

УДК 524.35-337

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ И РОДСТВЕННЫХ ИМ ЗВЕЗД. 5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2018 ГОДА И АНАЛИЗ БЛИЖАЙШИХ ПЕРСПЕКТИВ

© 2019 И. И. Романюк^{1*}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 18 июня 2019 года; после доработки 20 июля 2019 года; принята к публикации 20 июля 2019 года

Приводится обзор около сотни работ, выполненных по теме «Магнитные поля и физические параметры химически пекулярных и родственных им звезд», опубликованных в основном в 2018 г. в ведущих астрономических изданиях. Рассмотрены проекты новых телескопов и навесного оборудования для их оснащения, а также первые результаты, полученные на новых, недавно введенных в строй инструментах. Выполнен обзор новых работ по методике наблюдений, обработке и анализу данных. Представлены результаты спектроскопических исследований пекулярных звезд: их химический состав и другие параметры. Продолжались как классические наземные фотометрические наблюдения, так и выполнялась высокоточная фотометрия на космических телескопах. Наибольшее внимание в обзоре уделено магнитным полям звезд. Представлены результаты наблюдений крупномасштабных полей ОВА-звезд и локальных полей холодных активных звезд. Обнаружены десятки новых магнитных звезд. Рассматриваются также результаты некоторых наблюдений магнитных белых карликов и экзопланет, представляющих интерес в рамках рассматриваемой нами проблемы.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования магнитных звезд активно продолжаются. Ежегодно публикуется около 300 статей по этой теме. Разрабатываются и внедряются новые методы наблюдений и обработки данных. Полученные результаты меняют представления о физике наблюдаемых явлений. Проведены многие тысячи высокоточных фотометрических наблюдений на космических аппаратах (Кеплер и др.); кривые блеска с наилучшей точностью наблюдаются на космическом телескопе TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite). Эти данные позволяют строить высокоточные карты распределения температуры на поверхности звезд, изучать новые физические явления.

Настоящая статья является продолжением серии наших ежегодных обзоров важнейших результатов в области исследований химически пекулярных и родственных им магнитных звезд. В работах [1–4] представлены основные результаты, полученные в 2014–2017 гг.

Как и прежде, мы анализируем важнейшие статьи, опубликованные в основном в ведущих мировых астрономических журналах, а также в сборниках докладов международных конференций, в част-

ности, конференции «Physics of Magnetic Stars», проходившей в CAO РАН в период с 1 по 5 октября 2018 г.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Астрономия — наука наблюдательная, новые результаты удастся получить, как правило, при увеличении количества наблюдений и повышении их точности. Наиболее эффективный (и дорогостоящий) путь в этом направлении — развитие инструментальной базы: создание новых телескопов и навесного оборудования, высокоточных и высокочувствительных средств регистрации изображений и спектров. Важно также совершенствовать методы обработки и анализа данных.

2.1. Новые телескопы и навесное оборудование

Одним из четырех важнейших проектов NASA, реализация которых намечена на 2020-е годы, является большой ультрафиолетовый/оптический/инфракрасный спутник (Large Ultraviolet/Optical/Infrared Surveyor (LUVOIR)). Он предназначен для расширения наших представлений о происхождении и эволюции галактик, звезд, планет и жизни за пределами Земли. В статье [5] представлен POLLUX — спектрополяриметр высокого

*E-mail: roman@sao.ru

спектрального разрешения для ультрафиолетовой области с 15-м первичным зеркалом LUVOIR. Он разрабатывается консорциумом европейских астрономов и поддерживается французским космическим агентством (CNES). Спектрополяриметр будет работать в широкой спектральной области (от 98 до 390 нм) с высоким спектральным разрешением ($R = 120\,000$), что позволит разделять узкие ультрафиолетовые эмиссионные и абсорбционные линии и изучать барионный цикл в широком интервале космического времени. POLLUX будет обладать уникальной возможностью регистрировать поляризованный свет от земноподобных экзопланет (и их спутников) или от околопланетного вещества, обнаруживать магнитосферы планет, звезд и их взаимодействие. Будет изучаться физика аккреционных дисков вокруг молодых звезд и белых карликов или сверхмассивных черных дыр в AGN.

Более детально оптическая схема прибора POLLUX представлена Муслимовым и др. в работе [6]. Инструмент сможет работать в двух модах: спектрополяриметрической и спектроскопической. Рабочая область распределена по трем каналам: далекий (90–124.5 нм), средний (118.5–195 нм) и близкий (195–390 нм) ультрафиолет. Каждый из каналов будет соединен с эшелле-спектрографом. Bouget [7] приводит обзор новых проектов, которые можно выполнить на этом инструменте, способных произвести революцию в наших знаниях о Вселенной.

Началась разработка спектральных приборов для крупнейшего в мире 39-м телескопа ELT. Упомянем три статьи, в которых описывается спектрополяриметрическое оборудование будущего телескопа.

В работе [8] представлена фаза А разработки оптического/инфракрасного спектрографа высокого разрешения ELT-HIRES, который создается консорциумом из тридцати институтов в двенадцати странах, сформировавших команду из более чем 200 ученых и инженеров. Основная задача ELT-HIRES — поиски жизни на экзоплантах, проверка стабильности фундаментальных констант, прямое обнаружение ускорения расширения Вселенной. За основу взят проект волоконного эшелле-спектрографа скрещенной дисперсии с двумя ультрастабильными спектральными рукавами, позволяющими работать одновременно в спектральной области 0.4–1.8 мкм со спектральным разрешением $R = 100\,000$.

Работа [9] описывает фазу А разработки поляриметрического устройства для ELT-HIRES, которое будет установлено в промежуточном фокусе и в фокусе Несмита телескопа. Промежуточный фокус (IF) предпочтительнее использовать для

высокоточной спектрополяриметрии. Представлен оптико-механический дизайн деталей, описаны наблюдательная и калибровочная моды, выполнено компьютерное моделирование инструментальной поляризации, возникающей как от зеркал телескопа, так и оптических элементов поляриметра.

Оптическая схема поляриметра для ELT представлена в работе [10]. Хорошо известно, что для уменьшения инструментальной поляризации и перекачки поляризованного света оптимальным является размещение поляриметра в симметрично вращающемся фокусе. Для случая ELT таким является промежуточный фокус (IF). В статье детально описывается поляризационная оптика и пути прохождения поляризованных лучей, деротатор, корректор атмосферной дисперсии, расщепитель лучей на две полосы ($UBVRI$, $zYJH$), стабилизатор поля и др. Два поляризованных луча проходят по четырем длинным волокнам в волоконный модуль спектрографа, где на выходе волокна отношение светосилы конвертируется от $f/2.5$ до $f/20$.

Переходим от описания проектов к результатам, демонстрирующим возможности уже существующих спектрографов. Strassmeier et al. [11] описывают результаты, полученные на новом волоконном спектрографе PEPsi, установленном на большом бинокулярном телескопе (Large Binocular Telescope (LBT)). Рабочий спектральный диапазон прибора — от 384 до 913 нм. Имеются три варианта спектрального разрешения: $R = 50\,000$, $130\,000$ и $250\,000$. Мода $R = 130\,000$ также используется с двулучевым $IQUV$ -Стокс-поляриметром. В случае плохих изображений или при наблюдениях слабых объектов используется мода $R = 50\,000$. Если LBT сильно загружен другими программами, возможен переброс света от 1.8-м солнечного телескопа VATT при помощи волокна длиной 450 м. Среди научных результатов, полученных с PEPsi, — исследование планетной системы Kepler-444 с высоким спектральным разрешением $R = 250\,000$ и отношением S/N от нескольких сотен до нескольких тысяч, транзиты нескольких экзопланет, включая TRAPPIST-1, и первое доплеровское изображение EK Dra — молодого аналога Солнца, где найдены пятна, похожие на солнечные.

В работе Пискунова и др. [12] представлено уникальное инфракрасное спектрополяриметрическое устройство для спектрографа CRiRES+, которое в первую очередь будет использоваться для измерений очень слабых магнитных полей по эффекту Зеемана. Важными задачами будут обнаружение и мониторинг глобальных магнитных полей звезд солнечного типа, изучение эволюции магнитных полей от формирования звезд до финальной стадии их жизни. Инструмент будет установлен сразу

за третьим зеркалом телескопа VLT с минимизацией инструментальной поляризации. Спектрополяриметр состоит из четырех расщепителей луча, оптимизированных для измерений циркулярной и линейной поляризаций спектральных линий в ИК-полосах YJ и HK . В статье представлен дизайн прибора, лабораторные измерения отдельных компонентов и всего прибора в целом.

