы имеют аномалии, характерные для Am-звезд.

Штифт и Алесиан [83] впервые представили трехмерную модель со стратификацией содержания (возникающей из-за атомной диффузии) 16 металлов с применением неосесимметричного магнитного поля примерно такой конфигурации, которое наблюдается в реальных Ar/Vp-звездах. Найдено, что химические элементы распределены в сложных пятнах во всех трех измерениях, очень далеких от простых колец, которые предполагались доминирующей структурой при модели поля в виде центрального диполя.

Рябчикова и Романовская [84] исследовали зависимость содержания редкоземельных элементов от эффективной температуры и магнитного поля в атмосферах химически пекулярных звезд. Они

нашли содержание редкоземельных элементов в атмосферах 26 магнитных CP-звезд, в интервале температур 7000–10 000 К. Редкоземельная аномалия (разница в содержании, полученной по первой и второй стадиям ионизации) уменьшается с ростом эффективной температуры вплоть до полного исчезновения для всех элементов, кроме европия. Аномалии наиболее изученного элемента Nd — уменьшается с увеличением поля для холодных звезд. У горячих звезд аномалии Nd нет. Найдена антикорреляция между содержанием элементов железного пика и редкоземельных элементов, что дополнительно свидетельствует о разной стратификации этих элементов в атмосферах Ar-звезд.

Кочухов и Рябчикова [85] предлагают тест для проверки теории диффузии. Авторы предлагают проводить прямые сравнения наблюдений с картами распределения химических элементов. Установлено, что в зависящей от времени теоретической диффузионной модели, среднее содержание Fe и Cr сильно недооценено, достигая фактора 1000 для Cr. Авторы также демонстрируют, что инверсионные коды доплеровского картирования, основанные на моделировании индивидуальных линий металлов или усредненных профилей линий, вычисленные для трехмерных теоретических распределений содержания, корректно дают возможность реконструировать горизонтальные химические карты, несмотря на игнорирование вертикальных вариаций содержания. Вертикальный градиент содержания не может быть объяснен вычислениями диффузии.

В работе [86] проведен статистический анализ HgMn-звезд. На большом материале подтверждены прежние зависимости степени пекулярностей разных элементов от температуры. Показано, что степень аномальности содержания не зависит от степени кратности системы.

Результаты астрометрического и спектроскопического изучения звезды типа δ Scuti HD 21190 и ее широкого компаньона CPD – 83.64B представлены в статье [87]. Авторы подтверждают химическую пекулярность HD 21190. Найдено также, что звезда представляет собой двойную систему с компаньоном CPD – 83.64B. Имеет место сложное взаимодействие между звездными пульсациями, магнитным полем и химическим содержанием.

Халак и др. [88] провели анализ химсостава двух CP-звезд HD 41076 и HD 148330. Спектры высокого разрешения получены на эшелле-спектрополяриметре на CFHT. Использовался код zeeman2, проанализировано несколько сотен линий. Найдены физические параметры звезд и их химический состав. У обеих звезд найден дефицит легких элементов и сверхобилие элементов

железного пика и редких земель, что типично для химически пекулярных звезд.

Зверко и др. [89] продолжили серию работ по определению физических параметров и химического состава звезд, у которых по литературным данным очень сильно различаются скорости вращения по линиям Ca II 3933 и Mg II 4481. В очередной работе была исследована звезда SB1 HD 199892. Авторы нашли слабые линии второго компонента и оценили массы обеих звезд: главный компонент 4.6 солнечных, вторичный — 2.2 солнечных. Определен химический состав главного компонента.

