

УДК 524.35-337; 524.316.2-337; 524.31.084-337

# МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ И РОДСТВЕННЫХ ИМ ЗВЕЗД. VIII. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2021 ГОДА И АНАЛИЗ БЛИЖАЙШИХ ПЕРСПЕКТИВ

© 2022 И. И. Романюк<sup>1\*</sup>

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

Поступила в редакцию 4 июня 2022 года; после доработки 20 июля 2022 года; принята к публикации 2 августа 2022 года

Приводится обзор работ, выполненных в области исследований звездного магнетизма и опубликованных в 2021 году. Рассматриваются инструменты, методы наблюдений и анализа данных, результаты фотометрии, спектроскопии и спектрополяриметрии. Представлены новые данные о магнитных полях химически пекулярных звезд и других объектов различных типов.

Ключевые слова: *звезды: магнитные поля — звезды: химически пекулярные — звезды: солнечного типа — звезды: белые карлики*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящей работой продолжается серия ежегодных обзоров, начиная с работы Романюк (2015) по Романюк (2021b), в которых публикуются результаты исследований магнитных полей химически пекулярных (CP) и родственных им звезд. Представляемая статья посвящена описанию результатов, опубликованных в ведущих рецензируемых астрономических журналах в 2021 году. В предыдущих обзорах дополнительно анализировались публикации конференций, но в 2021 году из-за пандемии коронавируса была проведена только одна онлайн-конференция в Санкт-Петербурге: «OBA Stars: Variability and Magnetic Fields»<sup>1</sup>. Некоторые доклады из этой конференции упомянуты в данном обзоре.

В работе сохраняется традиционный для наших обзоров порядок разделов, в которых приводится описание инструментов, методов анализа и программ, химически пекулярных звезд и их обнаружение, магнитного поля, химического состава и фотометрии, магнитных белых карликов, активных холодных звезд и других объектов.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

### 2.1. Новые телескопы и навесное оборудование

В 2021 году было опубликовано небольшое число статей, посвященных новым телескопам и спектрографам.

В работе Muslimov et al. (2020) описываются требования к разрабатываемому спектрополяриметру для телескопа POLLUX LUVOIR<sup>2</sup>. Спектрограф должен работать в области спектра 90–400 нм с разрешением  $R = 120\,000$ . Рассмотрены требования для изготовления высокоточного прибора. Были выбраны три главных критерия, относящиеся к спектральному разрешению, стабильности калибровки и эффективности эшелле-решетки.

В другой статье Muslimov et al. (2021) обсуждается адаптивная система PAPHYRUS, которая будет установлена в фокусе куде 1.52-м телескопа Haute-Provence Observatory. Кроме научных целей установка будет служить для обучения студентов.

Komarov et al. (2020) описывают 1-м телескоп Zeiss-1000 CAO РАН: историю его создания, развитие методов наблюдений и потенциальные области астрофизических исследований. Детально описываются приборы, используемые в наблюдениях на нем, и методы обработки данных.

В работе Pirola et al. (2020) описывается поляриметр DIPol-UF, который работает в трех фильтрах:  $B$ ,  $V$  и  $R$ . Ожидается высокая точность

\*E-mail: roman@sao.ru

<sup>1</sup>WEB-страница конференции OBA Stars: Variability and Magnetic Fields (STARS-2021): <https://events.spbu.ru/events/stars-2021?lang=Eng>

<sup>2</sup>WEB-страница спектрографа LUVOIR: <https://www.luvointelescope.org/>

измерений поляризации — до  $10^{-5}$ . В качестве детектора используется ПЗС-камера с высокой скоростью считывания.

## 2.2. Методы обработки и анализа данных

Используя широкополосную циркулярную поляриметрию, Berdyugin et al. (2022) предлагают высокочувствительный метод поиска магнитного поля белых карликов в широких спектральных полосах. На последних стадиях эволюции белых карликов спектральные линии формируются уже не в доминирующей водородной или гелиевой атмосфере, а в континууме. Цель этого исследования — выяснить дальнейшую эволюцию магнитного поля белых карликов после их возникновения: продолжается ли его омический распад или генерация. Проведены наблюдения на поляриметре DIPol-UF для нахождения корреляции между величиной поля, определенной по результатам спектрополяриметрии и широкополосной поляризации белых карликов. Были найдены два магнитных белых карлика класса DC. Обсуждаются характеристики поляриметра и возможные точности измерений магнитного поля.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОСКОПИИ И ФОТОМЕТРИИ CP-ЗВЕЗД