Третья версия спектрографа HARPS (HARPS3) будет введена в эксплуатацию на 2.54-м телескопе INT на Ла-Пальме в 2021 г. [13] и позволит достигнуть точности определения лучевой скорости 10 см с^{-1} для ближайших звезд при поисках земноподобных планет. Одно из главных новшеств HARPS3 — двулучевой касегреновский фокус. Поляриметрический модуль состоит из суперхроматической полимерной четвертьволновой и полуволновой пластинок для измерений круговой и линейной поляризации. Для ярких звезд можно достигнуть точности измерений поляризации 10^{-5} .

Муслимов и др. [14] представляют концепцию голографического спектрографа умеренного разрешения, основанного на каскаде узкополосных голографических решеток. Главная цель проекта — достигнуть спектрального разрешения $R = 5000$ одновременно во всей области $4300\text{--}6800 \text{ \AA}$ без значительной потери световой эффективности. Проведено экспериментальное исследование прибора в серии тестов с использованием солнечного спектра и спектра лампы. Предлагаемый авторами вариант спектрографа может стать выгодной альтернативой существующим приборам умеренного разрешения.

В работе Валявина и др. [15] описана первая версия волоконного спектрографа высокого разрешения ($R = 50\,000\text{--}100\,000$) для поиска экзопланет, астросейсмологических исследований, изучения магнитных полей, активных ядер галактик и др. Область одновременно регистрируемого спектра от 4000 до 7500 \AA . Предусмотрены три режима: традиционная спектроскопия, высокоточная спектроскопия и спектрополяриметрия.

Для 5-м Паломарского телескопа построен спектрополяриметр низкого спектрального разрешения ($R = 100$) WIRC+Pol, работающий в близкой ИК-области [16]. Поляриметр имеет пластинку $\lambda/4$ и поляризационную решетку, что позволяет за одну экспозицию измерять все параметры Стокса линейной поляризации. Прибор устанавливается в прямом фокусе телескопа с экваториальной монтировкой, таким образом эффекты инструментальной поляризации оказываются минимальными. Точность измерений линейной поляризации лучше 0.1%

2.2. Методика наблюдений и анализа данных

В САО РАН совместно с другими институтами начата комплексная программа исследования темпов и особенностей остывания сферически-симметричной самогравитирующей термодинамической системы с внешней плазменной конвективной оболочкой в условиях подавления конвекции магнитным полем. Природными примерами таких систем являются конвективно-активные звезды солнечного типа, вырожденные звезды: белые карлики, планеты с магнитным полем и т.п. Целью нового исследования Валявина и др. [17] является выяснение вопроса о том, в какой мере магнито-индуцированный контроль конвекции во внешних слоях таких систем сказывается на эффективности отвода тепла из их недр. Ответ на него объяснит целый ряд наблюдательных проявлений в области физики и эволюции звезд и планет. Мотивацией проведения исследований послужила работа [18], в которой была сформулирована задача об исследовании влияния магнитных полей на тепловую эволюцию вырожденных звезд — белых карликов с сильными магнитными полями. Авторы представили наблюдательные аргументы, согласно которым вырожденные звезды с полями от нескольких мегагаусс и выше эволюционно «заморожены» по сравнению с обычным белым карликом со слабым полем. Наблюдается своеобразный эффект термостатирования выходящего потока излучения магнитным полем. Высказана идея о том, что происходит это в результате многократного торможения конвективного выноса энергии из недр звезд через подавление конвекции, контролируемой их сильными магнитными полями. Полученный результат качественно объясняет целый ряд наблюдательных проявлений эволюции вырожденных звезд с сильными полями. Между тем физические детали механизма контроля выноса энергии из недр звезд магнитным полем остаются неисследованными. В астрофизическом контексте задача решается как средствами наблюдательной, так и вычислительной астрофизики. Получены следующие первые результаты. У магнитного белого карлика WD 0009+501 Антонюк и др. [19] обнаружили стабильную на шкале порядка десяти и более лет фотометрическую переменность, вызванную его собственным вращением и коррелирующую с переменностью магнитных свойств WD 0009+501. Наличие корреляции указывает на то, что магнитное поле подавляет конвекцию в степени, пропорциональной величине поверхностного поля, и тормозит отвод тепла из недр к поверхности звезды.

Другое направление работ связано с развитием методов вычислений атмосферных параметров, в частности, в условиях отсутствия локального термодинамического равновесия — NLTE-модели.

Например, Ситнова и др. [20] представили NLTE-расчеты для Ca и Ca II в В- и F-звездах. Изучены девять звезд с надежно определенными фундаментальными параметрами. Для всех звезд, в спектрах которых присутствуют линии обеих стадий ионизации, содержания в пределах ошибок совпадают, в отличие от LTE-вычислений, где расхождения превышают 0.5 dex. NLTE-метод может быть полезным для точных вычислений недостатка в содержании кальция в Am-звездах и выявления конкретных наблюдательных противоречий в моделях диффузии.

В работе [21] исследованы 17 звезд с надежно определенными атмосферными параметрами, для которых проведены вычисления формирования линий Mg I и Mg II в широком интервале температур от 3900 К до 17 500 К. Использование NLTE-приближения привело к уменьшению рассеяния. При этом отличия от LTE-содержания достигают 0.2 dex. Теоретические расчеты хорошо воспроизводят спектр Солнца, Прокциона, некоторых звезд с ослабленными линиями металлов и красных гигантов. NLTE-эффекты сильнее для горячих звезд, а при температурах менее 8000 К можно использовать LTE-модель.

Цымбал и др. [22] представили пакет программ для точного определения содержания химических элементов на основании NLTE-расчетов профилей линий наблюдаемого спектра. Код SYNTHV для спектрального синтеза в LTE-приближении был модифицирован для вычислений NLTE-спектров. Список линий экстрагируется из Венской базы атомных данных VALD.

3. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

3.1. Каталоги

В работе [23] представлен новый компилятивный каталог химически пекулярных звезд по данным различных публикаций, в которых было вычислено содержание металлов. В каталог включено 428 объектов, большинство из которых (416) составляют AmFm-, HgMn- и ApVp-звезды. Авторы использовали эту компиляцию для статистических исследований. Найдено много значимых корреляций между пекулярностью, эффективной температурой, ускорением силы тяжести и скоростью вращения. Проверена принадлежность Ap/Vp-звезд к кратным системам.

3.2. Анализ химического состава

В работе [24] в рамках проекта VESELKA изучена вертикальная стратификация содержания атмосфер химически пекулярных звезд. В гидродинамически стабильной атмосфере звезды она возникает из-за миграции элементов, вызванной атомной диффузией. Изучены две Hg-Mn-звезды HD 53929 и HD 63975 с помощью наблюдений на спектрополяриметре ESPaDOnS CFHT. Найдена вертикальная стратификация фосфора и высокое сверхобилие марганца.

По спектрам, полученным на спектрополяриметре ESPADONS CFHT, Халак [25] исследовал химически пекулярную звезду HD 157087. Определены ее параметры: $T_{\text{eff}} = 8882$ К, $\log g = 3.57$. При сравнении с наблюдениями предыдущих лет выявлены переменность в содержании одних элементов и его постоянство для других. Найдены убедительные доказательства увеличения содержания C, S, Ca, Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni и Zr с глубиной в атмосфере. Построена модель тройной системы, в которой короткопериодическая двойная вращается вокруг удаленного третьего компонента. Короткопериодическая двойная состоит из медленно вращающихся Am- и Ap-звезд с одинаковыми температурами, но разным химическим составом.

В работе Baratella et al. [26] представлены результаты спектроскопических исследований звезд в поле рассеянных скоплений NGC 6940 и Tombaugh 5. Материал получен на 6-м телескопе CAO РАН с разрешением $R = 13\,000$ и высоким отношением S/N (порядка 100). В обоих скоплениях наблюдались красные гиганты. Оценка средней металличности NGC 6940 $[Fe/H] = +0.09 \pm 0.06$ dex хорошо согласуется с предыдущими работами. А для Tombaugh 5 $[Fe/H] = +0.06 \pm 0.11$ dex. Таким образом, химический состав обоих скоплений близок к солнечному и не отличается от величины металличности, получаемой по радиальному градиенту содержания $[Fe/H]$ в Галактике. Авторы находят возраст 1.0 ± 0.1 Gyr для NGC 6940 и 0.25 ± 0.05 Gyr для Tombaugh 5.

Детальное исследование звезды σ Scl, кандидата в химически пекулярные, провели Яник и др. [27]. Они не обнаружили ни фотометрической, ни спектральной переменности, типичной для Ap-звезд. Однако наблюдается недостаток скандия и сверхобилие иттрия и бария, что типично для Am-звезд. Кроме того, найдена переменность лучевых скоростей с периодом около 46.8 суток, что указывает на двойственность звезды. Таким образом, объект является Am-звездой.

