

УДК 524.3–337, 524.35

## МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ И РОДСТВЕННЫХ ИМ ЗВЕЗД. VI. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2019 ГОДА И АНАЛИЗ БЛИЖАЙШИХ ПЕРСПЕКТИВ

© 2020 И. И. Романюк<sup>1\*</sup>

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

Поступила в редакцию 26 мая 2020 года; после доработки 6 августа 2020 года; принята к публикации 6 августа 2020 года

В статье приведен обзор важнейших результатов исследований магнитных химически пекулярных и родственных им звезд. Проанализированы более 90 статей, опубликованных в ведущих мировых астрономических изданиях главным образом в 2019 г. Важнейшие результаты: получены сверхточное фотометрические кривые блеска в ходе миссии спутника TESS; обнаружено несколько десятков новых магнитных химически пекулярных звезд; было показано, что большие магнитные пятна в холодных звездах существуют десятки лет практически без изменений; найдено несколько новых магнитных белых карликов с очень слабыми полями; обнаружен сильномагнитный белый карлик с периодом вращения около 100 лет. Получены новые данные, позволяющие лучше понять механизмы формирования и эволюции магнитных звезд.

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

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования магнитных звезд продолжают с высокой интенсивностью. Ежегодно публикуется около 300 статей по этой теме. Разрабатываются и внедряются новые методы наблюдений и обработки полученных данных. Новые результаты меняют представления о физике наблюдаемых явлений. В ходе выполнения миссий Kepler, TESS и других, основной целью запуска которых были поиски и исследование экзопланет, получены высокоточные фотометрические данные и для магнитных звезд. Резко возросло количество публикаций, посвященных результатам анализа этих наблюдений.

Классические измерения магнитных полей звезд продолжают на крупнейших телескопах мира, включая 8-м VLT в Чили и 6-м БТА в России. Методами зееман-доплеровского картирования (Zeeman-Doppler imaging, ZDI) изучена топология поверхности многих магнитных звезд.

Настоящая статья является продолжением серии ежегодных обзоров важнейших результатов, достигнутых в области исследований химически пекулярных (CP) и родственных им магнитных звезд. В работах Романюк (2015; 2016; 2017; 2018; 2019) представлены основные результаты, полученные в 2014–2018 гг.

Как и прежде, будут проанализированы важнейшие статьи, опубликованные в ведущих мировых

астрономических журналах, а также в сборниках докладов международных конференций, в частности, конференции «Physics of Magnetic Stars», проходившей в октябре 2018 г. в Специальной астрофизической обсерватории: ASP Conf. Ser., Vol.518, San Francisco, 2019, Eds. I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin and D. O. Kudryavtsev. Некоторые статьи из этого сборника анализируются в представляемом обзоре. Несколько большее внимание будет уделено работам российских ученых, так как они по разным причинам не всегда должным образом цитируются.

### 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

В астрономии, в отличие от физики, невозможно поставить эксперимент. Новые данные можно получить только за счет введения в строй новых телескопов и приемной аппаратуры, усовершенствования методов наблюдений, обработки и анализа данных. Развитие инструментальной базы — это дорогостоящий путь, однако он наиболее перспективен для изучения слабых, ранее недоступных исследователям объектов или тонких физических эффектов, наблюдаемых в космосе.

#### 2.1. Новые телескопы и навесное оборудование

В предыдущих обзорах было описано много различных проектов новых телескопов и оборудования

\* E-mail: roman@sao.ru

для них. Такие разработки требуют длительного времени для реализации, поэтому не могут появляться ежегодно. В 2019 г. в литературе представлено всего несколько проектов астрономических телескопов и спектрографов.

В статье de Jong et al. (2019) описан 4MOST (4-m Multi-Object Spectroscopic Telescope) — телескоп для спектроскопического обзора в широком поле обсерватории Paranal. Консорциум 4MOST осуществляет работу по трем направлениям:

- разработка конструкции, оборудования и необходимого программного обеспечения;
- обработка данных, их архивизация и публикация;
- координация выполнения различных научных обзоров неба.

Телескоп с полем зрения 4.2 квадратных градуса будет оборудован тремя волоконными спектрографами: двумя низкого разрешения ( $R = 6500$  с диапазоном 3700–9500 Å) и одним высокого ( $R = 20\,000$  для работы в трех диапазонах шириной около 500–600 Å с центральными длинами волн 4200, 5400, 6500 Å). В каждом спектрографе будет по 812 волокон. Планируемая точность определения лучевых скоростей — менее  $1 \text{ км с}^{-1}$ . В статье приводится описание инструмента и обсуждаются научные программы, которые на нем могут быть выполнены.

Далее рассмотрим некоторые менее известные астрономические проекты, разрабатываемые в России.

В работах Valyavin et al. (2020; 2019) описан проект оптоволоконного спектрополяриметра для 6-м телескопа со спектральным разрешением  $R = 50\,000$ – $100\,000$  и рабочей областью 4000–7500 Å. Приведена оптическая схема прибора. Выполнены лабораторные испытания. Пиковая эффективность всего оптического тракта спектрографа (без учета световых потерь на ПЗС, главном зеркале БТА и в атмосфере) на длине волны 620 нм и с эквивалентными ширинами входной щели  $1''.5$  и  $0''.75$  достигает значений 8% и 4% соответственно. Наибольшие значения спектрального разрешения ( $R \approx 70\,000$ – $100\,000$ ) достигаются с ширинами входной щели  $0''.75$ – $0''.4$ . В данном спектрографе этот режим работы инструмента реализован механическим диафрагмированием щели.

Sazonenko et al. (2019) приводят расчет спектрографа для астрофизических исследований на базе плоской отражательной дифракционной решетки. Предложены рекомендации по выбору принципиальной схемы спектрографа.

Kukushkin et al. (2019) представили оптические схемы стокс-поляриметров с различными поляризационными анализаторами. Проведена сравнительная оценка пропускания поляриметров с призмой Волластона и модифицированной призмой Фостера. Приведены рекомендации для использования указанных призм.

В работе Nalivkin et al. (2019) описывается спектрограф низкого разрешения UVEX, разрабатываемый в Институте астрономии РАН. Область спектра от 3000 до 9000 Å. Спектральное разрешение в разных диапазонах от 200 до 1000. Прибор совместим с телескопами Цейсс-2000, Цейсс-1000 и Цейсс-600.

Новый проект MAGIC (Kniazev et al. 2019) выполняется на Большом Южно-Африканском телескопе SALT. Спектроскопия для исследований химического состава цефеид Галактики проводится с помощью эшелле-спектрографа HRS ( $R \approx 36\,500$ – $39\,000$ ) с высоким отношением  $S/N$ . Для обработки данных используется пакет, созданный авторами на основе стандартной системы MIDAS.

## 2.2. Методика наблюдения и анализа данных

Ниже представим обзор нескольких статей, которые имеют большое практическое значение при анализе данных.

Aronson and Piskunov (2019) представили независимую от модели методику картирования вариаций блеска. Метод оптимизирован для поиска экзопланет. Карта вариаций блеска на поверхности звезды строится следующим образом: сначала рассчитывается синтетическая кривая блеска, наилучшим образом соответствующая наблюдаемой, далее находятся вариации блеска относительно синтетической кривой. Авторы воспроизвели звездный диск, опираясь на синтетические и наблюдательные данные.

Ryabchikova et al. (2019) провели сравнение экспериментальных лабораторных данных вероятностей переходов Fe I с солнечным и звездными спектрами. Для этого были выбраны нормальные (непекулярные) звезды: Солнце, Процион, HD 32115 и 21 Peg. Новые данные позволили резко увеличить количество линий железа в оптической и инфракрасной областях спектра для анализа химического состава звезд в широком интервале температур и металличностей.

В работе Pakhomov et al. (2019) представлены новые возможности расчетов синтетических спектров в базе VALD с учетом сверхтонкого расщепления атомных уровней. Авторы проанализировали 58 изотопов, 30 нейтральных и однократно ионизованных атомов. База данных позволяет выполнять

анализ расщепления до 60% линий в ультрафиолете (менее 1000 Å) и почти 100% линий в оптической и ИК-областях для А–М-звезд. Для более горячих О–В-звезд необходимы лабораторные измерения атомов, находящихся во второй и более высоких стадиях ионизации.