7. МАГНИТНЫЕ БЕЛЫЕ КАРЛИКИ И ДРУГИЕ ВЫРОЖДЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ

В работе Валеева и др. [90] приводятся результаты фотометрических наблюдений ряда магнитных белых карликов с целью поиска у них переменности блеска. В результате этих наблюдений в полосе V у классического сильномагнитного белого карлика GRW +70 8247 обнаружена значимая переменность с вероятным периодом от нескольких дней до нескольких десятков дней, полуамплитуда которой составляет около $0^m.04$. Переменность также обнаружена и у хорошо известного белого карлика GD 229. Переменность наиболее вероятно связана с вращением этих звезд.

Борисов и др. [91] представили результаты спектральных и фотометрических исследований нового поляра CRTS CSS 130604 J215427+155714, выполненных на телескопах САО РАН. Анализ рядов фотометрических наблюдений позволил уточнить орбитальный период системы $0^d.0672879$. Построены кривые лучевых скоростей и прослежены изменения интенсивностей линий водорода и ионизованного гелия. По линиям $H\alpha$ и $He II$ построены доплеровские карты. Показано, что область формирования линий локализована вблизи точки Лагранжа. Выполнены оценки параметров системы.

В работе [92] приведены результаты измерений магнитного поля массивной рентгеновской двойной звезды X Per. Анализ поляризации в крыльях сильных эмиссионных линий показал, что поле, возможно, существует, Период интерпретируется как период вращения. Поле по линиям поглощения при их анализе не привел к обнаружению поля по ним.

Ландстрит и др. [93] провели мониторинг магнитного поля и моделирование для двух белых карликов с экстремально слабыми полями. Диапазон наблюдаемых у белых карликов магнитных полей находится в пределах от нескольких кГс до нескольких сотен МГс, но почти все известные белые карлики имеют поле более 1 МГс. Используя циркулярную спектрополяризацию, авторы хотят

заполнить большой пробел в наблюдательных данных, касающийся слабых полей (менее 200 кГс). В цитируемой работе авторы сообщают об открытии и мониторинге большой периодической магнитной переменности двух белых карликов WD 2047+372 и WD 2359–434 с супер-слабыми магнитными полями. WD 2047+372 имеет продольное поле, меняющееся от -12 до $+15$ кГс с периодом 0.243 суток, модуль магнитного поля на поверхности достигает 60 кГс. Поле звезды имеет дипольную структуру. WD 2359–434 имеет продольное поле постоянной положительной полярности, которое периодически меняется от 0 до $+12$ кГс с периодом 0.112 суток, средний модуль магнитного поля меняется от 50 до 100 кГс. Поле звезды имеет структуру значительно более сложную, чем дипольная.

Баньюло и др. [94] представляют выполненный ими обзор магнитных полей 60 белых карликов с точностью порядка 500 Гс. Большая выборка и высокая точность измерений позволила получить четкую картину распределения магнитных полей у вырожденных звезд которая показывает, что относительно слабые поля очень редки среди белых карликов.

8. ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Тема поисков экзопланет и их родительских звезд очень обширна и ее освещение выходит за рамки нашего обзора. Здесь мы коснемся лишь некоторых вопросов, связанных с поляризацией и магнитными полями этих объектов.

Костогриз и др. [95] рассмотрели разницу между плоско-параллельной и сферической моделью атмосферы родительской звезды при поляризации транзитных планет. Для правильной интерпретации фотометрических и поляризационных транзитов экзопланет необходимы очень точные вычисления вариаций от центра к лимбу интенсивности и линейной поляризации родительской звезды. Было необходимо решить вопрос — можно ли применять простые плоско-параллельные модели атмосферы или необходимо использовать более сложные. Авторы вычислили поток и вариации поляризации для выборки из 405 внесолнечных систем. Ими сделан вывод, что в большинстве случаев можно использовать плоско-параллельную аппроксимацию модели звездной атмосферы, так как различия между ней и сферической моделью очень малы.

Килик и др. [96] исследовали различные климатические состояния обитаемых экзопланет в зависимости от наклона оси вращения и интенсивности излучения. Использовалась модель общей циркуляции атмосферы с жидким океаном (Aquaplanet — аквапланета) и замерзшим (Cryoplanet — криопланета). Показано, что климат может существенно и быстро меняться при очень

маленьких изменениях орбитальных параметров. Рассмотрены разные варианты атмосферных циркуляций, влияющих на стабильность климата аква- и криопланет.