### 3.1. Спектроскопия CP-звезд

В 2021–2022 годах вышла большая серия публикаций (Monier 2021a; b; c; d; e; f; g), посвященных анализу химического содержания ряда элементов для CP-звезды 21 Com и серия статей (Monier 2022a; b; c; d; e, Monier and Mary 2022) об исследованиях химического содержания ряда элементов, о поиске переменности спектральных линий в UV-диапазоне и об уточнении периода вращения для CP-звезды 78 Vir по спектрам, полученным с помощью спутника IUE<sup>3</sup>.

Kholytgin et al. (2021a; b; c; d) в последние годы изучают быструю переменность профилей спектральных линий горячих звезд. Изучены вариации профилей в спектре двойной звезды  $\zeta$  Ori A и B[e]-звезды  $\gamma$  Cas. Наблюдения этих объектов были выполнены на различных инструментах. Проведено сравнение с кривыми блеска, полученными спутником TESS.

Catanzaro et al. (2020) выполнили детальное спектроскопическое изучение SBI-системы HD 161660. Спектроскопические наблюдения были проведены в Catania Astrophysical Observatory.

<sup>3</sup>Подробное описание миссии спутника IUE: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/IUE\\_overview](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/IUE_overview)

Комбинируя новые данные с информацией из архивов, авторы определили различные параметры звезды, в том числе эффективную температуру  $T_{\text{eff}}$ , ускорение силы тяжести  $\lg g$ , проекцию скорости вращения  $v_e \sin i$  и химический состав. Обнаружен недостаток гелия, углерода, серы и хрома, получено сверхобилие неона, фосфора, аргона, марганца, ксенона и ртути. Все другие элементы имеют солнечное содержание. Обнаружены явные признаки стратификации химических элементов.

В работе Romanovskaya et al. (2021) определены фундаментальные параметры трех Ar-звезд: GO And (HD 4778),  $\kappa$  Psc (HD 220825) и 84 UMa (HD 120198) спектроскопическими методами. Для всех звезд были получены типичные для Ar-звезд аномалии химического состава. Не найдена существенная стратификация хрома и железа. Сравнение с данными интерферометрии показывает хорошее согласие результатов.

Alecian and Stift (2021) представили теоретические расчеты атомной диффузии для кальция, хрома и железа в атмосфере магнитной звезды с включением анизотропного ветра, и для трех различных моделей скорости потери массы (или ветра) построены трехмерные описания всей атмосферы звезды. В двух из этих моделей скорость потери массы изменяется в зависимости от наклона оси магнитного поля, при этом предполагаемая геометрия поля является неосесимметричной. Если преобладает дипольный компонент поля, преобладают кольцеобразные структуры. Пятнистое распределение также может существовать в соответствии с геометрией поля. Распределение элементов очень чувствительно к модели потери массы. Параметры теоретической модели сравниваются с наблюдательной моделью реальной CP-звезды  $\theta$  Aurigae.

### 3.2. Фотометрия CP-звезд

В работе Mikulášek et al. (2020) рассматривается модуляция блеска из-за вращения и одиночные моды пульсаций у кремниевой Vp-звезды HD 174356. Используя фотометрические наблюдения, выполненные в ходе миссии Kepler K2, авторы нашли вариации амплитуды и формы кривой блеска указанной звезды, нехарактерные для CP-звезд. По анализу спектра подтверждено аномально большое содержание кремния; магнитное поле меньше 110 Гс. Авторы приходят к выводу, что звезда одиночная и на кривой блеска отражается переменность, возникающая из-за вращения химически неоднородной звезды и из-за  $g$ -моды пульсаций.

Oofodum et al. (2021) обсуждают результаты новых высокоскоростных фотометрических наблюдений CP-звезды HD 137949. Наблюдения выполнены на 0.5-м телескопе в South African Astronomical

Observatory (SAAO). Найдены осцилляции, проявляющиеся в трех разных периодах. Главная частота осцилляций стабильная.