В работе [28] была изучена спектрально-двойная система HD 66051 (V414 Pup), состоящая

из крайне пекулярной Hg-Mn-звезды и нормального A-компонента. Проведен комплексный анализ. Изучены лучевая скорость и фотометрическая переменность, построена орбита системы. Для определения ее возраста были использованы изохроны. Новые определения очень хорошо совпали с прежними, система находится очень близко к нулевой главной последовательности и имеет возраст менее 120 млн лет. Этот объект — наилучший на сегодняшний день кандидат для тестирования предсказаний теории диффузии, объясняющей пекулярности содержания на поверхности Hg-Mn-звезд.

Некоторые из звезд типа δ Scuti, так называемые HADS-звезды, имеют большую амплитуду переменности, превышающую 0^m3 в цвете V . Paunzen et al. [29] провели спектральный и фотометрический анализ одного из таких объектов — ГУС 3637-1152-1. Найденная металличность оказалась близка к солнечной, определены спектральный класс F4 V и возраст $\log t = 9.1$. Отношение периодов пульсаций $f_o/f_1 = 0.791$, то есть объект имеет уникальные пекулярные особенности и является переходным звеном между HADS-звездами, пульсирующими в фундаментальной и первой гармониках пульсаций, и звездами с пульсациями на более высоких гармониках.

В работе Романовской и др. [30] исследовано вертикальное распределение хрома и железа в восьми различных фазах периода вращения для пекулярной звезды 78 Vir. В каждой фазе был проведен стратификационный анализ. Во всех фазах обнаружен скачок содержания Cr и Fe на оптических глубинах τ между -1.5 и -1.0 . Положение скачка слегка меняется и смещается к верхним слоям атмосферы с увеличением содержания элементов.

4. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

В последние несколько лет на космических аппаратах (в основном миссии Кеплер и TESS) получены новые высокоточные фотометрические данные. Продолжались и классические наземные наблюдения.

4.1. Результаты наземной фотометрии

К концу 80-х гг. 20 века было найдено около 50 быстро осциллирующих магнитных звезд (так называемые гоАр-звезды). В последующие 20 лет, несмотря на интенсивные поиски, было обнаружено всего десять таких объектов, а в последнее десятилетие не найдено вообще ни одной. Возникает вопрос: неужели найдены все гоАр-звезды?

Паунзен и др. попытались дать на него ответ, представив в работе [31] результаты поиска быстро осциллирующих звезд. К настоящему времени известен 61 такой объект, а из исследованных в последние годы 619 кандидатов ни один не подтвержден. Паунзен с коллегами провели в системе Стремгрена–Кроуфорда новые наблюдения 55 кандидатов в гоАр-звезды. Ни у одной из звезд пульсации не обнаружены. Более того, они не найдены и у ранее известной гоАр-звезды HD 12098, что свидетельствует об изменениях амплитуды пульсаций. Отобрано 4646 новых кандидатов для поиска быстро осциллирующих звезд.

Дукес и Адельман [32] представляют результаты стремгреновской фотометрии, полученные на FCAPT (Four College Automated Photometric Telescope). Выполнены наблюдения восьми химических пекулярных звезд: HD 5797, HD 26792, HD 27309, HD 49713, HD 74521, HD 120198, HD 171263, и HD 215441. Набор данных больше, чем описанный для mCP-звезд в литературе ранее. Для каждой из изученных звезд построены кривые блеска в полосах u, v, b, y -фильтров и определен период вращения. Полученные величины являются уточнением оценок периодов по литературным данным. А у звезды HD 49713 во всех фильтрах зарегистрировано наличие низкочастотной компоненты.

Oofodum и Oekeke [33] приводят результаты 39-часовых наблюдений HD 137949 в фотометрической системе В Джонсона на 0.5-м телескопе в Южной Африке. Найдена новая частота пульсаций этой звезды и подтверждены старые.

В работе [34] предпринята попытка обнаружить тесные кратные звездные системы за пределами Галактики. До настоящего времени был известен всего один такой объект. Особый интерес вызывает тот случай, когда тройная система затменная, что позволяет изучать различные параметры входящих в нее звезд. Предложен новый метод выявления компактных тройных системы из доступных в базе данных по Магеллановым Облакам OGLE III результатов фотометрических наблюдений. Проанализированы 26 121 кривая блеска затменных двойных в БМО (Большое Магелланово Облако, LMC) и 6138 в ММО (Малое Магелланово Облако, SMC). Найдены физические параметры каждой системы. Отождествлены 58 новых кандидатов в компактные тройные системы в Магеллановых Облаках. Это наибольшая из опубликованных до настоящего времени выборка таких объектов.

4.2. Результаты спутниковой фотометрии

Микулашек и др. [35] представили обзор свойств объектов выборки из 41 химически

пекулярной звезды по результатам наблюдений со спутником Kepler. Эти звезды занимают всю ширину главной последовательности и находятся в интервале масс от 1.5 до $4 M_{\odot}$. Монопериодическая переменность и стабильность кривой блеска являлись главными критериями выделения химически пекулярных звезд из тысяч кривых, полученных в ходе обзора Кеплер.

В другой работе Микулашека и др. [36] изучена переменность магнитной химически пекулярной звезды CU Vir. Поиск периода проводился на основании порядка 38 тысяч фотометрических измерений, полученных за 53 года. Найден вариации периода.

Изучив распределения фотометрических пятен в выборке из 650 химически пекулярных звезд, Ягелка и др. [37] попытались связать их с топологией магнитного поля. Кривые блеска объектов были взяты из архивов спутника ASAS-3. Теоретические кривые блеска были воспроизведены путем численного моделирования пятен с разными параметрами и в приближении дипольного магнитного поля. Затем эти кривые сравнивались с наблюдаемыми. В результате оказалось, что наблюдаемые и теоретические кривые блеска не совпадают, наблюдается значительно больший процент кривых с двойной волной, чем это предполагалось. Таким образом, можно сделать заключение о том, что химические пятна не следуют за топологией поля, и роль поля отличается от предсказываемой теоретическими исследованиями.

В работе [38] проведен поиск новых mCP-звезд по очень точным фотометрическим кривым блеска, полученным с помощью спутника Кеплер. Описаны критерии, на основании которых отбирались кандидаты для спектральных наблюдений, в частности, объекты с монопериодической и стабильной кривой блеска. По анализу полученных и архивных спектров были подтверждены как пекулярные большинство кандидатов. В итоге в выборку вошли 41 подтвержденная спектрально CP-звезда и пять кандидатов в CP-звезды. Для семи звезд химическая пекулярность установлена не была. Все объекты занимают всю область главной последовательности от ZAMS до TAMS с интервалом масс от 1.5 до $4 M_{\odot}$.

Голубые звезды горизонтальной ветви — это объекты Популяции II с горением гелия в ядре, которые обладают водородной горячей зоной и лучистой оболочкой. Так как они медленно вращаются, процессы диффузии могут играть важную роль в образовании пятен на их поверхности и, возможно, магнитных полей. В работе [39] были исследованы несколько таких объектов, признаки пятен и магнитного поля не обнаружены.

Клочкова и др. [40] изучили химический состав и эволюционный статус высокоширотной переменной V534 Lyr. Найден пониженный металлосодержание, высокое содержание азота и большая пространственная скорость, что позволяет отнести объект к пульсирующим звездам в толстом диске Галактики.

В работе [41] использованы данные миссии спутника Kepler K2 для поиска новых магнитных звезд, в частности, пульсаций у них. Обнаружена периодическая переменность у 56 химически пекулярных A- и B-звезд. Период вращения найден у 38 CP-звезд, для 16 из них впервые. Авторы подтвердили наличие пульсаций на высоких оборотах для HD 177765 и еще у трех объектов наличие таких пульсаций заподозрено. Эти объекты являются первоочередными кандидатами для поиска у них магнитных полей.

5. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЗВЕЗД

В этом разделе мы рассмотрим работы по изучению крупномасштабных магнитных полей OBA-звезд и локальных полей холодных активных звезд.

5.1. Магнитные OBA-звезды с крупномасштабными полями

5.1.1. Классические Ar- и Vr-звезды

Munoz и др. [42] обсуждают возможность обнаружить магнитные поля ярких Of?p-звезд в Магеллановых Облаках, где недавно были найдены пять таких объектов. Хотя все Of-звезды Галактики имеют сильные упорядоченные магнитные поля, однако для таких звезд в Магеллановых Облаках они будут на пределе обнаружения при наблюдениях на спектрополяриметре FORS2 из-за очень больших ошибок.

В работе [43] изучалась HD 149277 — редкая SB2-система с медленно вращающейся магнитной звездой He-rich в качестве главного компонента. Орбитальный период составляет $P_{\text{orb}} = 11^{\text{d}}.5192 \pm 0.0005$, период вращения $P = 25^{\text{d}}.4$. Имеется очень сильное субсинхронное вращение, которое ранее ни для одной из SB2-систем с магнитными химически пекулярными компонентами не было зарегистрировано. Найденные расщепленные зеемановские компоненты. Модуль поверхностного поля меняется с вращением. Максимум модуля поля приблизительно совпадает с положительным экстремумом продольного поля, а минимум — с отрицательным. В спектре вторичного компонента нет никаких признаков магнитного поля. Используя фотометрию ASAS-3, авторы нашли в частотном спектре только один пик, соответствующий периоду

$P_{\text{phot}} = 25^{\text{d}}390 \pm 0.014$. Эта величина находится в хорошем согласии с периодом вращения $P_{\text{rot}} = 25^{\text{d}}380 \pm 0.007$, найденном по переменности продольной компоненты поля.