Tsymbol et al. (2019) представили пакет программ для тонкого анализа, основывающийся на NLTE-приближении при описании спектров. Программа спектрального синтеза SYNTHV, работающая в LTE-приближении, была модифицирована для вычислений NLTE-спектров. Используется список линий из базы атомных данных VALD.

### 3. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

#### 3.1. Результаты спектроскопии

Количество статей по спектроскопии химически пекулярных звезд, опубликованных в 2019 г., оказалось небольшим. Почти все они посвящены определениям фундаментальных параметров и анализу химического состава атмосфер.

В результате работы Moiseeva et al. (2019a) удалось существенно увеличить число химически пекулярных звезд с определенными по однородной методике фундаментальными параметрами. В статье представлены результаты нахождения эффективных температур, ускорений силы тяжести, светимостей, масс и радиусов 60 CP-звезд ассоциации Орион OB1. Наблюдательные данные состоят из более чем 500 циркулярно-поляризованных спектров, полученных на Основном звездном спектрографе (ОЗСП) 6-м телескопа БТА в период с 2009 по 2018 гг. В работе этих же авторов (Moiseeva et al. 2019c) представлен каталог фундаментальных параметров для 109 изолированных CP-звезд. В статье Moiseeva et al. (2019b) приведены результаты определения фундаментальных параметров для 146 звезд, наблюдавшихся на 6-м телескопе в 2009–2011 гг.

Romanovskaya et al. (2019a) исследовали вертикальное распределение содержания железа и хрома в атмосфере магнитной CP-звезды 78 Vir. Спектры с высоким разрешением были получены в восьми разных фазах. Было показано, что на всех спектрах наблюдается резкий скачок содержания железа и хрома на оптических глубинах  $-1.5 < \log \tau < -1.0$ . Положение скачка слегка меняется с фазой, двигаясь в направлении высоких слоев атмосферы в тех фазах, где содержание элементов наибольшее.

В работе Romanovskaya et al. (2019b) определены фундаментальные параметры трех химически пекулярных звезд: HD 188041, HD 111133,

и HD 204411. Анализ авторов базируется на самосогласованной модели и хорошо воспроизводит наблюдаемые спектры. Найдено вертикальное распределение трех элементов: Ca, Sr и Fe. Для HD 188041 и HD 204411 выполнены также интерферометрические наблюдения с целью прямых определений радиусов. Сравнение спектроскопических и интерферометрических радиусов для семи Ar-звезд показало, что в пределах ошибок они не различаются.

#### 3.2. Результаты фотометрии

Современная высокоточная фотометрия проводится в ходе выполнения космических миссий. Хотя при анализе данных со спутников приходится устранять различные инструментальные эффекты, точности внеатмосферных наблюдений на порядок выше по сравнению с наземной фотометрией. Особо следует отметить данные, получаемые в ходе миссии спутника TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), предназначенного для поисков экзопланет.

##### 3.2.1. Небольшие космические аппараты

Сперва коснемся результатов наблюдений на небольших космических аппаратах.

Системой спутников BRITE Constellation выполнены наблюдения двойной системы  $\epsilon$  Lupi A, состоящей из двух В-звезд главной последовательности (ГП). Звезды Aa и Ab имеют короткие орбиты с умеренным эксцентриситетом. К настоящему времени известна только одна такая система. В работе Pablo et al. (2019) выполнена фотометрия пары и найдена пульсационная переменность. Комбинируя результаты фотометрии с оценками лучевых скоростей обоих компонентов, авторы нашли их массы и радиусы. Выполнено сравнение с моделями звездной эволюции и с результатами интерферометрии.

На трех разных микроспутниках были проведены одновременные наблюдения очень яркой двойной звезды  $\beta$  Lyr, в которой имеет место перетекание масс между компонентами. Некоторые признаки химической пекулярности у нее обсуждаются в литературе. В работе Rucinski et al. (2019) проведены высокоточные наблюдения на разных спутниках в различных спектральных областях. Найдены различия в разных фильтрах, которые не объясняются возможными инструментальными проблемами.

### 3.2.2. Спутник TESS

Далее рассмотрим результаты, получаемые на спутнике TESS.

Для изучения переменности массивных магнитных звезд и звезд промежуточной массы по данным высокоточной фотометрии с этого спутника была создана коллаборация MOBSTER (Magnetic OB[A] Stars with TESS: probing their Evolutionary and Rotational properties).

Как отмечено в работе Barron et al. (2020), свойства магнитных O-звезд изучены плохо. Известна лишь дюжина таких объектов, поэтому из-за малой статистики заключения об их общих свойствах ненадежны. Коллаборация MOBSTER подготовила список объектов для наблюдений на TESS с целью обнаружения модуляций блеска, вызванных вращением O-звезд с пятнами.

В работе Krtićka et al. (2019) изучаются ультрафиолетовые и визуальные кривые блеска CU Vir. Это первая звезда ГП с радиопульсациями, которые интерпретируются как авроральные радиоэмиссии, подобные тем, что найдены у планет. Звезда также относится к редкой группе объектов с переменным периодом вращения. УФ-спектры получены на спектрографе STIS (Hubble Space Telescope). Авторы нашли, что ультрафиолетовая и визуальная кривые блеска показывают одинаковые долговременные вариации, что свидетельствует об их общем происхождении. Не найдено никаких авроральных линий, которые свидетельствовали бы о наличии оболочки. Авторы считают, что наблюдаемые в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах изменения блеска связаны со структурами на поверхности звезды.

Обзор свойств новых химически пекулярных звезд, отождествленных в поле спутника Kepler, сделали Mikulášek et al. (2019c). Они составили выборку из 41 звезды. Критерии отбора следующие: монопериодическая переменность и стабильная кривая блеска. Объекты являются хорошими кандидатами для поиска новых магнитных CP-звезд.

В статье Mikulášek et al. (2019a) исследуется переменность магнитной пекулярной звезды 78 Vir. Это очень быстрый ротатор, у которого наблюдаются строго периодические вариации блеска во всех диапазонах длин волн, а также спектральные и спектрополяриметрические изменения. Кроме того, это первый радиопульсар среди звезд ГП. Авторы проанализировали около 38 000 индивидуальных фотометрических и спектральных измерений и нашли вековые изменения периода вращения.

Авторы работы Zejda et al. (2019) выполнили фотометрический обзор объектов Малого Магелланового Облака. Использовалась узкополосная

система Δа Венской обсерватории. Она эффективна при поисках химически пекулярных звезд. Первые результаты следующие: доля CP-звезд составляет 0.5% от всех A- и B-звезд ГП по сравнению с 15% в нашей Галактике.

Далее представим несколько результатов по фотометрии пекулярных звезд, полученных на спутнике TESS.

В работе Mathys et al. (2020) на основании данных TESS найдены кандидаты в долгопериодические Ap-звезды. Критерием отбора служило отсутствие переменности на промежутке времени 27 суток (время наблюдений одной области на спутнике). Авторы нашли 60 Ap-звезд в южной полусфере, удовлетворяющих этому критерию. Из них шесть видны с полюса вращения, 31 уже известна как имеющая длинные периоды вращения, 23 — это новые обнаружения. Для подтверждения факта медленного вращения необходимо выполнить спектральные и спектрополяриметрические наблюдения.

Balona et al. (2019) изучали вращение B-звезд, используя данные фотометрии. Для 160 B-звезд кривые блеска и периодограммы построены по наблюдениям миссии TESS, для 29 звезд — по наблюдениям миссии Kepler. Из 114 звезд ГП в миссии TESS 45 классифицированы как переменные вследствие вращения. Для определения светимостей были использованы параллаксы GAIA DR2, далее были определены радиусы и экваториальные скорости вращения. Делается вывод о том, что большая доля B-звезд имеет особенности на поверхности, вероятно, не связанные с вариациями обилия элементов.