Holdsworth (2021) исследовал  $\alpha$ Ar-звезды, наблюдения которых были выполнены на космическом телескопе Kepler. Ранее такие наблюдения проводились с применением наземных фотометрических методов, дополненных спектроскопией с высоким временным разрешением и некоторыми космическими наблюдениями со спутников WIRE, MOST и BRITE. На протяжении последних четырех лет миссией Kepler обнаружено по крайней мере 14 новых  $\alpha$ Ar-звезд. В статье обобщаются результаты, полученные с помощью различных спутников.

В работе Bernhard et al. (2021) представлен созданный авторами каталог переменных звезд. Используя различные критерии, авторы выделили 264 переменные звезды типа  $\alpha^2$  CVn. Около 25% этих объектов были подтверждены спектроскопически, а остальные представлены как кандидаты, нуждающиеся в дальнейшем спектроскопическом подтверждении. Большинство объектов являются звездами Главной последовательности с массами от  $1.4 M_{\odot}$  до  $5.0 M_{\odot}$ , причем половина выборки находится в интервале масс от  $2.0 M_{\odot}$  до  $2.4 M_{\odot}$  в полном согласии со спектральной классификацией.

Deal et al. (2021) рассматривают фундаментальные свойства выборки CP-звезд, полученные методом интерферометрии с применением сетки моделей атмосфер, рассчитанных программой CESTAM (Morel and Lebreton 2008). При построении сетки использовался широкий диапазон начальных содержаний гелия и металличности, чтобы избежать каких-либо искажений, связанных с исходным химическим составом. В результате были найдены фундаментальные параметры для 14 звезд с помощью метода оптимизации AIMMS. Полученные результаты согласуются в пределах  $1\sigma$  с предыдущими исследованиями, однако массы, найденные с помощью этого метода, оказались выше.

Puper and Adelman (2021) исследовали прецессию mCP-звезд по результатам наблюдений на Four College Automatic Photometric Telescope. Авторы уточнили периоды шести звезд. У некоторых звезд были обнаружены признаки прецессии, однако требуются дополнительные наблюдения для подтверждения этого факта.

В работе Holdsworth et al. (2021) анализируются результаты первого цикла наблюдений  $\alpha$ Ar-звезд со спутником TESS. Были открыты 12 новых  $\alpha$ Ar-звезд, среди которых обнаружены звезда с самым длинным и звезда с самым коротким периодами пульсаций. Наблюдения на TESS показали, что около 60% всех  $\alpha$ Ar-звезд демонстрируют мультипериодическую переменность.

Kochukhov et al. (2021a) анализируют результаты обзора TESS по поиску вращательной и пульсационной переменности HgMn-звезд. Эти звезды не обладают сильным магнитным полем, но имеют неоднородное распределение химических элементов по поверхности. На TESS выполнены двухминутные наблюдения 64 таких объектов. У 84% исследуемых звезд найдена фотометрическая переменность вследствие вращения, что указывает на наличие пятен на их поверхности. Для шести звезд периоды вращения оказались короче 1.2 суток. У нескольких HgMn-звезд найдены пульсации.

Weiss et al. (2021) представили большой обзор результатов космической фотометрии BRITE-Constellation<sup>4</sup>, который предназначен для высокоточного оптического фотометрического мониторинга ярких звезд, распределенных по всему Млечному Пути в красной и/или голубой полосах пропускания. Космическая фотометрия позволяет избежать земной атмосферной турбулентности и поглощения, что дает возможность проводить длительные и непрерывные наблюдения с высоким временным разрешением.

#### 4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗВЕЗД

##### 4.1. Крупномасштабное поле CP-звезд и звезд типа Ae/Be Херbiga

В работе Jermyn and Cantiello (2020) обсуждается происхождение бимодального распределения магнитного поля в звездах раннего типа. Авторы приходят к выводу, что имеется поле двух типов: сильное магнитное поле является реликтовым независимо от происхождения (образовалось вместе со звездой или возникло в процессе слияния), а слабое поле возникает в результате действия механизма динамо.

Romanyuk et al. (2022) опубликовали каталог в базе VizieR (Ochsenbein et al. 2000), где представлены результаты работы Romanyuk et al. (2020) по измерению и анализу магнитного поля CP-звезд, наблюдения которых проводились в 2012 году.