Järvinen et al. [44] рассмотрели выборку ранних В-звезд со сверхобилием гелия, для которых измерения магнитных полей еще не проводились. Наблюдения были выполнены на спектрополяриметре HARPS на 3.6-м телескопе. У пяти таких объектов магнитное поле было обнаружено впервые. У ранее известной магнитной He-rich звезды HD 58260 зарегистрировано медленное уменьшение величины продольного поля на интервале времени более 10 лет. Полученный результат подтверждает тот факт, что все He-rich звезды обладают обнаруживаемыми магнитными полями и являются продолжением Ar-феномена в области высоких температур.

Результаты проектов MIMES и BINAMICS по изучению магнетизма и двойственности магнитных массивных звезд опубликованы в статье [45]. Получен обширный наблюдательный материал высокого спектрального разрешения. Представлены результаты измерений продольного магнитного поля и поиска периода вращения 52 ранних В-звезд (В5–В0). Дополнительно была выполнена спектрополяриметрия низкого разрешения и использовались данные из архива спутника HIPPARCOS. Найденны периоды вращения десяти звезд, для пяти звезд периоды не были определены. Эфемериды вращения для четырнадцати звезд были уточнены с учетом новых магнитных измерений. Распределение периодов вращения очень похоже на распределение для более холодных Ar/Vp-звезд. Величины $v \sin i$ значимо меньше, чем для нормальных звезд. Наблюдается систематическая разница в величине поля, полученного по разным элементам. Этот факт указывает на наличие пятен и на более сложную структуру поля, чем дипольная, у шести из исследованных звезд. Однако амплитуды второго и третьего порядка для всех шести звезд значительно меньше первого порядка (дипольного).

Авторы статьи [46] изучали звезду Пржибыльского (Przybylski's star, HD 101065), спектр которой состоит исключительно из линий редкоземельных и других экзотических элементов. Были проанализированы все наблюдения магнитного поля, полученные за последние 43 года, и найден период ее вращения — 188 лет. Изучено также вертикальное распределение химических элементов Pг и Nd в атмосфере, указывающее на наличие вертикального градиента поля.

Романюк и др. [47] приводят результаты измерений магнитных полей 74 звезд, полученные на 6-м телескопе БТА в 2011 г. Определены лучевые скорости и проекции скоростей вращения на луч зрения в основном химически пекулярных звезд

главной последовательности и звезд-стандартов. Наблюдения были выполнены на Основном Звездном Спектрографе (ОЗСП) с зеемановским анализатором. Обнаружено семь новых магнитных звезд: HD 38129, HD 47152, HD 50341, HD 63347, HD 188501, HD 191287, HD 260858. Еще у трех CP-звезд наличие поля заподозрено. Наблюдения стандартных магнитных и немагнитных звезд подтверждают отсутствие каких-либо систематических ошибок, способных внести искажения в результаты измерений.

В работе [48] рассмотрены результаты измерений продольной компоненты магнитного поля звезды γ Eri, выполненных на ОЗСП 6-м телескопа в 2002–2018 гг. При анализе своих данных и доступных из литературы оценок продольной компоненты поля (всего 441 измерение) авторы сделали вывод о существовании периода $P = 89.1 \pm 4.2$ года (32 521 суток). При описании всего массива данных с помощью двух синусоид получены величины периодов, равные 95.5 и 17.4 года (с погрешностью около 3.5 и 2 года соответственно). По новой оценке переход к положительным значениям, вероятно, произойдет позднее, чем считалось ранее, а именно в 2031 г.

Магнитные поля и другие физические параметры химически пекулярных звезд подгруппы (а) в ассоциации Орион OB1 изучены в работе Романюка и др. [49]. Согласно новым оценкам расстояния, полученным по параллаксам со спутника Gaia, подгруппа (а) ассоциации находится примерно на треть дальше, чем ранее считалось на основании параллаксов HIPPARCOS. Авторы нашли в изученной подгруппе 15 потенциально магнитных химически пекулярных Ar- и Vp-звезд.

В исследовании [50] представлены результаты измерений магнитных полей десяти химически пекулярных звезд подгруппы (а) ассоциации Орион OB1: HD 33917, HD 34859, HD 35008, HD 35039, HD 35177, HD 35575, HD 35730, HD 36549, HD 38912 и HD 294046. Наблюдения проведены с анализатором круговой поляризации на ОЗСП 6-м телескопа САО РАН. Магнитное поле найдено у четырех звезд, у шести остальных его величина оказалась ниже предела обнаружения.

Моисеева и др. [51] приводят результаты определения фундаментальных параметров (эффективной температуры, ускорения силы тяжести, светимости, массы, радиуса, скорости вращения, лучевой скорости) 146 звезд, наблюдавшихся на 6-м телескопе БТА с помощью ОЗСП в 2009–2011 гг., 124 из которых магнитные или потенциально магнитные объекты. Получены и проанализированы более 500 пар спектров циркулярно-поляризованного излучения. Для оценки фундаментальных параметров использовались различные методы и подходы.

В работе [52] Кочухов и др. нашли первую затменную двойную среди магнитных звезд ранних типов. Была исследована спектроскопическая двойная HD 66051 типа SB2, фотометрическая переменность которой вне затмения вызвана поверхностными неоднородностями, типичными для таких объектов. Авторами проведен сет спектрополяриметрических наблюдений с высоким разрешением. Найдено слабое магнитное поле (порядка 600 Гс на полюсе диполя) у главного компонента и вариации спектральных линий. Структура магнитного поля следующая: в ней доминирует близкий к осесимметричному дипольный компонент, ось которого наклонена к оси вращения на 13° . Найдены массы главного и вторичного компонентов (3.16 и $1.75 M_\odot$ соответственно) и радиусы (2.78 и $1.39 R_\odot$) с точностью около $1-3\%$. Также определены эффективные температуры ($13\,000$ и $9\,000$ К) и изучен химический состав. Сделаны выводы о том, что главный компонент системы — типичная поздняя магнитная В-звезда с неоднородным распределением содержания по поверхности, а вторичный — звезда с усиленными линиями металлов и отсутствием магнитного поля и спектральной переменности.

HD 156324 — это SB3-система (B2V/B5V/B5V) в ассоциации Sco OB4. Главный компонент — пекулярная звезда He-rich — имеет сильное поле и эмиссию в H α . Авторы работы [53] использовали для ее изучения большой набор спектральных и спектрополяриметрических данных, полученных с высоким разрешением. Измерения лучевых скоростей показали, что система состоит из двух подсистем, обозначенных в работе как А и В. Орбитальные периоды составляют 1.58 суток для Аа- и Аб-компонентов и 6.67 суток для компонента В. Продольное магнитное поле меняется с периодом 1.58 суток, соответствующим периоду вращения Аа-компонента. Это означает, что компоненты Аа и Аб — приливные взаимодействующие. В согласии с этим орбиты циркуляризованы, наклоны осей вращения и орбиты совпадают. Величина поля на полюсе диполя компонента Аа не превышает 2.6 кГс, а у компонента Аб — менее 0.7 кГс.

Для ярчайших химически пекулярных звезд θ Aur и ϵ UMa выполнены многочисленные исследования спектральной и фотометрической переменности. Однако магнитное поле у них очень слабое, поэтому сведений о геометрии до настоящего времени не было. Кочухов и др. [54] провели наблюдения этих звезд во всех четырех параметрах Стокса на спектрополяриметрах Narval и ESPADONS. Для анализа данных был использован метод LSD и проведено моделирование с помощью программ доплер-зеemanовского картирования. Для θ Aur найдена линейная поляризация, а для ϵ UMa — только круговая. Анализ показал, что в первом приближении топология магнитных

полей обеих звезд такая же, как и для CP-звезд с более сильными полями. Построены карты распределения хрома и железа, которые могут использоваться для теоретических вычислений атомной диффузии.

В работе Sikora et al. [55] изучена выборка близких химически пекулярных звезд, находящихся на расстоянии ближе 100 пк (по данным о параллаксах со спутника Hipparcos). Всего было найдено 52 mCP-звезды. Для них были определены фундаментальные параметры (эффективные температуры, светимости, массы и эволюционный статус). Найдено, что доля магнитных CP-звезд по сравнению с немагнитными CP-звездами увеличивается резко от 0.3% для звезд с массами $1.5 M_\odot$ до 11%, для звезд с массами $3.8 M_\odot$. Найден также четкий тренд уменьшения содержания химических элементов в фотосфере с возрастом звезд.