David-Uraz et al. (2019b) представили первые результаты исследований магнитных OBA-звезд, проводимых коллаборацией MOBSTER с использованием миссии TESS. Выполнены наблюдения 19 уже известных магнитных OBA-звезд в секторах 1 и 2 миссии. Авторы определили точные периоды по заново полученным кривым блеска и сравнили с опубликованными ранее. Продемонстрированы преимущества использования высокоточных данных TESS.

Sikora et al. (2019a) приводят результаты поисков переменных A-звезд в секторах 1–4 миссии TESS. Как правило, продолжительность высокоточных фотометрических наблюдений одной области составляет 28 суток. Выполнены наблюдения 60 не изученных ранее звезд. Примерно половина из них в литературе идентифицируется как CP-звезды. Объекты, не являющиеся CP-звездами, показывают значительно меньший период вращения и значительно меньшую амплитуду переменности.

Большая группа авторов Cunha et al. (2019) представляет результаты изучения вариаций блеска Ар-звезд по данным миссии TESS. Проанализированы двухминутные экспозиции для выборки из 83 объектов. Найдено пять новых быстро осциллирующих (гоАр)-звезд. Одна из них пульсирует с периодом около 4.7 минут, что является наиболее коротким периодом вариаций из всех известных гоАр-звезд. В дополнение проанализированы еще семь известных ранее гоАр-звезд. У некоторых обнаружены дополнительные моды осцилляций. Авторы нашли, что типичные амплитуды осцилляций в фильтре TESS в шесть раз меньше, чем в фильтре *B*. Кроме того, обнаружены 27 звезд, переменность которых вызвана вращением.

Skarka et al. (2019) сообщают об обнаружении первой Ар-звезды, которая показывает пульсации типа  $\delta$  Scuti и к тому же является затменной двойной. Это объект HD 99548 в затменной системе с орбитальным периодом короче трех суток. Он является своего рода уникальной лабораторией, в которой можно исследовать одновременно различные физические явления. Это первая Ар-звезда, найденная в затменной двойной системе. Спутником является красный карлик класса M2 с большим наклоном орбиты. Периоды вращения и орбитальный синхронизованы.

#### 4. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЗВЕЗД

В настоящем разделе будут рассмотрены классические массивные химически пекулярные звезды с крупномасштабными глобальными полями, пульсирующие магнитные звезды и объекты типа Ae/Be Хербига, а также маломассивные звезды с полями сложной структуры.

##### 4.1. Магнитные OBA-звезды с крупномасштабными полями

Крупномасштабными полями с преимущественным вкладом дипольной компоненты обладают химически пекулярные звезды, а также звезды типа Ae/Be Хербига. Наибольших величин (до десятков кГс) поля достигают у CP-звезд, у звезд Хербига они на 1–2 порядка меньше.

##### 4.1.1. Классические Ар- и Вр-звезды Главной последовательности

Классические Ар- и Вр-, или магнитные CP-звезды, представляют собой группу объектов на ГП с наиболее сильными магнитными полями. С момента открытия у них магнитных полей (Вавсок 1947а; б) их изучение выполняется в разных направлениях. Менее всего понятен механизм формирования и эволюции сильных крупномасштабных магнитных полей. Хотя факт отсутствия

работы механизма динамо для поддержания полей Ар/Вр-звезд доказан достаточно надежно, очень многие вопросы до настоящего времени остаются без ответа.

Одна из проблем — вопрос о наличии у таких звезд дифференциального вращения. Оно может играть очень важную роль в формировании крупномасштабных полей. Уже много десятилетий известно, что CP-звезды вращаются значительно медленнее нормальных. Типичные периоды вращения варьируются от нескольких суток до нескольких недель. Однако существуют магнитные Ар-звезды с периодами вращения годы и десятилетия. Такие объекты можно обнаружить только по данным о магнитных полях.

В работе Mathys et al. (2019b) коллектив авторов, работающих на 6-м телескопе CAO РАН и на телескопах ESO в Чили, в течение нескольких десятков лет проводили мониторинг и исследовали вариации магнитного поля Ар-звезды HD 50169. Было установлено, что период ее вращения равен  $29.04 \pm 0.82$  года. На текущий момент HD 50169 является звездой с наиболее длинным периодом вращения, измерения магнитного поля которой выполнены на протяжении полного цикла. Кривые переменной поверхности и продольного поля имеют значительную степень ангармоничности, найден значительный сдвиг по фазе между этими кривыми. Авторы подтверждают, что HD 50169 является широкой спектроскопически двойной, вторичный компонент — карлик класса M.

Тот же коллектив авторов в работе Mathys et al. (2019a) изучил другую сверхмедленно вращающуюся Ар-звезду HD 965. Наблюдения продольного поля были выполнены на 6-м телескопе CAO РАН, поверхностного — на телескопах ESO. Впервые был найден период вращения звезды  $P = 16.5 \pm 0.5$  лет. Это третья по величине периода вращения звезда, которая наблюдалась на протяжении более одного полного цикла. Предложена модель поля в виде суперпозиции коллинеарных диполя, квадруполь и октополя. Форма кривой указывает на то, что поле симметрично относительно оси, проходящей через центр звезды.

Mathys (2019) представил обзор результатов исследований сверхмедленных ротаторов. Показано, что периоды вращения Ар-звезд покрывают 5–6 порядков, при этом нет признаков эволюции из-за консервации углового момента во время жизни на ГП. Проанализированы последние работы, выполненные в этом направлении.

##### 4.1.2. Ат-звезды

Проведены несколько исследований по поиску слабых магнитных полей и их картированию у другой группы пекулярных объектов — так называемых Ат-звезд.

В работе Blazère et al. (2020) обсуждаются магнитная геометрия и дифференциальное вращение поверхности яркой  $A_1$ -звезды  $\alpha$  Centauri A. У нее наблюдается самое сильное среди  $A_1$ -звезд крупномасштабное магнитное поле величиной несколько десятков Гс. Для построения модели магнитного поля авторы провели 25 наблюдений на спектрополяриметре NARVAL и выполнили фотометрию на спутниках BRITe. Авторы подтверждают, что звезда магнитная. Модель наклонного ротатора с полем 30 Гс на полюсе диполя согласуется с наблюдениями. Период вращения 8.975 суток получен на основании изучения вариаций профилей спектральных линий. Магнитное картирование показывает, что существует дифференциальное вращение: разница скоростей между низкими и высокими широтами составляет примерно 15% от солнечной величины.

Raunzen et al. (2019) выполнили новые исследования магнитной химически пекулярной звезды 21 Com. Ранее она неоднократно изучалась, но имелись противоречивые результаты, в частности, касающиеся существования быстрых пульсаций в ее атмосфере. Новые исследования показали, что 21 Com — классическая химически пекулярная звезда с усиленным содержанием ряда типичных элементов. Подтвержден период вращения порядка 2.05 суток. Но не найдено никаких пульсаций типа  $\delta$  Scuti или  $\gamma$  Ar.

#### 4.1.3. Массивные В- и О-звезды

В последние несколько лет особое внимание уделялось исследованиям магнитных полей массивных В- и О-звезд. В предыдущие годы было проведено несколько магнитных обзоров этих объектов, результаты которых были представлены ранее. Но более детальные магнитные исследования этих объектов продолжаются.

Так, в работе Shultz et al. (2019a) исследуется NU Ori — иерархическая тройная система с сильномагнитной В-звездой. Она входит в Orion Nebula Cluster Aa, Ab, B и C. Первичный компонент Aa — звезда спектрального класса B0.5 — является одной из наиболее массивных магнитных звезд. Детально исследованы все компоненты, определены их массы и периоды вращения. Найдены признаки эмиссии (на уровне 1% от континуума) в линии H $\alpha$ .

David-Uraz et al. (2019a) приводят результаты исследований экстремальных вариаций профилей линий в ультрафиолетовом спектре О-звезды NGC 1624-2 по данным, полученным на телескопе Хаббла (HST). Звезда обладает гигантской магнитосферой. В частности, найдено, что вариации линий в дублетах C IV и Si IV между низким и высоким состояниями — наибольшие среди всех известных О-звезд. В низком состоянии также

появляется красномещенная абсорбционная компонента, которая у большинства звезд не наблюдается.