По наблюдениям родительских звезд с экзопланетами миссиями Kepler и K2 при помощи астросейсмологии Норс и др. [97] определили массы сходящих с ГП А-звезд. Целью авторов было выяснение причины, почему массы, определенные спектроскопически по изохронам, систематически переоценены по сравнению с данными астросейсмологии. Для изучения было выбрано 7 очень старых А-звезд. Оказалось, что ошибки определений масс больше, чем найденная авторами разница.

Граужанина и др. [98] приводят первые результаты спектральных наблюдений транзитов экзопланет в САО РАН на 6-м телескопе. У экзопланеты WASP-32b зафиксировано значительное изменение интенсивности и эквивалентной ширины спектральной линии $H\alpha$ в спектре родительской звезды в момент транзита. В транзите эквивалентная ширина линии на 8–10% больше, чем вне его. Обработка и анализ архивных данных наблюдений WASP-32b со спектрографом HARPS также подтверждают наличие модуляции линии $H\alpha$ в момент транзита. Данные наблюдений свидетельствуют о существовании у WASP-32b оболочки, заполняющей полость Роша планеты, и кометоподобного хвоста, геометрия и ориентация которого относительно наблюдателя меняются.

В работе Гадельшин и др. [99] представлены результаты спектроскопического подтверждения кандидатов в экзопланеты из каталога космической миссии Кеплер. С помощью спектрографа HES 6-м телескопа БТА лучевые скорости родительских звезд KOI-974.01, KOI-2687.01/02 и KOI-2706.01 проверены на доплеровскую переменность. Согласно полученным верхним пределам, KOI-01 имеет массу существенно меньше 12 масс Юпитера, что прямо указывает на его планетную природу. Показано, что объекты KOI-2687.01 и KOI-2687.02, по данным фотометрии имеющие радиусы земного размера или размеры белого карлика, не могут быть белыми карликами, а значит и они являются экзопланетами.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы рассмотрели 99 статей посвященных магнитным полям химически пекулярных и родственных им звезд. Большая часть из них опубликована в трех журналах: MNRAS (30 статей), Astronomy and Astrophysics (16 статей), Astrophysical Bulletin (13 статей) и в сборниках двух конференций ASPC т. 510 — 10 статей и Scalate Pleso Observatory Contributions т. 48 —

7 статей. На долю всех остальных журналов и сборников приходится 23 публикации. В нашем обзоре представлены аппаратурно-методические статьи, результаты наблюдений магнитных полей, а также построений магнитных и химических карт поверхности звезд различных типов. Обсуждаются также различные физические механизмы, действующие в атмосферах звезд с сильными магнитными полями.

Важнейшие аппаратурные и методические достижения следующие. Введен в строй спектрополяриметр с очень высоким спектральным разрешением PEPSI Потсдамской обсерватории. Предложены варианты модернизации уже существующих приборов. Пискунов и Валенти развили возможности их популярного пакета программ SME. Численные эксперименты показали, что современные модели Допплер-Зеемановского картирования могут успешно реконструировать химически аномалии в виде круглых пятен на различных широтах или в виде пояса на магнитном экваторе.

Получены новые обширные данные наблюдений. Открыты новые магнитные звезды в ассоциации Орион OB1 в наблюдениях на 6м телескопе, показано, что доля пекулярных звезд относительно нормальных А- и В-звезд и доля магнитных звезд относительно химически пекулярных звезд в этой ассоциации падает с возрастом.