В работе [56] исследуется крупномасштабное магнитное поле широкой двойной α Lupi. Наблюдения были проведены на спектрополяриметрах ESPaDOnS и HARPSpol. Для изучения фотометрической переменности использовались спутниковые данные BRIDE. Найдено, что продольная компонента поля меняется с периодом около 2.95 суток; поле дипольное, но отмечается значительный вклад квадрупольной компоненты. Наблюдается спектральная переменность линий кремния и железа с таким же периодом. Оценена геометрия крупномасштабного поля: угол i наклона оси вращения к лучу зрения составляет 27° , угол между осью вращения и осью диполя $\beta = 74^\circ$, поле на полюсе диполя по крайней мере 5.25 кГс. Признаки вторичного компонента в спектрах не найдены.

NU Ori (HD 37061) — массивная спектральная и визуально-двойная система, которая состоит из четырех компонентов (Аа, Аб, В и С). Главный компонент Аа — звезда спектрального класса B0.5 — наиболее массивная из всех известных магнитных звезд. В работе [57] изучается компонент С. Спектры получены на ESPADONS, выполнена интерферометрия на VLTI. Определены орбиты компонентов, найдены массы: $M_{Aa} = 14.9 \pm 0.5 M_\odot$, $M_{Ab} = 3.0 \pm 0.7 M_\odot$, $M_C = 7.8 \pm 0.7 M_\odot$. Период вращения компонента С $P = 1^d.095$ получен из наблюдений продольной компоненты поля. Определена величина дипольного поля на поверхности, равная 8 кГс. Найдена слабая (менее 1%) эмиссия в линии H α .

Результаты длительного мониторинга двойной магнитной звезды β CrV представлены в работе [58]. Задавшись целью проверить предположение о наличии в системе третьего маломассивного тела, ее авторы проанализировали как собственные данные о лучевых скоростях системы, так и все

найденные в литературе. Был обнаружен периодический сигнал, соответствующий хорошо известному из магнитометрии периоду вращения звезды 18^d4868. Сделан вывод о магнитной природе наблюдаемых изменений лучевой скорости.

5.1.2. Крупномасштабные поля звезд других типов

В работе [59] представлена HD 21190 — известная звезда типа δ Scuti, обладающая свойствами Ар-звезды и демонстрирующая переменность с периодом 3.6 суток, определенным в ходе миссии Hipparcos. По данным Gaia было найдено, что это физически двойная система, вторым компонентом которой является звезда CPD $-83^{\circ}64\text{В}$. На спектрополяриметре HARPS получены спектры с линиями тяжелых и редкоземельных элементов, типичными для Ар-звезд с сильными полями. В более ранних наблюдениях было получено, что величина поля HD 21190 составляет несколько сот гаусс. Вопрос о наличии поля у CPD $-83^{\circ}64\text{В}$ остался без ответа. Новые данные Gaia DR2 четко указывают, что две звезды не связаны физически. Наблюдения на FORS2 показали, что у HD 21190 имеется продольное поле $B = 230 \pm 38$ Гс. А для второй звезды CPD $-83^{\circ}64\text{В}$ оно больше — $B_e = 509 \pm 104$ Гс. Более того, спектрополяриметрия с высоким разрешением на HARPSpol указывает на присутствие у второго компонента пульсационной переменности с характерным временем в десятки минут.

Результаты последних спектрополяриметрических наблюдений магнитной звезды типа β Cep ξ^1 CMa опубликованы в работе [60]. Новые данные подтверждают очень длинный период вращения звезды (около 30 лет), предложенный авторами статьи ранее. На 2018 г. предсказывалось продольное поле, равное нулю. В прекрасном согласии с этим величина продольного поля во всех новых наблюдениях близка к нулю, и, кроме того, видны признаки зеемановского расщепления от кроссовера. Более того, наблюдается модуляция амплитуды и знака вариаций. Этот факт может быть объяснен радиальным кроссовер-эффектом, связанным с радиальными пульсациями звезды, наряду с существенными отклонениями топологии от чисто дипольной. В качестве простейшей для недипольного поля была использована конфигурация «диполь+квадруполь». Однако Järvinen et al. [61] провели сравнение всей совокупности результатов измерений поля этой звезды и пришли к выводу о том, что наличие длинного 30-летнего периода для ξ^1 CMa не подтверждается.

В работе [62] представлены результаты проекта LIFE, целью которого является поиск магнитных полей прэволюционировавших ОВА-гигантов и

сверхгигантов. На ESPADONS CFHT были проведены наблюдения 15 таких звезд. С помощью методики LSD получены средние профили линий каждой из них. Для двух звезд найдено слабое поле: $B_l = 1.0 \pm 0.2$ Гс у ушедшей с ГП А5 звезды 19 Aug и более сильное — $B_l = -230 \pm 10$ Гс у В8/9 звезды HR 3042, находящейся на этапе ухода с ГП.

Имеются доказательства того, что у ранних В-звезд есть корреляция между магнетизмом и рентгеновским излучением: доли источников жесткого рентгеновского излучения и объектов с магнитными полями примерно одинаковы (10%). Также известно, что некоторые В-звезды имеют пятна на поверхности. Однако рентгеновская активность, связанная с пятнами, до настоящего времени не выявлена. В статье [63] сообщается об обнаружении поля у звезды В2V ρ Oph A. Наблюдения выполнены на спектрополяриметре FORS2 VLT в две эпохи. В одну из них продольное поле величиной около 500 Гс было обнаружено, в другую — нет. Причиной может быть вращение звезды. Повидимому, получены доказательства того, что в молодой замагниченной звезде есть активная, излучающая рентгеновские лучи, область.

По наблюдениям на спектрополяриметре HARPSpol (ESO 3.6-м телескоп) были обнаружены слабые магнитные поля у двух звезд типа Ae Херbiga. В SB2-системе AK Sco у вторичного компонента найдено продольное поле -83 ± 31 Гс в одном случае. У предполагаемой двойной HD 95881 в две разные эпохи были получены продольные поля -93 ± 25 Гс и $+105 \pm 29$ Гс. Во всех случаях вероятность ложного открытия не превышает 0.001% [64].

В работе [65] Buyschaert и др. исследуют пульсирующую магнитную звезду В3.5 HD 43317, на поверхности которой было найдено поле величиной на полюсе $B_p = 1312 \pm 332$ Гс. Период ее вращения составляет 0.89 суток. Выполнено сейсмическое моделирование, которое позволило объяснить 16 из найденных 28 частот пульсаций. Определена масса звезды — $5.8 \pm 0.2 M_{\odot}$.

В работе [66] рассказано о миссии BRITe и спектрополяриметрическом обзоре BRITePol, включая впервые обнаруженные магнитные звезды и новую информацию о фотометрической переменности магнитных звезд.

Wade и др. [67] представляют результаты новых спектральных наблюдений магнитной Of?p-звезды HD 148937, полученные начиная с 2015 г. Обнаружена слабая спектральная переменность. Найдено беспрецедентное изменение характера переменности звезды. Скорее всего, HD 148937 является массивной двухлинейчатой спектральной двойной. На основании комбинации спектральной орбиты и

архивных спекл-интерферометрических измерений получено, что система состоит из двух O-звезд с массами 34 и 49 M_{\odot} , эксцентриситет орбиты — 0.75, а орбитальный период — около 26 лет.

5.2. Холодные активные магнитные звезды

Холодные звезды, как правило, имеют поля сложной структуры, локализованные часто в пятнах.

5.2.1. Звезды-карлики

Цель работы [68] — исследование холодной активной двойной звезды σ^2 CrB, особенно ее магнитного поля. Два F9–G0-компонента этой системы соприкасаются на близкой орбите, что увеличивает шанс на взаимодействие между их магнитосферами. При наблюдениях на спектрополяриметрах Narval и ESPADONS в 2014 и 2017 гг. были проведены измерения четырех параметров Стокса. В результате ранее неподтвержденное наличие поля у главной звезды установлено. В то же время поляризованные спектральные детали вторичной звезды имеют большую амплитуду по сравнению с главной. Это соответствует более сильному магнитному полю, для которого магнитная энергия вторичного компонента в 3.5–3.7 раз превышает энергию первичного. В то время как магнитная энергия вторичного компонента оставалась одинаковой в 2014 и 2017 гг., у первичного она выросла в два раза. В 2017 г. обе звезды имели одинаковую магнитную топологию, тогда как в 2014 г. их магнитная топология существенно различалась. Периоды вращения обеих звезд больше их орбитального периода. Были сделаны выводы о том, что, несмотря на близкие фундаментальные параметры, компоненты системы имеют разные свойства магнитных полей. А значит, процесс магнитного динамо очень чувствителен к звездным параметрам.