Romanyuk et al. (2020) приводят полные результаты измерений продольного компонента магнитного поля  $B_e$  и лучевой скорости  $V_R$  для 163 звезд, среди которых основную массу составляют CP-звезды. Наблюдения выполнены в 2012 году на 6-м телескопе БТА при помощи Основного звездного спектрографа (ОЗСП) с анализатором круговой поляризации. Обнаружены шесть новых магнитных химически пекулярных звезд: HD 84882, HD 109030, HD 170054, HD 189775,

<sup>4</sup>WEB-страница BRITE-Constellation: <https://brite-constellation.at/>

HD 341037, BD +61 2436. Всего было зарегистрировано 560 спектров циркулярно-поляризованного излучения. Получены новые данные для 120 магнитных звезд (включая пять стандартных) и 43 немагнитных (включая девять стандартных). Измерены лучевые скорости всех объектов, из них у 46 звезд — впервые. Наблюдения стандартных магнитных и немагнитных звезд подтверждают отсутствие каких-либо значимых систематических ошибок, способных внести искажения в результаты измерений магнитного поля. В статье даны комментарии результатов исследования каждой из 163 звезд. Все измерения были занесены в каталог Romanyuk et al. (2022) и опубликованы в базе VizieR (Ochsenbein et al. 2000).

Romanyuk et al. (2021a) продолжают изучать магнитное поле CP-звезд в ассоциации Орион OB1. В статье представлены результаты измерений магнитного поля химически пекулярных звезд подгруппы 1b ассоциации Орион OB1. Авторы нашли, что доля звезд с магнитным полем среди пятнадцати CP-звезд подгруппы 1b почти в два раза больше, чем в подгруппе 1a. При этом возраст подгруппы 1b оценивается в 2 млн. лет, а возраст подгруппы 1a составляет порядка 10 млн. лет. Средняя величина среднеквадратичного магнитного поля  $\langle B_c^2 \rangle^{1/2}$  в подгруппе 1b в 2.3 раза выше аналогичной величины для звезд подгруппы 1a.

В следующей работе Romanyuk et al. (2021b) приводят результаты исследования магнитного поля для последних, 1c и 1d, подгрупп ассоциации Орион OB1. В работе приведены результаты измерений магнитного поля 27 CP-звезд, для которых в период с 2013 по 2020 гг. получено и измерено более 140 пар спектров циркулярно-поляризованного излучения. Анализ результатов показал, что в подгруппе 1c 13 из 24 CP-звезд обладают магнитным полем, в подгруппе 1d магнитные CP-звезды не найдены. Авторы обнаружили, что доля магнитных звезд в подгруппе 1c, средний возраст которой оценивается примерно в 5 млн. лет, лежит посередине между долей магнитных звезд в подгруппах 1a и 1b. Эти результаты свидетельствуют о резком падении доли магнитных CP-звезд и снижении величины их среднеквадратичного магнитного поля с возрастом. Полученные выводы в целом укладываются в рамки реликтовой теории образования крупномасштабного магнитного поля Ap/Bp-звезд. Однако сам процесс формирования поля может иметь ряд особенностей, имеющих наблюдательные проявления. Наблюдаемая скорость ослабления поля с возрастом оказалась выше теоретически рассчитанной. Авторы предлагают эти результаты в качестве важного наблюдательного теста для калибровки теории

формирования и эволюции звездного магнитного поля.

Все результаты измерения магнитного поля CP-звезд в ассоциации Орион OB1 были опубликованы авторами в базе VizieR: подгруппа 1a — Romanyuk et al. (2021c); подгруппа 1b — Romanyuk et al. (2021d); подгруппы 1c и 1d — Romanyuk et al. (2021e).

Semenko et al. (2021) описывают результаты исследования на 6-м телескопе БТА уникальной магнитной звезды HD 40759. Обнаружено, что продольный компонент магнитного поля меняется от 0 до 2.5 кГс. Исследование фотометрических данных со спутником TESS показывает, что HD 40759 является затменной системой, состоящей из двух пульсирующих звезд и магнитного, возможно, пульсирующего, компонента.