Petit et al. (2019) подводят некоторые итоги обзора MIMES. Рассматриваются магнитные свойства О-звезд. Показано, что распределение величин магнитных полей О-звезд бимодально: либо имеются звезды с сильными полями, либо поля не обнаруживаются.

В работе Hubrig et al. (2019c) сообщается об обнаружении кратковременного и внезапного изменения магнитного поля у звезды HD 54879 спектрального класса O9.7 V. Магнитные О-звезды — достаточно редкое явление. Только у одиннадцати из них подтверждено наличие крупномасштабного организованного магнитного поля. Несколько лет назад у HD 54879 было обнаружено продольное поле  $-600$  Гс с нижним пределом на полюсе диполя около 2 кГс. Наблюдения авторов на спектрографе FORS2 в 2017–2018 гг. показали наличие быстрой и долговременной переменности и существенное ослабление поля с  $-300$  до  $-90$  Гс. Обсуждаются различные сценарии интерпретации наблюдений. Однако в работе Wade et al. (2020) авторы не подтверждают наличие быстрых вариаций поля у HD 54879. Наблюдения с высоким спектральным разрешением позволяют считать выводы работы Hubrig et al. (2019c) ошибочными.

Sikora et al. (2019b) рассматривают магнитные свойства и вращение магнитных CP-звезд, находящихся внутри локального объема в 100 пк. Наблюдения с высоким спектральным разрешением были проведены на спектрополяриметрах ESPDONS и NARVAL (подробно описаны в работе Romanyuk (2015)). Представлены результаты однородного статистического анализа параметров вращения (периоды и др.) и магнитных свойств (величина поля на полюсе диполя  $B_p$  и угол наклона оси диполя к оси вращения  $\beta$ ) для 52 CP-звезд, находящихся на гелиоцентрических расстояниях до 100 пк. Ни у одной из звезд не найдено поле менее 300 Гс, что подтверждает более ранний вывод о существовании «магнитной пустыни». Найдены доказательства затухания магнитного поля.

Исследование Shultz et al. (2019e) посвящено определению атмосферных параметров В-звезд, расстояния до которых получены при использовании параллаксов GAIA, а также HURRAPOS в случаях ярких В-звезд ( $V < 6^m$ ) и двойных. Определены светимости всех объектов. Сравнение ускорений силы тяжести и светимостей не показало никаких корреляций с данными о магнитном поле. Однако найдено уменьшение скорости вращения с уменьшением  $\log g$  с ростом светимости  $\log L$ , что указывает на возможность магнитного торможения, ускоряющегося с увеличением скорости потери массы.

В работе Chojnowski et al. (2019) сообщается об измерениях магнитных полей 157 химически пекулярных звезд, базирующихся на изучении разрешенных магнитно-расщепленных линий поглощения в инфракрасной полосе  $H$  ( $\lambda \approx 15$  мкм). Эти звезды представляют собой экстремальный магнитный «хвост» выборки из более чем 900 звезд, выделенных по спектрам APOGEE и по классификации Ар/Вр-звезд из литературы (SDSS/APOGEE survey). Магнитные измерения (без анализатора) при работе в ИК-области стали возможными благодаря квадратичной зависимости расщепления в эффекте Зеемана от длины волны. В полосе  $H$  имеем в 1000 раз больше зеемановское расщепление линий по сравнению с обычной визуальной областью спектра. Модуль поля определялся по пяти выбранным линиям Се III, для которых были вычислены факторы Ланде. Та же процедура для проверки была применена к оптическим спектрам 29 звезд выборки, полученным с высоким разрешением с помощью спектрографа ARCES на 3.5-м телескопе ARCES. Результаты хорошо согласуются, что позволяет говорить о перспективности работы в ИК-диапазоне. При подтверждении работоспособности метода астрономы получают очень эффективный инструмент поиска новых магнитных звезд с сильными полями.

У нескольких горячих магнитных В-звезд найдены узконаправленные радиоэмиссии.

Das et al. (2019a) обнаружили когерентную радиоэмиссию у Вр-звезды HD 142990. При наблюдениях на индийском радиотелескопе GMRT на частоте около 1420 МГц вблизи фазы «ноль» продольного магнитного поля зарегистрировано электронно-циклотронное мазерное излучение (Electron Cyclotron Maser Emission (ECME)). Ранее были известны три звезды с радиоэмиссией: CU Vir, HD 133880, HD 142301. Изучаемая звезда HD 142990 — четвертая.

Эта же звезда HD 142990 исследовалась в работе Shultz et al. (2019b) по данным фотометрии и магнитометрии. Проанализирован материал, полученный за 40 лет наблюдений. Найдено ускорение вращения: последние 30 лет его период сокращался со скоростью примерно 0.6 секунд в год. Подобное поведение до настоящего времени было известно только у двух звезд: CU Vir и HD 37776. Результаты свидетельствуют об иррегулярной или циклической эволюции вращения.

В работе Das et al. (2019b) найдена пятая Вр-звезда HD 35298 с очень узконаправленной радиоэмиссией. Звезда наблюдалась на GMRT в двух полосах частот: 550–750 МГц и 1060–1460 МГц. В одной из полос зарегистрирована последовательность прихода лево- и правополяризованных

импульсов. Определено, в какой полусфере звезды возникает радиоэмиссия: это области с нулем продольного компонента поля. Этот объект — наиболее медленно вращающийся ротатор и наиболее удаленная звезда ГП, у которой такая эмиссия наблюдалась.

В нашей Галактике примерно 7% ОВА-звезд обладают магнитными полями. Поиск и изучение магнитных звезд в других галактиках представляют большой интерес. Однако можно обнаружить только очень сильные поляризованные особенности линий в спектрах ярчайших звезд, возникающие в полях большой величины. Bagnulo et al. (2020) предприняли попытку найти очень сильные магнитные поля среди массивных звезд в Магеллановых Облаках. Для этой цели на FORS2 VLT они выполнили спектрополяриметрию 41 звезды спектральных классов В, О, Of/WN, WNh и классических звезд WR в Большом и Малом Магеллановых Облаках. Четыре объекта из них оказались Of?p-звездами, одна из них была недавно открыта. Все спектры были проанализированы на предмет поиска магнитного поля. Формально поле не было найдено ни у одного из исследованных объектов, хотя у Of?p-звезды SMC 159-2 можно заподозрить поле величиной 2.4–4.4 кГс.

В работе Mikulášek et al. (2019b) обсуждаются новые данные, полученные на спутнике TESS для знаменитой звезды с очень сильным и сложным магнитным полем — HD 37776. Кривая блеска имеет очень сложную форму, которую трудно воспроизвести при помощи стандартных моделей с химическими и фотометрическими пятнами и модулирующей блеска вследствие вращения.

Romanuk et al. (2019a) представили результаты наблюдений десяти химически пекулярных звезд в ассоциации Орион OB1 (a): HD 33917, HD 34859, HD 35008, HD 35039, HD 35177, HD 35575, HD 35730, HD 36549, HD 38912 и HD 294046. Наблюдения выполнены на 6-м телескопе CAO РАН. Магнитное поле было найдено у четырех звезд, а для шести оно оказалось ниже предела обнаружения.

В работе Romanuk et al. (2019b) проведено исследование магнитных полей и других характеристик CP-звезд в подгруппе (a) ассоциации в Орионе. Новые данные о параллаксах, полученные в ходе миссии GAIA, показали, что подгруппа (a) находится примерно на 1/3 дальше, чем это следует из параллаксов, определенных со спутником HIPPARCOS. Авторы показали, что в подгруппе имеется пятнадцать потенциально магнитных Ар- и Вр-звезд и шесть немагнитных Am-звезд, которые являются объектами переднего плана и только проецируются на ассоциацию. У семи звезд из пятнадцати найдены магнитные поля, а у остальных восьми они ниже предела обнаружения.