В работе [69] впервые выполнен анализ спектров высокого разрешения в наблюдениях полного вектора Стокса активного M-карлика AD Leo. Данные получены на спектрополяриметре ESPaDOnS. Методом LSD вычислены профили линий и найдена линейная поляризация. В то же время было обнаружено, что циркулярная поляризация в указанном наборе данных оказалась меньше, чем во всех архивных спектрах AD Leo, когда она была постоянной по крайней мере шесть лет вплоть до 2012 г. Построенные магнитные карты с использованием зееман-доплеровского картирования подтверждают внезапное изменение поверхностного магнитного поля. Хотя энергия общего магнитного поля упала на 20% между 2012 и 2016 гг., компонента поля, ответственная за циркулярную поляризацию, соответствует более

сильному полю, но занимает меньшую долю поверхности звезды. Этот результат является первым доказательством того, что активные M-карлики с преимущественно дипольными осесимметричными магнитными полями могут испытывать долговременные глобальные магнитные вариации.

Folsom и др. [70] провели сравнение угловой скорости вращения звезд солнечного типа до главной последовательности и ранних звезд главной последовательности. Так как магнитные поля у них генерируются механизмом динамо, на рассмотренном эволюционном этапе может произойти существенное изменение их магнитных свойств. В работе выполнены наблюдения звезд в скоплениях и ассоциациях с хорошо известным возрастом от 120 до 650 млн лет, и для определения их характеристик и геометрии крупномасштабного магнитного поля использовано доплер-зеемановское картирование. Обнаружено 15 магнитных звезд. Они имеют массы от 0.8 до 0.95 M_{\odot} и периоды вращения от 0.326 до 10.6 суток. Найдены крупномасштабные поля величиной от 8.5 до 195 Гс в широком интервале геометрий. Выявлен четкий тренд уменьшения магнитного поля с возрастом. В зависимости от числа Россби оно уменьшается по степенному закону. Есть некоторые признаки насыщения величины крупномасштабного поля при числах Россби меньше 0.1, но точка насыщения не определена надежно. Сравнение с более молодыми классическими звездами типа T Tauri позволило авторам работы прийти к заключению, что внутренняя структура вызывает большие различия в наблюдаемых магнитных полях, хотя для звезд T Tau со слабыми линиями это не так очевидно.

В статье [71] представлены результаты мониторинга крупномасштабного магнитного поля звезды τ Boo, выполняемого в рамках программы VCoRoT по исследованию магнетизма холодных звезд. Найдено, что τ Boo имеет очень короткий магнитный цикл — 240 суток. В его максимуме геометрия магнитного поля τ Boo очень похожа на Солнце в максимуме активности: она сложная и имеет слабый дипольный компонент. Но у τ Boo присутствует сильный тороидальный компонент, который не наблюдается у Солнца.

Изучение пятен звезд поздних типов важно для выбора между различными механизмами динамо, которые ответственны за различные проявления пятенной активности. Очень важно иметь длительные ряды наблюдений для анализа в дальнейшем методами доплеровского картирования. Nackman и др. [72] в 1994–2017 гг. провели длинную серию наблюдений (большой частью на Nordic Optical Telescope) звезды HD 199178 — субгиганта типа FK Com. Всего была получена 41 температурная карта на интервале времени более 23 лет. Все

изображения показывают наличие большого холодного пятна, центрированного близко к видимому полюсу вращения. На более низких широтах холодные детали также воспроизводятся, однако их достоверность вызывает сомнения. Используя доплеровские изображения, авторы построили для HD 199178 аналог солнечной «диаграммы бабочек». Обнаруженное холодное долгоживущее пятно у полюса вращения доминирует в пятенной активности 1994–20017 гг. Его размер и положение эволюционируют со временем с существенным ускорением в последние годы. Отсутствие особенностей на низких широтах не позволяет определить возможное дифференциальное вращение.

Саванов [73] провел анализ пятенной активности Am-звезд. Изучены три звезды из наблюдавшихся со спутником Кеплер. Обнаружены дифференциальное вращение и эволюция пятен. Используя кривую блеска, автор выполнил реконструкцию температурных карт. Эти карты указывают на концентрацию активных областей на двух долготах.

В работе Villebrun et al. [74] выполнены фотометрия и спектрополяриметрия 38 звезд типа T Tau, найдены фундаментальные параметры (T_{eff} , L и $v \sin i$), измерены магнитные поля (включая пределы обнаружения для звезд, у которых поля не обнаружены). Для звезд с найденными полями получены основные параметры топологии. С помощью эволюционных моделей определены массы, радиусы и внутренние структуры изученных звезд. Магнитные поля найдены примерно у половины звезд выборки. Около 90% магнитных звезд имеют конвективные оболочки, превышающие 25% радиуса звезды, и тяжелее, чем 2% от ее массы. Идя в сторону более высоких масс, авторы пришли к выводу, что встречаемость магнитных звезд быстро падает на временах в несколько сотен тысяч лет. В итоге они высказали предположение, что звезды типа T Tau промежуточных масс с большими конвективными оболочками имеют сложные магнитные поля, и поэтому их дипольная компонента может слабеть, так как падает размер конвективной оболочки, как это происходит у маломассивных звезд типа T Tau.

Поведение крупномасштабного дипольного поля для холодных звезд важно для понимания работы механизмов динамо. Вого Saikia и др. [75] исследовали эволюцию дипольного поля K-карлика 61 Cyg A, используя спектрополяриметрические наблюдения, покрывающие один магнитный цикл, эквивалентный двум хромосферным циклам активности. Крупномасштабная геометрия поля была реконструирована с помощью метода зеемандоплеровского картирования. Установлено, что у 61 Cyg A преобладает дипольная геометрия, за исключением максимума хромосферной активности.

На протяжении магнитного цикла ось диполя мигрирует от южной к северной полусфере, находясь на высоких широтах в минимуме хромосферного цикла активности и на средних широтах — в его максимуме. Диполь наиболее силен в минимуме цикла активности и значительно слабее в максимуме. Поведение крупномасштабного поля звезды сравнимо с солнечным, несмотря на то, что звезда более старая и холодная.

В работе [76] представлены результаты исследований шестнадцати горячих магнитных пульсирующих звезд, которые были отобраны на основании спектров высокого разрешения, полученных на ESPADONS, и фотометрии миссии Kepler K2. Высокоточные фотометрические кривые K2 построены для 13 звезд из 16, для них определен точный период вращения. У двух звезд найдены особенности, характерные для гоAr-звезд. Авторы подтвердили наличие крупномасштабного магнитного поля у одиннадцати изученных звезд, из них для девяти — это первое обнаружение. Кроме того, у одной звезды заподозрено наличие поля, а у четырех поле не обнаружено. Две из них имеют пекулярности, типичные для CP-звезд. Таким образом, не исключено, что и оставшиеся пять CP-звезд имеют магнитные поля, но слабые.

Donati et al. [77] представили результаты спектрополяриметрии классической звезды типа T Tau LkCa 15. Они изучали крупномасштабную топологию магнитного поля центральной звезды и нашли, что у нее сильное полоидальное поле преимущественно с осесимметричной дипольной компонентой, распространяющееся на внутренние области аккреционного диска. Величина поля на полюсе диполя 1.35 кГс. Поле простирается в диске до расстояния 0.07 а.е. Обсуждается вопрос об эффективности торможения вращения звезд типа Тельца в сильном дипольном поле.

5.2.2. Звезды-гиганты

Сверхгигант класса M Бетельгейзе имеет циркулярно поляризованные линии в спектрах, которые интерпретируются как доказательство наличия магнитного поля. В работе [78] представлены результаты магнитного мониторинга, который проводился на протяжении 7.5 лет для изучения эволюции поля. Наблюдения проводились на спектрополяриметрах ESPaDOnS и Narval. Также измерялась и линейная поляризация. Авторы подтверждают магнитную природу циркулярной поляризации в линиях, поле имеет величину порядка 1 Гс. Вариации V-параметра Стокса происходят на различных временных шкалах, период наиболее значительной из них составляет около 2000 суток. Этот длинный период доминирует во всех четырех параметрах Стокса. Авторы делают вывод о том, что причиной всех вариаций являются гигантские

конвективные ячейки — главный источник появления поляризации и всех вариаций четырех параметров Стокса.

В работе [79] сделана попытка воспроизвести изображение фотосферы Бетельгейзе путем моделирования наблюдаемой линейной поляризации в линиях. Кроме того, целью был временной анализ размеров и динамики конвективной структуры звезды. Рэлееское рассеяние поляризует континуум, а спектральные линии деполаризуют его. Интегрирование по всему диску даст нулевой сигнал поляризации. Но если есть структуры — будут отклонения. Для Бетельгейзе такие структуры — это конвективные ячейки, которые занимают более 60% поверхности. Скорость восходящих и нисходящих потоков составляет соответственно 22 и 10 км с⁻¹. Авторы определили, что слабые поля концентрируются в опускающемся веществе между гранулами, как это имеет место в спокойном Солнце. Изменения происходят на временах порядка одной недели. Измеренные характеристики конвекции в Бетельгейзе согласуются с результатами численного моделирования и для сильных восходящих потоков, и для размеров конвективных ячеек. Подтверждено наличие слабого магнитного поля в потоке нисходящей плазмы.