В работе Järvinen et al. (2020) изучается аномальная структура атмосферы HD 166473 — CP-звезды с сильным магнитным полем. Найдено указание на зависимость между величиной магнитного поля и его ориентацией с вертикальной стратификацией элементов: оценки величины магнитного поля, полученные по линиям элементов, находящихся в разных стадиях ионизации на магнитном экваторе, примерно одинаковы. В то же время дисперсия в величинах поля резко возрастает при измерениях содержаний химических элементов, находящихся в области магнитных полюсов. В области положительного и отрицательного экстремумов величины продольного поля, измеренные по линиям редких земель, выше, чем по линиям хрома и железа.

Zwintz et al. (2020) нашли первую звезду  $\beta$  Cas типа  $\delta$  Sct с магнитным полем, сгенерированным механизмом динамо. Звезда  $\beta$  Cas имеет три пульсационные моды и достаточно сильное магнитное поле. Так как это F-звезда, то считается, что поле возникает в результате работы механизма динамо в конвективной оболочке. В работе использованы результаты фотометрических наблюдений, выполненных на трех спутниках: BRITe-Constellation, SMEI, TESS, а также спектрополяриметрические данные, полученные со спектрографом NARVAL. Также авторы оценили физические параметры и содержание химических элементов звезды.

В работе Thomson-Paressant et al. (2021) исследуется реликтовое магнитное поле звезды HD 41641. В настоящее время известны всего три магнитные звезды  $\delta$  Sct-типа. HD 41641 имеет химические неоднородности и демонстрирует переменность блеска, что делает ее хорошим кандидатом в магнитные звезды. На спектрополяриметре NARVAL были проведены наблюдения, показавшие что HD 41641 является четвертой обнаруженной магнитной звездой типа  $\delta$  Sct.

Woodcock et al. (2021) представляют результаты исследования яркой пульсирующей Вр-звезды  $\tau^9$  Eri. Авторы провели 17 спектрополяриметрических измерений на спектрополяриметре ESPaDOnS. Выполнены измерения магнитного поля и лучевой скорости. Анализ полученных данных позволяет прийти к заключению, что главный компонент системы является магнитной звездой, которая вращается с периодом 3.82 суток, а вторичный компонент является поздней А- или ранней F-звездой. Магнитное поле на полюсе диполя главного компонента достигает 1 кГс.

В статье Shultz et al. (2021a) исследуется звезда NGC 6611 601: горячая спектрально-двойная, вторичный компонент которой — горячая магнитная звезда. NGC 6611 601 — известная магнитная звезда типа Ae/Be Хербига. Состоит из двух В-звезд, орбитальный период системы 110 суток. Эмиссия в H $\alpha$  формируется в аккреционном диске, как у обычных HAeBe-звезд. Моделирование показало, что магнитное поле на полюсах диполя имеет величину от 6 до 11 кГс.

Paunzen et al. (2021) исследовали химически пекулярные звезды при помощи Solar Mass Ejection Imager. Проанализированы 165 кривых блеска различных типов CP-звезд на предмет поиска вариаций периода переменности на достаточно большом промежутке времени. Найдены точные периоды изменений блеска у 84 объектов, полученные по результатам обработки наблюдений со спутниками Kepler и TESS. Найденные периоды хорошо согласуются с данными из литературных источников; изменения периодов не обнаружены.

David-Uraz et al. (2021b) представляют результаты спектрополяриметрии избранных по программе химически пекулярных звезд на основании фотометрических данных, полученных со спутником TESS. Из четырех звезд-кандидатов, для которых был выполнен мониторинг, магнитное поле величиной порядка 100 Гс обнаружено только у одной из них. Делается вывод, что сверхточная фотометрия TESS позволяет обнаруживать новые магнитные звезды.

В работе Shultz et al. (2021c) описываются результаты обнаружения магнитного компаньона у пульсирующей звезды типа  $\beta$  Cep HD 156424. Она является горячей В-звездой в ассоциации Sco OB4, в спектре которой наблюдается эмиссия в H $\alpha$ . Частоты пульсаций были найдены по кривой блеска, полученной со спутником TESS. Анализируя спектрополяриметрические профили линий, полученные на спектрографах ESPaDOnS и HARPSpol, авторы зарегистрировали сильное магнитное поле порядка 1.5 кГс у вторичного компонента и несколько более слабое, порядка 0.8 кГс, у главного. Таким образом, HD 156424 является

только второй системой с двумя обнаруженными магнитными компонентами.