Semenko et al. (2019) провели детальное спектральное изучение химически пекулярных звезд подгруппы (а) ассоциации в Орионе. Среди одиннадцати звезд, которые были классифицированы как пекулярные, отобрано несколько хороших кандидатов в двойные звезды для дальнейших исследований.

В работе Hubrig et al. (2019a) предполагается, что период вращения пекулярной звезды HD 101065 составляет 188 лет. Вывод сделан при анализе наблюдений продольного поля с поляриметром HARPS на 3.6-м телескопе ESO (La Silla). Отметим, что период вращения звезды действительно большой, но данных для определения точной его величины явно недостаточно.

Scholz et al. (2019) изучили параллаксы магнитных Ap-звезд на основании данных миссии GAIA DR2. Представлен каталог, включающий 83 ранее известных и 154 новых химически пекулярных звезды с сильными полями и содержащий данные о расстояниях, двойственности, членстве в скоплениях, амплитуде переменности и др. В выборку звезд с параллаксами более 2 мсд входит 47 ранее известных и 46 новых Ap-звезд. Различные свойства выборки детально рассмотрены.

В работе Hubrig et al. (2020) найдено очень медленное вращение магнитной звезды спектрального класса O9.7 HD 54879. Наблюдения выполнены на FORS2 VLT. В 2014 г. было зарегистрировано поле 2 кГс на полюсе диполя. Наблюдения 2017–2018 гг. показали уменьшение величины поля до 100–300 Гс. Новые наблюдения 2018/2019 гг. показали дальнейшее его ослабление до величины 100–150 Гс. Авторы объясняют результат очень медленным вращением звезды с периодом не менее пяти лет.

Glagolevskij (2019), используя литературные данные, нашел поверхностные магнитные поля для 177 химически пекулярных звезд. Составлен каталог.

В работе Shultz et al. (2019d) представлены результаты наблюдений в рамках двух больших проектов исследования магнетизма массивных звезд MIMES и BINAMICS. В выборку вошли 56 В-звезд ранних типов. Сравнение с магнитными А- и О-звездами показывает, что величина магнитного поля не меняется с массой, но магнитный поток растет с (из-за увеличения радиуса). И магнитное поле на полюсе диполя, и полный магнитный поток уменьшаются с возрастом звезд. Получены доказательства, что мультиполярные поля затухают быстрее дипольных. Период вращения растет с возрастом, как и предполагается в сценарии магнитного затухания. Все без исключения звезды с эмиссией в H $\alpha$  являются быстрыми ротаторами, имеют сильные поля и являются молодыми. Этот результат находится в согласии с тем фактом, что

магнитное поле и скорость вращения падают в течение жизни звезды.

HD 62658 — магнитная Вр-звезда в затменной системе — рассмотрена в работе Shultz et al. (2019c). Второй компонент системы является идентичной нормальной В-звездой. Анализ фотометрии показал наличие периода 4.75 суток в затмениях. Химические пятна на поверхности звезды могут вести к модуляции с тем же периодом при вращении. Наблюдения на спектрополяриметре ESPADONS с высоким разрешением показали наличие четких зеемановских особенностей в спектре первичного компонента и отсутствие каких-либо признаков поля у вторичного. В результате моделирования было найдено, что оба компонента имеют примерно одинаковые массы около 3  $M_{\odot}$ . Продольное поле первичного компонента меняется от +100 до –250 Гс, что предполагает величину поля на полюсе диполя 850 Гс. Реликтовый механизм образования поля не объясняет факт существования такой системы.

Kholtygin et al. (2019a) обсуждают различные аспекты проявления магнитного поля в массивных OB-звездах: рентгеновское излучение, звездный ветер, быструю переменность профилей линий. Рассматривается также наличие компактных областей с сильным полем.

#### 4.2. Магнитные пульсирующие и HAEVE-звезды

Кроме классических Ap/Vр-звезд магнитные поля глобальной структуры наблюдаются также у некоторых других типов массивных звезд.

В статье González et al. (2019) исследуется HD 96446 — магнитная звезда спектрального класса В2р, у которой ранее были обнаружены пульсации типа  $\beta$  Сер. В работе выполнены детальные спектральные исследования на нескольких телескопах. Анализ лучевых скоростей показал, что HD 96446 является спектрально-двойной с периодом 799 суток. Вклад спутника (звезды A0) в общий блеск около 5%. Проанализированы пульсации лучевых скоростей. Период вращения главного компонента, 23.4 суток, найден по переменности интенсивностей линий. Содержание элементов распределено неравномерно: гелий концентрируется вокруг отрицательного полюса, а большинство металлов — на более низких широтах.

Hubrig et al. (2019b) представляют обзор результатов измерений магнитных полей звезд Ae/Ве Хербига. Показано, что магнитное поле найдено у 7% таких объектов. Их число за последние 20 лет выросло до 20, но реконструкция геометрии магнитного поля выполнена только для двух звезд.



Магнитные поля этих объектов примерно на порядок слабее, чем у Ap/Vp-звезд.

В работе Järvinen et al. (2019b) проведено исследование уникальной SB2-системы HD 104237, состоящей из Ae-звезды Хербига (главный компонент) и звезды типа  $\tau$  Тельца (вторичный компонент). Наблюдения показали, что обе они имеют магнитное поле: главный компонент — более слабое, от 47 Гс до 72 Гс (продольное поле), звезда  $\tau$  Тельца — более сильное, до 600 Гс. Найден период вращения главной звезды: 4.33 сут.

Группа коллег из Потсдама продолжает активное изучение звезд типа Ae/Be Хербига. Результаты недавней кампании по изучению магнетизма этих объектов рассматриваются в работе Järvinen et al. (2019a). Наиболее сильное продольное поле 209 Гс было найдено у Be-звезды Хербига HD 58647, самое слабое — у Ae-звезды Хербига HD 190073. Смена полярности была обнаружена у HD 58647 и у Be-звезды Хербига HD 98922. Получено еще одно доказательство того, что поля у звезд Ae/Be Хербига существенно слабее, чем у звезд типа  $\tau$  Тельца.

В работах Kholtygin et al. (2019b; c) анализируются распределения магнитных полей и магнитных потоков 23 звезд Ae/Be Хербига. Оба распределения можно описать в виде логарифм-нормального закона. Они практически такие же, как и для пекулярных звезд главной последовательности, но магнитные поля слабее более чем на порядок.

В работе Zwintz et al. (2019) обсуждаются магнитное поле и другие параметры звезд типа  $\delta$  Scuti и  $\beta$  Cas. Выполнены спектроскопия и фотометрия, проведен частотный анализ.

### 4.3. Холодные звезды

В данном разделе будут рассмотрены работы по магнетизму холодных пятнистых звезд. Поля таких объектов имеют сложную структуру.

See et al. (2019b) обсуждают очень важную тему — определение фактора заполнения для звезд со сложными полями по зееман-доплеровским магнитограммам. Известно, что звезды малых масс имеют сложные магнитные поля, формирующиеся механизмом динамо. Для их характеристики используются два метода анализа. Зееман-доплеровское картирование (ZDI) позволяет определять геометрию крупномасштабного поля, в то время как зеемановское уширение линий ассоциируется с мелкомасштабной структурой, например, с пятнами. Проведено сравнение среднего магнитного потока, оцененного обоими методами. Показано, что ZDI отображает большую часть магнитного потока для активных звезд, т.е. доля

звездной поверхности, покрытая магнитными полями, картируется только при помощи ZDI.

Поскольку у замагниченных звезд малой массы имеется звездный ветер, то должна наблюдаться потеря момента вращения. Большое значение в этом процессе имеет конфигурация магнитного поля. В работе See et al. (2019a) исследуется, каким образом недипольное поле может повлиять на потерю момента вращения. Авторы приходят к выводу, что в ряде случаев недипольность поля необходимо учитывать. Но в целом доминирует дипольная компонента.