6. МАГНИТНЫЕ БЕЛЫЕ КАРЛИКИ

Наши сведения о магнетизме белых карликов (БК) селекционно зависимы, так как звезды с сильными полями наблюдать значительно удобнее. Данные из литературных источников получены в наблюдениях с низкой чувствительностью. Wagnulo and Landstreet [80] начали новую долговременную программу по поиску магнитных полей у белых карликов на уровне субкилогаусс. Представлены результаты наблюдений на спектрополяриметре низкого разрешения FORS2 VLT и умеренного разрешения ISIS на WHT. Была рассмотрена выборка из 48 объектов, пять из которых были известными или предполагаемыми магнитными звездами. Получены новые измерения продольного поля со средней ошибкой порядка 0.6 кГс. Обнаружен один новый магнитный белый карлик со слабым полем, подтверждено наличие поля у других. Установлено, что одна предположительно магнитная звезда таковой не является, и найдены два новых кандидата в магнитные белые карлики. Отмечено, что рассмотренная выборка не является статистически существенной для финальных выводов даже при дополнении ее уже опубликованными в литературе результатами. Однако полученные сведения важны для создания селекционно независимого обзора белых карликов.

В статье [81] представлены результаты спектрополяриметрии и рентгеновских наблюдений

нескольких загрязненных белых карликов, включая WD 1145+017, с целью определиться с поведением материала диска и темпами аккреции в проэволюционировавших планетных системах. Для двух ранее исследованных звезд, WD 0322-019 и WD 2105-820, были найдены поля $\langle B_z \rangle > 1$ кГс, но у WD 1145+017, WD 1929+011, и WD 2326+049 поле не обнаружено.

Среди объектов с большим собственным движением найден новый магнитный белый карлик NLTT 7547 [82]. Он относится к холодным БК с эффективной температурой 5200 К. Спектры, полученные с высоким разрешением, показывают наличие линий тяжелых элементов. Найдено, что усредненное по всей поверхности поле имеет величину 163 кГс, а на полюсе центрального диполя — 240 кГс. Полученные данные подтверждают связь между наличием поля у холодных БК и присутствием тяжелых элементов в их атмосферах.

7. ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Aronson and Piskunov [83] предлагают новый метод анализа спектров атмосфер экзопланет, полученных во время транзитных наблюдений. Он позволяет восстановить атмосферные спектры поглощения и удельной светимости звезды без привлечения теоретических моделей звезд и планет. Авторы одновременно определяют как удельную светимость, так и радиус планеты прямо из транзитной кривой блеска. Метод был применен для анализа наблюдений экзопланет GJ 1214b и WASP-49b, проведенных на FORS2 VLT. Полученные результаты хорошо согласуются с предыдущими исследованиями.

В системе HD 219134 имеется несколько планет, семь кандидатов подтверждено. Две планеты с наиболее коротким периодом твердотельны (массы 4–5 земных) и проходят на фоне звезды.

В работе [84] представлены результаты наблюдений звезды на спектрополяриметре Narval и последующего зееман-доплеровского картирования. Обнаружено слабое полоидальное магнитное поле со средней величиной 2.5 Гс. По этим данным надежно подтверждается период вращения звезды — 42 суток. Измерен наклон оси вращения $77^\circ \pm 8^\circ$ и найдены доказательства дифференциального вращения. Проекция наклона осей вращения двух суперземель находится между 0° и 20° . Получено, что глубина транзита не превышает 3%, что исключает наличие гигантского магниевого облака размером более девяти радиусов планеты.

Валявин и др. [85] представили результаты наземных наблюдений и модельный анализ транзитов экзопланет WASP-33b, WASP-43b, WASP-104b и HD 219134b. Для всех экзопланет построены

широкополосные трансмиссионные спектры (зависимость наблюдаемых радиусов экзопланет от длины волны). Показано, что трансмиссионный спектр WASP-33b является плоским в диапазоне от 3800 Å до 12000 Å, а у объекта WASP-43b он плоский в первом приближении. Приведены и анализируются результаты наземных наблюдений, подтверждающих открытие транзитной суперземли в системе звезды HD 219134.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен обзор наиболее важных, на наш взгляд, работ, вышедших из печати в основном в 2018 г. Мы рассмотрели 85 статей, посвященных изучению магнитных полей и других физических параметров магнитных и родственных им звезд. Большая часть из них опубликована в трех журналах: MNRAS (24 статьи), Astronomy and Astrophysics (18 статей), Astrophysical Bulletin (11 статей) и в сборнике докладов конференций «Physics of magnetic stars» (ASPC, Vol. 518) — 6 статей. На долю всех остальных журналов и сборников приходится 28 публикаций.

В нашем обзоре представлены аппаратурно-методические статьи, результаты наблюдений магнитных полей, а также построений магнитных и химических карт поверхностей звезд различных типов. Обсуждаются также различные физические механизмы, действующие в атмосферах звезд с сильными магнитными полями.

В области аппаратурных и методических разработок важнейшие достижения следующие. Создаются новые спектрографы и спектрополяриметры для крупнейших в мире телескопов, в частности, для ELT, поскольку спектрополяриметрия является одним из важнейших методов наблюдений. Получены первые результаты на новом волоконном спектрографе PEPSI. Очень слабые магнитные поля будут исследоваться на спектрополяриметре CRIFES+. Новый волоконный спектрополяриметр для 6-м телескопа находится в стадии изготовления.

Получены обширные наблюдательные данные. В первую очередь прогресс связан с высокоточной фотометрией, выполненной с помощью спутника Кеплер и других космических телескопов. В частности, высокоточные данные получены спутником TESS, но статьи с их результатами начали выходить из печати только в 2019 г. На несколько порядков увеличилась точность определения периодов вращения CP-звезд, стало возможным изучение миграции пятен на их поверхности.

В области исследований звездного магнетизма существенные результаты по измерениям магнитных полей в ассоциации Орион OB1 получены

на 6-м телескопе CAO РАН. Найдено, что доля магнитных звезд в ассоциации по отношению к нормальным падает с возрастом.

Выполнены высокоточные наблюдения на спектрополяриметрах ESPDONS, NARVAL, Harpsol, проведено моделирование полученных результатов. Построены карты распределения магнитного поля у ряда звезд. Точности измерений порядка 1 Гс уже не вызывают удивления. Измерены магнитные поля у ряда звезд типа δ Scuti и Ae/Be Хербига. Поля у них значительно слабее, чем у Ap/Bp-звезд. Найдены магнитные поля у целого ряда активных холодных звезд. Поле величиной порядка 1 Гс измерено у красного сверхгиганта Бетельгейзе. Найдены магнитные белые карлики с рекордно слабыми полями, а также несколько предположительно магнитных звезд с экзопланетами.

Таким образом, исследования звездного магнетизма продолжают оставаться одним из наиболее актуальных направлений исследований в современной астрофизике.

FUNDING

Автор благодарит Российский фонд фундаментальных исследований за частичную финансовую поддержку работы (грант РФФИ 18-29-21030).

CONFLICT OF INTEREST

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **73**, 437 (2018).
5. J.-C. Bouret, C. Neiner, A. Lopez Ariste, et al., *Bull. Amer. Astron. Soc.* **231**, id. 419.01 (2018).
6. E. Muslimov, J.-C. Bouret, C. Neiner, et al., *SPIE Conf. Proc.* **10699**, id. 1069906 (2018).
7. J.-C. Bouret, in *Proc. Ann. Meet. French Society of Astronomy and Astrophysics on Future Instrumentation (SF2A-2018)* (2018), p. 339.
8. A. Marconi, C. Allende Prieto, P. J. Amado, et al., *SPIE Conf. Proc.* **10702**, id. 107021Y (2018).
9. I. Di Varano, M. Woche, K. G. Strassmeier, et al., *SPIE Conf. Proc.* **10706**, id. 107061Y (2018).
10. M. Woche, I. Di Varano, K. G. Strassmeier, et al., *SPIE Conf. Proc.* **10706**, id. 1070653 (2018).