На спектрополяриметре FORS2 VLT сделана попытка обнаружить магнитные поля Of?p -звезд в Магеллановых облаках. Поле пока не обнаружено, необходимо повышать точность измерений. Найдена звезда с очень сильным полем CPD-62 2124. Подробно исследованы несколько двойных и кратных систем с магнитными компонентами. Во всех случаях магнитным полем обладает главная звезда системы, как правило, быстрый ротатор. На основании большой выборки изучено вращение магнитных звезд и определены их фундаментальные параметры.

Проводилось магнитное картирование химически пекулярных и звезд других типов. Обсуждаются вопросы несоответствия предсказаний теории диффузии с эмпирически полученными картами распределения химических элементов по поверхности звезд.

Исследовались магнитные поля и активность солнечноподобных и более холодных звезд. Найдена эволюция пятен на промежутке времени в несколько лет. Продолжались классические работы по фотометрии и спектроскопии пекулярных звезд. Представлены также несколько статей, посвященных изучению магнитных полей, переменности блеска и спектра у магнитных белых карликов и полярных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Российский научный фонд за частичную финансовую поддержку работы (Грант РФНФ 18-12-00423). Автор благодарит ответственного секретаря редколлегии журнала В. Н. Комарову за внимательное прочтение рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **70**, 191 (2015).
2. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **71**, 314 (2016).
3. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **72**, 286 (2017).
4. S. Bagnulo, T. Szeifert, G. A. Wade, et al., *Astron. and Astrophys.* **389**, 191 (2002).
5. V. E. Panchuk, G. A. Chuntanov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 339 (2014).
6. N. Piskunov, F. Snik, A. Dolgoplov, et al., *The Messenger* **143**, 7 (2011).
7. M. Aurière, in *EAS Publications Series*, Edited by J. Arnaud and N. Meunier (2003), *EAS Publications Series*, vol. 9, p. 105.
8. K. G. Strassmeier, I. Ilyin, and M. Steffen, *Astron. and Astrophys.* **612**, A44 (2018).
9. K. G. Strassmeier, I. Ilyin, and M. Weber, *Astron. and Astrophys.* **612**, A45 (2018).
10. C. E. Mack, K. G. Strassmeier, I. Ilyin, et al., *Astron. and Astrophys.* **612**, A46 (2018).
11. N. Piskunov, in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 514.
12. D. A. Sazonenko, D. E. Kukushkin, A. V. Bakhholdin, and G. G. Valyavin, in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 547.
13. D. E. Kukushkin, D. A. Sazonenko, A. V. Bakhholdin, and G. G. Valyavin, in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 542.
14. E. R. Muslimov, S. N. Fabrika, and G. G. Valyavin, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* (2017), *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 10329, p. 103293R.
15. V. E. Panchuk, Y. B. Verich, V. G. Klochkova, et al., in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 559.
16. P. Stee, F. Allard, M. Benisty, et al., ArXiv:1703.02395 (2017).
17. N. Piskunov and J. A. Valenti, *Astron. and Astrophys.* **597**, A16 (2017).
18. E. Aronson and N. Piskunov, *Astron. J.* **155**, 208 (2018).
19. O. Kochukhov, *Astron. and Astrophys.* **597**, A58 (2017).
20. O. Kochukhov, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48**, 58 (2018).
21. E. Semenko and E. Semenova, in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 240.
22. R. Monier, M. Gebran, F. Royer, et al., *Astrophys. J.* **854**, 50 (2018).
23. S. Cariddi, N. M. Azatyan, P. Kurfürst, et al., *New Astronomy* **58**, 1 (2018).
24. S. Cariddi, N. M. Azatyan, P. Kurfürst, et al., *VizieR Online Data Catalog (other)* **220** (2017).
25. G. Mathys, *Astron. and Astrophys.* **601**, A14 (2017).
26. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 165 (2017).
27. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, E. S. Semenova, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 384 (2017).
28. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, et al., *Astronomische Nachrichten* **338**, 919 (2017).
29. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 391 (2017).
30. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, and D. O. Kudryavtsev, in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 214.
31. J. H. Grunhut, G. A. Wade, C. Neiner, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 2432 (2017).
32. G. A. Wade, M. Shultz, J. Sikora, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456**, 2517 (2017).
33. S. Bagnulo, Y. Nazé, I. D. Howarth, et al., *Astron. and Astrophys.* **601**, A136 (2017).
34. M. Munoz, G. A. Wade, Y. Nazé, et al., *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48**, 149 (2018).
35. G. Mathys, *VizieR Online Data Catalog* **360** (2017).
36. N. Castro, L. Fossati, S. Hubrig, et al., *Astron. and Astrophys.* **597**, L6 (2017).
37. J. F. González, S. Hubrig, N. Przybilla, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467**, 437 (2017).
38. S. Hubrig, A. F. Kholtygin, M. Schöller, and I. Ilyin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467**, L81 (2017).
39. S. Hubrig, N. Przybilla, H. Korhonen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471**, 1543 (2017).
40. S. Hubrig, Z. Mikulášek, A. F. Kholtygin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472**, 400 (2017).
41. E. Semenko, in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 224.