Cotton et al. (2019) изучили вращательную модуляцию поляризации активной звезды  $\chi$  Boo A (HD 131156A). Выполнены широкополосная линейная и циркулярная спектрофотометрии. Обнаружена модуляция обоих сигналов с периодом 6.43 суток, который является периодом вращения звезды. Широкополосная линейная поляризация возникает из-за дифференциального насыщения спектральных линий в эффекте Зеемана. Кривая имеет сложную форму. Результат может быть использован для поиска горячих юпитеров вокруг активных звезд.

В работе López Ariste et al. (2019) представлены результаты исследования  $\chi$  Cyg — звезды типа Миры Кита. В спектральных атомных и молекулярных линиях найдена линейная поляризация. Приведено объяснение в рамках гипотезы расширяющейся оболочки. Найдено, что поляризация — внутренняя. Неожиданно обнаружилось, что на протяжении пульсаций скорости радиальные, но не однородные по диску.

Kochukhov and Shulyak (2019) исследовали магнитное поле затменного M-карлика YY Gem. Это короткопериодический очень активный M-карлик, входящий в затменную двойную систему. Оба компонента почти идентичны. До недавних пор не было магнитных измерений в системе. Авторы представляют здесь ее магнитные характеристики. Они провели реконструкцию магнитных полей, используя ZDI. Анализ показывает наличие умеренно сложных магнитных полей с типичной величиной 200–300 Гс с противоположно направленными компонентами диполя. Величина поля на поверхности может достигать 3.2–3.4 кГс для обоих компонентов. Результаты картирования исключают альтернативный набор теоретических моделей, в которых делаются попытки объяснить чрезмерное увеличение радиуса большим фактором запятненности.

Пятенная активность поздней звезды типа FK Com HD 199178 исследуется в работе Nackman et al. (2019). Авторы представляют уникальную серию из 41 температурной карты звезды, охватывающую более 23 лет наблюдений.

Все изображения показывают наличие большого холодного пятна с центром возле видимого полюса вращения. На более низких широтах обнаружены и другие холодные образования, однако их существование под вопросом. Большое холодное пятно доминирует во все годы наблюдений с 1994 по 2017 гг. Размер и положение пятна эволюционируют со временем с некоторым ускорением в последние годы. Отсутствие особенностей на низких широтах может свидетельствовать о дифференциальном вращении.

В исследовании Cole-Kodikara et al. (2019) обсуждается эволюция пятен на звезде LQ Нуа в период 2006–2017 гг. Эта звезда — молодой аналог Солнца. В некоторых работах отмечалось, что в период 2003–2009 гг. у нее была заметна миграция пятен. Авторы наблюдали звезду более 25 лет. Для анализа данных был использован метод ZDI и построены температурные карты. Согласно результатам исследования, температура звезды медленно, но систематически увеличивается. Это согласуется с ростом амплитуды фотометрической переменности. На протяжении всех сезонов наблюдений четко видно асимметричное высокоширотное пятно. Имеется небольшая особенность и на экваторе, но причиной переменности является высокоширотное пятно.

Lavail et al. (2019) исследовали характеристики магнитных полей звезд типа  $\tau$  Тельца по спектрам высокого разрешения в ИК-диапазоне. Некоторые из звезд уже ранее были известны как магнитные. Было решено провести реконструкцию магнитного поля методом ZDI, основываясь на моделировании линий в полосе  $K$  в ближней инфракрасной области. Выполнены измерения для всех звезд выборки. Сравнение с полями, полученными по измерениям  $V$ -параметра Стокса, показало, что ZDI дает различную полей: от 25–42% для относительно простых полоидальных осесимметричных полей, до 2–11% для более сложных полей.

Магнитные поля молодых звезд солнечного типа исследовались в работе Kochukhov et al. (2020). Существуют два метода оценки величины поля: построение карт методом ZDI и измерение магнитного уширения линий. Поскольку из-за взаимного уничтожения продольных полей разной полярности в итоговом спектре проявится только небольшая их доля, метод ZDI будет не очень эффективным. Но на уширение линий этот эффект взаимной компенсации полей разного знака не влияет. Авторы исследовали пятнадцать солнечноподобных звезд, включая хорошо изученные ранее. Они нашли, что среднее магнитное поле падает от 1.3–2.0 кГс для звезд моложе 120 млн лет до 0.2–0.8 кГс для более старых звезд. Средняя величина поля имеет четкую корреляцию с числом Россби и с корональной и

хромосферой активностью. Результаты свидетельствуют о том, что в магнитных областях поля имеют примерно одинаковую величину  $B = 3.2$  кГс для всех звезд, но фактор заполнения систематически растет с увеличением активности.

Звездные пятна являются очень важными проявлениями звездной магнитной активности. Изучая свойства пятен в молодых аналогах Солнца, можно получить информацию об их магнитных циклах и о работе механизма динамо. Для изучения корреляции между фотометрическими вариациями блеска, запятненностью и средней температурой на протяжении 25 лет проводился комплексный мониторинг молодого аналога Солнца — звезды V889 Herculis. Его результаты представлены в работе Willamo et al. (2019). Для определения температуры применялся метод доплеровского картирования. Согласно полученным доплеровским картам, у звезды имеется полярное пятно переменной яркости. Эта структура находится недалеко от полюса вращения. Было установлено, что температура пятна постепенно уменьшалась и вышла на минимум в 2017 г. Отсутствие корреляции между средней амплитудой и запятненностью может означать, что яркие детали на доплеровских картах реальны.

Metcalf et al. (2019) выполнили спектрополяриметрию старых солнечноподобных звезд на спектрополяриметре PEPSI LBT. Целью работы была проверка эффективности магнитного торможения. Исследовались две звезды: более активная HD 100180 и менее активная HD 143761. Как и предполагалось, у HD 100180 виден значимый сигнал циркулярной поляризации, указывающий на наличие неосесимметричного крупномасштабного поля, в то время как у второй звезды такого сигнала не видно. Авторы приходят к заключению, что изменения в магнитной морфологии возникли из-за магнитного торможения в более старой звезде, что уменьшило работу глобального динамо.

Savanov (2019) изучал активность звезд классов A–M в зависимости от эффективных температур и периодов их вращения. Единая зависимость для звезд разной температуры не получена. Показано, что активность звезд класса A выше, чем более холодных, и зависимости от вращения у них разные.

#### 4.4. Магнитные белые карлики

В этом разделе рассмотрены магнитные белые карлики и другие относящиеся к ним объекты.

Отметим целую серию работ Джона Ландстрита и Стефано Баньюло по изучению магнитных белых карликов с относительно слабыми полями.

В работе Landstreet and Bagnulo (2019b) сообщается об открытии килогауссных магнитных полей у двух близких белых карликов:

WD 1105 – 340 и WD 2150 + 591. Обе звезды ярче  $15^m$ . WD 1105 – 340 находится на расстоянии 20 пк от Солнца, WD 2150 + 591 — чуть более 25 пк. Магнитное поле в первом приближении представляет собой диполь, хотя видны признаки более сложной структуры.

Результаты исследования долговременной поляриметрической переменности давно известного белого карлика с сильнейшим магнитным полем Grw + 70°8247 представлены в работе Bagnulo and Landstreet (2019b). Этот карлик имеет магнитное поле 400 МГц. Проведено сравнение его спектрополяриметрических наблюдений в 2015 и 2018 гг. с данными, полученными в 1970-х гг. Поляризация показала переменность на интервале 40 лет. Изучая позиционные углы поляризации, авторы приходят к выводу, что белый карлик имеет период вращения 102–103 года.

Эти же авторы обнаружили новый магнитный белый карлик типа DA WD 0011 – 721 в локальном объеме 20 пк (Landstreet and Bagnulo 2019a). Звезда имеет модуль магнитного поля 343 кГц, а продольный компонент — 75 кГц. Авторы нашли, что в этом объеме  $20 \pm 5\%$  белых карликов типа DA имеют магнитные поля в основном слабее 1 МГц. В отличие от магнитных Vp-звезд, демонстрирующих затухание поля на главной последовательности, магнитные белые карлики этой выборки не показывают изменений магнитного поля или потока на временах в несколько миллиардов лет.