11. K. G. Strassmeier, I. Ilyin, M. Weber, et al., SPIE Conf. Proc. **10702**, id. 1070212 (2018).
12. N. Piskunov, E. Stempels, A. Lavail, et al., SPIE Conf. Proc. **10702**, id. 1070234 (2018).
13. P. Dorval, F. Snik, N. Piskunov, et al., SPIE Conf. Proc. **10702**, id. 1070268 (2018).
14. E. Muslimov, G. Valyavin, S. Fabrika, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **130**, 075001 (2018).
15. G. G. Valyavin, F. A. Musaev, A. V. Perkov, et al., ASP Conf. Ser. **518**, 242 (2019).
16. S. Tinyanont, M. A. Millar-Blanchaer, R. Nilsson, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **131**, 025001 (2019).
17. G. G. Valyavin, Privat communication (2019).
18. G. Valyavin, D. Shulyak, G. Wade, et al., Nature **515**, 88 (2014).
19. K. Antonyuk, G. Valyavin, A. Valeev, et al., Astrophysical Bulletin **74**, 172 (2019).
20. T. M. Sitnova, L. I. Mashonkina, and T. A. Ryabchikova, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **477**, 3343 (2018).
21. S. Alexeeva, T. Ryabchikova, L. Mashonkina and S. Hu, Astrophys. J. **866**, 153 (2018).
22. V. Tsymbal, T. Ryabchikova, and T. Sitnova, ASP Conf. Ser. **518**, 247 (2019).
23. S. Ghazaryan, G. Alecian, and A. A. Hakobyan, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **480**, 2953 (2018).
24. M. L. Ndiaye, F. LeBlanc, and V. Khalack, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **477**, 3390 (2018).
25. V. Khalack, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **477**, 882 (2018).
26. M. Baratella, G. Carraro, V. D'Orazi, and E. A. Semenko, Astron. J. **156**, 244 (2018).
27. J. Janik, J. Kr̄tička, Z. Mikulášek, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **130**, 4203 (2018).
28. E. Paunzen, M. Fedurco, K. G. Helminiak, et al., Astron. and Astrophys. **615**, A36 (2018).
29. E. Paunzen, K. Bernhard, M. Frauenberger, et al., New Astronomy **68**, 39 (2019).
30. A. Romanovskaya, T. Ryabchikova, and D. Shulyak, ASP Conf. Ser. **518**, 173 (2019).
31. E. Paunzen, G. Handler, K. Hoňková, et al., Research Astron. Astrophys **18**, 135 (2018).
32. R. J. Dukes, Jr., and S. J. Adelman, Publ. Astron. Soc. Pacific **130**, 044202 (2018).
33. C. N. Ofodum and P. N. Okeke, New Astronomy **65**, 67 (2018).
34. J. Juryšek, P. Zasche, M. Wolf, et al. Astron. and Astrophys. **609**, A46 (2018).
35. Z. Mikulášek, E. Paunzen, S. Hümmerich, et al., ASP Conf. Ser. **518**, 117 (2019).
36. Z. Mikulášek, J. Kr̄tička, G. W. Henry, et al., ASP Conf. Ser. **518**, 125 (2019).
37. M. Jagelka, Z. Mikulášek, S. Hümmerich, and E. Paunzen, Astron. and Astrophys. **622**, A199 (2019).
38. S. Hümmerich, Z. Mikulášek, E. Paunzen, et al., Astron. and Astrophys. **619**, A98 (2018).
39. E. Paunzen, K. Bernhard, S. Hümmerich, et al., Astron. and Astrophys. **622**, A77 (2019).
40. V. G. Klochkova, E. G. Sendzikas, and E. L. Chentsov, Astrophysical Bulletin **73**, 52 (2018).
41. D. M. Bowman, B. Buysschaert, C. Neiner, et al., Astron. and Astrophys. **616**, A77 (2018).
42. M. Munoz, G. A. Wade, Y. Nazé, et al., Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, **48**, 149 (2018).
43. J. F. González, S. Hubrig, S. P. Järvinen, and M. Schöller, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **481**, L30 (2018).
44. S. P. Järvinen, S. Hubrig, I. Ilyin, et al., Astron. and Astrophys. **618**, L2 (2018).
45. M. E. Shultz, G. A. Wade, T. Rivinius, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **475**, 5144 (2018).
46. S. Hubrig, S. P. Järvinen, J. Madej, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **477**, 3791 (2018).
47. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., Astrophysical Bulletin **73**, 178 (2018).
48. I. S. Savanov, I. I. Romanyuk, and E. S. Dmitrienko, Astrophysical Bulletin **73**, 463 (2018).
49. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., ASP Conf. Ser. **518**, 3 (2019).
50. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., Astrophysical Bulletin **74**, 55 (2019).
51. A. V. Moiseeva, I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, et al., Astrophysical Bulletin **74**, 62 (2019).
52. O. Kochukhov, C. Johnston, E. Alecian, and G. A. Wade, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **478**, 1749 (2018).
53. M. Shultz, T. Rivinius, G. A. Wade, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **475**, 839 (2018).
54. O. Kochukhov, M. Shultz, and C. Neiner, Astron. and Astrophys. **621**, A47 (2019).
55. J. Sikora, G. A. Wade, J. Power, and C. Neiner, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **483**, 2300 (2019).
56. B. Buysschaert, C. Neiner, A. J. Martin, et al., Astron. and Astrophys. **622**, A67 (2019).
57. M. Shultz, J.-B. Le Bouquin, T. Rivinius, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **482**, 3950 (2019).
58. I. Han, G. Valyavin, G. Galazutdinov, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **479**, 1427 (2018).
59. S. P. Järvinen, S. Hubrig, R.-D. Scholz, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **481**, 5163 (2018).
60. M. Shultz, O. Kochukhov, G. A. Wade, and T. Rivinius, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **478**, L39 (2018).
61. S. P. Järvinen, S. Hubrig, M. Schöller, and I. Ilyin, New Astronomy **62**, 37 (2018).
62. A. J. Martin, C. Neiner, M. E. Oksala, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **475**, 1521 (2018).
63. I. Pillitteri, L. Fossati, N. Castro Rodriguez, et al., Astron. and Astrophys. **610**, L3 (2018).
64. S. P. Järvinen, T. A. Carroll, S. Hubrig, et al., Astrophys. J. **858**, L18 (2018).
65. B. Buysschaert, C. Aerts, D. M. Bowman, et al., Astron. and Astrophys. **616**, A148 (2018).
66. M. Shultz, G. A. Wade, C. Neiner, and O. Kochukhov, Polish Astron. Soc. **8**, 146 (2018).

67. G. A. Wade, J. V. Smoker, C. J. Evans, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483**, 2581 (2019).
68. L. Rosén, O. Kochukhov, E. Alecian, et al., *Astron. and Astrophys.* **613**, A60 (2018).
69. A. Lavail, O. Kochukhov, and G. A. Wade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479**, 4836 (2018).
70. C. P. Folsom, J. Bouvier, P. Petit, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474**, 4956 (2018).
71. S. V. Jeffers, M. Mengel, C. Moutou, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479**, 5266 (2018).
72. T. Hackman, I. Ilyin, J. J. Lehtinen, et al., *Astron. and Astrophys.* **625**, A79 (2019).
73. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **62**, 814 (2018).
74. F. VILLEBRUN, E. Alecian, G. Hussain, et al., *Astron. and Astrophys.* **622**, A72 (2019).
75. S. Boro Saikia, T. Lueftinger, S. V. Jeffers, et al., *Astron. and Astrophys.* **620**, L11 (2018).
76. B. Buysschaert, C. Neiner, A. J. Martin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **478**, 2777 (2018).
77. J.-F. Donati, J. Bouvier, S. H. Alencar, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483**, L1 (2019).
78. P. Mathias, M. Aurière, A. López Ariste, et al., *Astron. and Astrophys.* **615**, A116 (2018).
79. A. López Ariste, P. Mathias, B. Tessore, et al., *Astron. and Astrophys.* **620**, A199 (2018).
80. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **618**, A113 (2018).
81. J. Farihi, L. Fossati, P. J. Wheatley, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474**, 947 (2018).
82. A. Kawka, S. Vennes, L. Ferrario, and E. Paunzen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482**, 5201 (2019).
83. E. Aronson and N. Piskunov, *Astron. J.* **155**, 208 (2018).
84. C. P. Folsom, L. Fossati, B. E. Wood, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **481**, 5286 (2018).
85. G. G. Valyavin, D. R. Gadelshin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **73**, 225 (2018).

Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars. 5. Main Results of 2018 and Near-Future Prospects

I. I. Romanyuk

We have surveyed about a hundred papers published in 2018 in the leading astronomical journals and related to the “Magnetic fields and physical parameters of chemically peculiar and related stars” subject area. We have considered new projects of telescopes and mounted instruments for them as well as the first results obtained with telescopes recently put into operation. We have reviewed new papers on observation methods, data reduction and analysis. Spectroscopic studies of peculiar stars: their chemical abundance and other parameters are presented in the paper. We continued conducting both classical ground-based photometric observations and high-accuracy photometry with space telescopes. Our survey pays the most attention to magnetic fields of stars. We present observations of large-scale fields of OBA stars and local fields of cool active stars. Dozens new magnetic stars have been discovered. We also consider here some observations of magnetic white dwarfs and exoplanets which are of interest within the issue under study.

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