42. Y. Nazé, C. Neiner, J. Grunhut, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467**, 501 (2017).
43. Y. Nazé and E. Alecian, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48**, 98 (2018).
44. M. Shultz, T. Rivinius, G. A. Wade, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **475**, 839 (2018).
45. C. Neiner, G. A. Wade, and J. Sikora, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468**, L46 (2017).
46. S. Joshi, E. Semenko, A. Moiseeva, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467**, 633 (2017).
47. V. V. Butkovskaya, A. A. Savushkin, S. I. Plachinda, and D. N. Baklanova, in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 243.
48. S. Hümmerich, K. Bernhard, E. Paunzen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **466**, 1399 (2017).
49. M. Netopil, E. Paunzen, S. Hümmerich, and K. Bernhard, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468**, 2745 (2017).
50. M. Netopil, *VizieR Online Data Catalog* **746** (2017).
51. M. Netopil, *VizieR Online Data Catalog* **746** (2017).
52. Z. Z. Mikulášek, J. Krtička, J. Janík, et al., in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 220.
53. M. J. Stift and F. Leone, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 2880 (2017).
54. O. Kochukhov, J. Silvester, J. D. Bailey, et al., *Astron. and Astrophys.* **605**, A13 (2017).
55. J. Silvester, O. Kochukhov, N. Rusomarov, and G. A. Wade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471**, 962 (2017).
56. N. Rusomarov, O. Kochukhov, and A. Lundin, *Astron. and Astrophys.* **609**, A88 (2018).
57. M. E. Oksala, J. Silvester, O. Kochukhov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **473**, 3367 (2018).
58. O. Kochukhov and T. A. Ryabchikova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474**, 2787 (2018).
59. O. Kochukhov, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48**, 58 (2018).
60. M. Shultz, G. Wade, T. Rivinius, et al., in *The Lives and Death-Throes of Massive Stars*, Edited by J. J. Eldridge, J. C. Bray, L. A. S. McClelland, and L. Xiao (2017), *IAU Symposium*, vol. 329, pp. 126–130.
61. J. Sikora, G. A. Wade, and J. Power, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48**, 87 (2018).
62. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **72**, 411 (2017).
63. M. Shultz and G. A. Wade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468**, 3985 (2017).
64. O. Kochukhov, P. Petit, K. G. Strassmeier, et al., *Astronomische Nachrichten* **338**, 428 (2017).
65. C. Neiner, M. E. Oksala, C. Georgy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471**, 1926 (2017).
66. B. Das, P. Chandra, and G. A. Wade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474**, L61 (2018).
67. I. A. Waite, S. C. Marsden, B. D. Carter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 2076 (2017).
68. S. Tsvetkova, P. Petit, R. Konstantinova-Antova, et al., *Astron. and Astrophys.* **599**, A72 (2017).
69. F. Leone, C. Scalia, M. Gangi, et al., *Astrophys. J.* **848**, 107 (2017).
70. C. Scalia, F. Leone, M. Gangi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472**, 3554 (2017).
71. B. Tessore, A. Lèbre, J. Morin, et al., *Astron. and Astrophys.* **603**, A129 (2017).
72. E. S. Dmitrienko and I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **61**, 122 (2017).
73. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **61**, 461 (2017).
74. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **61**, 996 (2017).
75. A. I. Kolbin and V. V. Tsymbal, *Astronomy Reports* **61**, 521 (2017).
76. J. H. M. M. Schmitt and M. Mittag, *Astron. and Astrophys.* **600**, A120 (2017).
77. B. Smalley, V. Antoci, D. L. Holdsworth, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 2662 (2017).
78. M. Takada-Hidai, D. W. Kurtz, H. Shibahashi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **470**, 4908 (2017).
79. D. L. Holdsworth, D. W. Kurtz, H. Saio, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **473**, 91 (2018).
80. J. A. Drury, S. J. Murphy, A. Derekas, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471**, 3193 (2017).
81. Z. Mikulášek, J. Krtička, E. Paunzen, et al., *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48**, 203 (2018).
82. A. I. Galeev, V. M. Berdnikova, D. V. Ivanova et al., in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 199.
83. G. Alecian and M. J. Stift, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468**, 1023 (2017).
84. T. A. Ryabchikova and A. M. Romanovskaya, *Astronomy Letters* **43**, 252 (2017).
85. O. Kochukhov and T. A. Ryabchikova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474**, 2787 (2018).
86. S. Ghazaryan and G. Alecian, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Edited by A. M. Mickaelian, H. A. Harutyunian, and E. H. Nikoghosyan (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 511, p. 121.
87. E. Niemczura, R.-D. Scholz, S. Hubrig, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **470**, 3806 (2017).
88. V. Khalack, G. Gallant, and C. Thibeault, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471**, 926 (2017).
89. J. Zverko, I. Romanyuk, I. Iliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 16 (2017).

90. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 44 (2017).
91. N. V. Borisov, M. M. Gabdeev, V. V. Shimansky, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 184 (2017).
92. G. Valyavin, N. R. Ikhsanov, N. G. Beskrovnaya, et al., in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 229.
93. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. Valyavin, and A. F. Valeev, *Astron. and Astrophys.* **607**, A92 (2017).
94. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, A. J. Martin, and G. Valyavin, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48**, 236 (2018).
95. N. M. Kostogryz, T. M. Yakobchuk, S. V. Berdyugina, and I. Milic, *Astron. and Astrophys.* **601**, A6 (2017).
96. C. Kilic, C. C. Raible, and T. F. Stocker, *Astrophys. J.* **844**, 147 (2017).
97. T. S. H. North, T. L. Campante, A. Miglio, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472**, 1866 (2017).
98. A. O. Grauzhanina, G. G. Valyavin, D. R. Gadelshin, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 67 (2017).
99. D. R. Gadelshin, G. G. Valyavin, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 330 (2017).

Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars. 4. Main Results of 2017 and Near-Future Prospects

I. I. Romanyuk

We present a literature survey of about a hundred papers concerned with “Magnetic fields and physical parameters of chemically peculiar and related stars” published mainly in 2017. We considered instrumental and methodical issues, gave first results obtained with the high-resolution PEPSI spectropolarimeter, described new programs for data reduction and analysis. New magnetic chemically peculiar stars in the Orion association were discovered, weak (of the order of one Gauss) magnetic fields were found in stars of other types. The first attempt was made to detect extragalactic magnetic stars. Magnetic field maps and maps of element distribution over the surfaces of stars of different types were constructed, evolution of spots on cool stars was found. New magnetic, spectroscopic, and photometric data have been obtained for magnetic white dwarfs and degenerate stars of other types.

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