В работе Bagnulo and Landstreet (2019a) сообщается об обнаружении слабых магнитных полей у четырех DZ-белых карликов, находящихся в пределах объема 20 пк. В спектрах всех объектов имеются линии металлов и отсутствуют линии водорода и гелия. Сигнал поляризации в линиях Ca II H+K у WD 1009 – 184 исключительно высокий и указывает на поле 40 кГц, усредненное по всей поверхности звезды. Авторы считают, что по крайней мере 40% от всех DZ-карликов в объеме 20 пк являются магнитными. По их мнению, проведенные в последнее время высокоточные наблюдения карликов согласуются с идеей, что магнитные поля встречаются чаще у старых белых карликов, чем у молодых.

Еще одним открытием этих авторов является подобная Сириусу двойная система с белым карликом. Невзаимодействующие системы, содержащие белый карлик и звезду ГП, чрезвычайно редки, если вообще возможны. Landstreet and Bagnulo (2020) обнаружили систему, состоящую из звезды GO главной последовательности и массивного (порядка  $1.1 M_{\odot}$ ) белого карлика с сильнейшим (сотни МГц) магнитным полем. Это звезда WDS J03038+0608B с амплитудой циркулярной поляризации до 5% в континууме. Переменность на

шкале времени порядка 1 суток отсутствует. Линейная поляризация в синей области оптического спектра очень слаба либо отсутствует, а в красной его части достигает 2%. Авторы считают, что такие системы не могут быть предшественниками магнитных катаклизмических переменных.

Antonyuk et al. (2019) представили длинные ряды фотометрических наблюдений двух магнитных белых карликов: WD 2047+372 и WD 0009+501. У WD 2047+372 обнаружены нерегулярные изменения блеска на временах от часов до нескольких суток. У второго карлика такая переменность не обнаружена. Сделан вывод о фотометрической переменности магнитных белых карликов, находящихся в температурной конвективной зоне. Отмечается также стабильность переменности на длительных промежутках времени (годы и десятилетия).

Kolbin et al. (2019a) провели анализ оптической циклотронной эмиссии полярара CRTS CSS081231 J071126+440405. Определена напряженность магнитного поля на обоих магнитных полюсах белого карлика  $B_1 = 38$  МГц и  $B_2 = 51$  МГц. Аккреция вещества происходит в областях, близких к магнитному полюсу.

В работе Gabdeev et al. (2019) представлены результаты фотометрических и спектральных наблюдений полярара 1RXS J152506.9 – 032647, проведенных на БТА и 1-м телескопах САО РАН и на 1.5-м телескопе в Турции. Показано, что аккреция происходит на оба магнитных полюса белого карлика. Определены параметры системы.

Kolbin et al. (2019b) выполнили анализ спектра звезды V837 Tau, принадлежащей к классу хромосферно-активных звезд типа RS CVn. Методом моделирования спектров определены фундаментальные параметры компонентов системы и химический состав более яркого компонента. При помощи метода доплеровского картирования восстановлено распределение пятен на ярком компоненте. Показано, что они концентрируются на средних широтах (около  $40^\circ$ ).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено более 90 важнейших работ, выполненных в области изучения магнитных звезд разных типов. Они охватывают широкий круг экспериментальных и теоретических исследований и включают также результаты моделирования. Статьи были опубликованы в следующих изданиях:

- MNRAS — 25;
- Astronomy and Astrophysics — 17;
- Astrophysical Bulletin — 17;
- ASP Conf. Series Vol.518 — 13;

- Astrophysical Journal — 6;
- 14 работ в других изданиях.

В 2019 г. было опубликовано сравнительно мало работ по новым разработкам инструментальной базы. В обзорах предыдущих лет этому вопросу было уделено большое внимание.

Был выделен ряд статей, посвященных методике наблюдений и анализа данных. Существенно увеличено число линий с известными переходами, а в базе атомных данных VALD появились возможности для учета сверхтонкого расщепления линий.

В области изучения магнитных химически пекулярных звезд было выполнено много работ с использованием высокоточной фотометрии спутника TESS, определены фундаментальные параметры многих десятков CP-звезд. Проведены измерения магнитных полей более 200 объектов, обнаружены десятки новых магнитных звезд. Завершены наблюдения магнитных звезд в ассоциации Орион OB1, измерены все спектры звезд подгруппы (а) ассоциации. Обнаружены новые сверхмедленные ротаторы. Ряд магнитных Ар-звезд показал пульсации типа  $\delta$  Scuti.

Предложен способ поиска магнитных звезд на основании обзора SDSS — поиски расщепленных зеемановских компонент в ИК-области на длине волны около 15 мкм в случае звезд с очень сильными полями. Обнаружена узконаправленная радиоэмиссия у двух горячих Вр-звезд. Попытка найти магнитные O-звезды в Магеллановых Облаках пока не привела к успеху. Выполнена серия работ по поиску магнитных полей и картированию звезд типа Ae/Be Херbiga.

Количество измерений магнитных полей холодных звезд было существенно меньшим, чем ранее. Больше внимание уделено температурному и магнитному картированию их поверхностей.

Отметим серию работ Ландстрита и Баньюло по исследованиям магнитных белых карликов. Найденно, что один из карликов с сильным полем имеет период вращения около 100 лет.

Таким образом, можно сделать вывод, что исследования звездного магнетизма продолжают на широком фронте, получены новые важные результаты.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Автор благодарит Российский фонд фундаментальных исследований за частичную финансовую поддержку работы (гранты РФФИ 18-29-21030 и 20-02-00233).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. A. Antonyuk, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (2), 172 (2019).
2. E. Aronson and N. Piskunov, *Astron. and Astrophys.* **630**, A122 (2019).
3. H. W. Babcock, *Physical Review* **72** (1), 83 (1947a).
4. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **105**, 105 (1947b).
5. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **630**, A65 (2019a).
6. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (4), 4655 (2019b).
7. S. Bagnulo, G. A. Wade, Y. Nazé, et al., *Astron. and Astrophys.* **635**, A163 (2020).
8. L. A. Balona, G. Handler, S. Chowdhury, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (3), 3457 (2019).
9. J. Barron, G. A. Wade, D. M. Bowman, et al., arXiv e-prints arXiv:2001.04534 (2020).
10. A. Blazère, P. Petit, C. Neiner, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **492** (4), 5794 (2020).
11. S. D. Chojnowski, S. Hubrig, S. Hasselquist, et al., *Astrophys. J.* **873** (1), L5 (2019).
12. E. M. Cole-Kodikara, M. J. Käpylä, J. J. Lehtinen, et al., *Astron. and Astrophys.* **629**, A120 (2019).
13. D. V. Cotton, D. Evensberget, S. C. Marsden, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (2), 1574 (2019).
14. M. S. Cunha, V. Antoci, D. L. Holdsworth, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (3), 3523 (2019).
15. B. Das, P. Chandra, M. E. Shultz, and G. A. Wade, *Astrophys. J.* **877** (2), 123 (2019a).
16. B. Das, P. Chandra, M. E. Shultz, and G. A. Wade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **489** (1), L102 (2019b).
17. A. David-Uraz, C. Erba, V. Petit, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (2), 2814 (2019a).
18. A. David-Uraz, C. Neiner, J. Sikora, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (1), 304 (2019b).
19. R. S. de Jong, O. Agertz, A. A. Berbel, et al., *Messenger* **175**, 3 (2019).
20. M. M. Gabdeev, V. V. Shimansky, N. V. Borisov, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (3), 308 (2019).
21. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 66 (2019).
22. J. F. González, M. Briquet, N. Przybilla, et al., *Astron. and Astrophys.* **626**, A94 (2019).
23. T. Hackman, I. Ilyin, J. J. Lehtinen, et al., *Astron. and Astrophys.* **625**, A79 (2019).
24. S. Hubrig, V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 27 (2019a).
25. S. Hubrig, S. P. Järvinen, M. Schöller, and C. A. Hummel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **491** (1), 281 (2020).

26. S. Hubrig, S. P. Järvinen, M. Schöller, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 18 (2019b).
27. S. Hubrig, M. Küker, S. P. Järvinen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (4), 4495 (2019c).
28. S. P. Järvinen, T. A. Carroll, S. Hubrig, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **489** (1), 886 (2019a).
29. S. P. Järvinen, T. A. Carroll, S. Hubrig, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (4), 5499 (2019b).
30. A. Kholtygin, S. Hubrig, S. Fabrika, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 40 (2019a).
31. A. F. Kholtygin, A. S. Akhnevsky, and O. Tsiopa, *ASP Conf. Ser.* **518**, 83 (2019b).
32. A. F. Kholtygin, O. A. Tsiopa, E. I. Makarenko, and I. M. Tumanova, *Astrophysical Bulletin* **74** (3), 293 (2019c).
33. A. Y. Kniazev, I. A. Usenko, V. V. Kovtyukh, and L. N. Berdnikov, *Astrophysical Bulletin* **74** (2), 208 (2019).
34. O. Kochukhov, T. Hackman, J. J. Lehtinen, and A. Wehrhahn, *Astron. and Astrophys.* **635**, A142 (2020).
35. O. Kochukhov and D. Shulyak, *Astrophys. J.* **873** (1), 69 (2019).
36. A. I. Kolbin, N. A. Serebryakova, M. M. Gabdeev, and N. V. Borisov, *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 80 (2019a).
37. A. I. Kolbin, V. V. Shimansky, I. Y. Alekseev, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 451 (2019b).
38. J. Krtićka, Z. Mikulášek, G. W. Henry, et al., *Astron. and Astrophys.* **625**, A34 (2019).
39. E. Kukushkin, V. D. Bychkov, D. A. Sazonenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (3), 316 (2019).
40. J. D. Landstreet and S. Bagnulo, *Astron. and Astrophys.* **628**, A1 (2019a).
41. J. D. Landstreet and S. Bagnulo, *Astron. and Astrophys.* **623**, A46 (2019b).
42. J. D. Landstreet and S. Bagnulo, *Astron. and Astrophys.* **634**, L10 (2020).
43. A. Lavail, O. Kochukhov, and G. A. J. Hussain, *Astron. and Astrophys.* **630**, A99 (2019).
44. A. López Ariste, B. Tessore, E. S. Carlin, et al., *Astron. and Astrophys.* **632**, A30 (2019).
45. G. Mathys, arXiv e-prints arXiv:1912.06107 (2019).
46. G. Mathys, D. W. Kurtz, and D. L. Holdsworth, arXiv e-prints arXiv:2003.14144 (2020).
47. G. Mathys, I. I. Romanyuk, S. Hubrig, et al., *Astron. and Astrophys.* **629**, A39 (2019a).
48. G. Mathys, I. I. Romanyuk, S. Hubrig, et al., *Astron. and Astrophys.* **624**, A32 (2019b).
49. T. S. Metcalfe, O. Kochukhov, I. V. Ilyin, et al., *Astrophys. J.* **887** (2), L38 (2019).
50. Z. Mikulášek, J. Krtićka, G. W. Henry, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 125 (2019a).
51. Z. Mikulášek, J. Krtićka, M. E. Shultz, et al., arXiv e-prints arXiv:1912.04121 (2019b).
52. Z. Mikulášek, E. Paunzen, S. Hümmelich, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, p. 117 (2019c).
53. A. V. Moiseeva, I. I. Romanyuk, and E. A. Semenko, *ASP Conf. Ser.* **518**, 52 (2019a).
54. A. V. Moiseeva, I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 62 (2019b).
55. A. V. Moiseeva, I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, et al., *VizieR Online Data Catalog (other)* **0330**, J/other/AstBu/74 (2019c).
56. M. A. Nalivkin, I. S. Savanov, S. A. Naroenkov, and V. E. Shmagin, *INASAN Science Reports* **3**, 72 (2019).
57. H. Pablo, M. Shultz, J. Fuller, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (1), 64 (2019).
58. Y. V. Pakhomov, T. A. Ryabchikova, and N. E. Piskunov, *Astronomy Reports* **63** (12), 1010 (2019).
59. E. Paunzen, G. Handler, P. Walczak, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (3), 4247 (2019).
60. V. Petit, G. A. Wade, F. R. N. Schneider, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **489** (4), 5669 (2019).
61. A. Romanovskaya, T. Ryabchikova, and D. Shulyak, *ASP Conf. Ser.* **518**, 173 (2019a).
62. A. Romanovskaya, T. Ryabchikova, D. Shulyak, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (2), 2343 (2019b).
63. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **70** (2), 191 (2015).
64. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **71** (3), 314 (2016).
65. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 286 (2017).
66. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 437 (2018).
67. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 437 (2019).
68. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 55 (2019a).
69. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 3 (2019b).
70. S. M. Rucinski, A. Pigulski, R. Kuschnig, et al., *Astron. J.* **158** (4), 148 (2019).
71. T. Ryabchikova, N. Piskunov, and T. Sitnova, *Solar Physics* **294** (11), 156 (2019).
72. I. S. Savanov, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 431 (2019).
73. D. A. Sazonenko, D. E. Kukushkin, A. O. Voznesenskaya, and A. V. Bakholdin, *Astrophysical Bulletin* **74** (3), 324 (2019).
74. R. D. Scholz, S. D. Chojnowski, and S. Hubrig, *Astron. and Astrophys.* **628**, A81 (2019).
75. V. See, S. P. Matt, A. J. Finley, et al., *Astrophys. J.* **886** (2), 120 (2019a).
76. V. See, S. P. Matt, C. P. Folsom, et al., *Astrophys. J.* **876** (2), 118 (2019b).
77. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 31 (2019).
78. M. Shultz, J. B. Le Bouquin, T. Rivinius, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (3), 3950 (2019a).
79. M. Shultz, T. Rivinius, B. Das, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (4), 5558 (2019b).
80. M. E. Shultz, C. Johnston, J. Labadie-Bartz, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **490** (3), 4154 (2019c).
81. M. E. Shultz, G. A. Wade, T. Rivinius, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **490** (1), 274 (2019d).

82. M. E. Shultz, G. A. Wade, T. Rivinius, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (2), 1508 (2019e).
83. J. Sikora, A. David-Uraz, S. Chowdhury, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (4), 4695 (2019a).
84. J. Sikora, G. A. Wade, J. Power, and C. Neiner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (3), 3127 (2019b).
85. M. Skarka, P. Kabáth, E. Paunzen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (3), 4230 (2019).
86. V. Tsybal, T. Ryabchikova, and T. Sitnova, *ASP Conf. Ser.* **518**, pp. 247–252 (2019).
87. G. G. Valyavin, F. A. Musaev, A. V. Perkov, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (2), 191 (2020).
88. G. G. Valyavin, F. A. Musaev, A. V. Perkov, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 242 (2019).
89. G. A. Wade, S. Bagnulo, Z. Keszthelyi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **492** (1), L1 (2020).
90. T. Willamo, T. Hackman, J. J. Lehtinen, et al., *Astron. and Astrophys.* **622**, A170 (2019).
91. M. Zejda, E. Paunzen, and Z. Mikulášek, *IAU Symp.* **339**, pp. 349–352 (2019).
92. K. Zwintz, C. Neiner, O. Kochukhov, and T. Ryabchikova, *ASP Conf. Ser.* **518**, 59 (2019).

## Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars. VI. Main Results of 2019 and Near-Future Prospects

I. I. Romanyuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The paper provides a review of important results of studies of chemically peculiar and related magnetic stars. More than 90 papers published in the world leading astronomical journals mainly in 2019 were analyzed. The most important results: high-accuracy photometric light curves were obtained during the TESS satellite; we discovered several dozen of new chemically peculiar magnetic stars; it was shown that large magnetic spots on cool stars exist for tens of years practically unchanged; we found several new magnetic white dwarfs with very weak fields; a strong magnetic white dwarf with a rotation period of about 100 years was discovered. New data have been obtained to better understand the mechanisms of formation and evolution of magnetic stars.

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