Kochukhov et al. (2021b) нашли новые затменно-двойные среди HgMn-звезд. Затменно-двойные редки, поэтому их обнаружение играет важную роль, так как позволяет с высокой точностью определить фундаментальные параметры звезд. В работе представлены результаты наблюдений шести ртутно-марганцевых звезд со спутника TESS. Таким образом, количество известных затменных среди HgMn-звезд удвоилось. Детально описывается каждый объект.

Работа Erba et al. (2021b) посвящена изучению ультрамедленного ротатора  $\xi^1$  CMa — магнитного пульсатора типа  $\beta$  Cep. Найдено, что звезда имеет наибольший период вращения среди всех известных магнитных В-звезд. Величина продольного магнитного поля была  $B_e = -87 \pm 2$  Гс в 2019 году и  $B_e = -207 \pm 3$  Гс — в 2020 г. На Hubble Space Telescope (HST) были получены спектры в УФ-области, результаты анализа которых также подтверждают очень медленное вращение.

Hubrig and Schöller (2021) опубликовали монографию, в которой описывается широкий круг магнитных OBA-звезд. Представлены результаты исследований магнитного поля, химического состава звезд типов Ae/Be Хербига, звезд Вольфа-Райе и объектов других типов.

Hubrig et al. (2021) на спектрополяриметре PEPSI выполнили наблюдения линейной поляризации в спектральных линиях для гоAr-звезды  $\gamma$  Equ. Этот уникальный объект обладает сильным поверхностным магнитным полем до 4 кГс. Период вращения звезды около 100 лет. Кроме того, наблюдаются пульсации блеска и спектра, а также изменение  $Q$ - и  $U$ -параметров Стокса с периодом 12.2 минуты. Авторы предполагают, что имеет место влияние пульсаций на поперечный компонент поля, и это приводит к изменению угла наклона магнитных силовых линий.

Romanuk (2021a) выполнил обзор результатов измерений магнитных химически пекулярных звезд на 6-м телескопе БТА. Приведены основные направления исследований и результаты:

- поиски новых магнитных звезд;
- исследования магнитных звезд в скоплениях разного возраста;
- поиски очень медленных ротаторов.

В частности, были проведены спектрополяриметрические наблюдения всех химически пекулярных звезд в ассоциации Орион OB1. Замечено значительное ослабление поля с возрастом в этой ассоциации в интервале от 2 до 10 млн. лет. Найдено несколько новых магнитных сверхмедленных

ротаторов. Общее количество впервые обнаруженных на 6-м телескопе БТА магнитных звезд — около 200, что составляет примерно 1/3 от всех известных.

В работе Faltová et al. (2021) отождествлены 86 новых кандидатов в химически пекулярные звезды на основании данных ZTF-каталога периодических переменных звезд. Для некоторых из них уже доступны спектры с телескопа LAMOST, подтверждающие пекулярность звезд. Делается вывод, что каталог ZTF очень перспективен для выделения CP-звезд.

Järvinen et al. (2020) исследуют аномальную структуру атмосферы Ар-звезды с сильным магнитным полем HD 166473. Авторы нашли четкое указание на существование зависимости между величиной магнитного поля и его горизонтальной и вертикальной ориентацией. Величины магнитного поля, полученные по элементам в разной стадии ионизации на магнитном экваторе, почти одинаковые, в то время как дисперсия поля, определенная по линиям редких земель, в области полюсов значительно больше.

Wade et al. (2021) в ходе обзора MiMeS нашли две новые магнитные звезды: HD 221218 и HD 155273. HD 221218 — одиночная поздняя В-звезда с сильным магнитным полем,  $B_e \approx 2$  кГс, с периодом вращения 2.6 суток. HD 155273 — спектрально-двойная SB2, у которой вторичный компонент является магнитной звездой с полем порядка 0.2 кГс и имеет более широкие спектральные линии.

Mathys et al. (2022) исследовали долгопериодические Ар-звезды по данным спутника TESS в северном полушарии. В результате наблюдений обнаружены 67 Ар-звезд с отсутствием переменности. Найдены новые доказательства существования дыры в области от 2 до 3 кГс в распределении магнитного поля долгопериодических звезд. Авторы показали, что магнитное поле для Ар-звезд выше, чем в среднем для медленных ротаторов.

#### 4.2. Магнитное поле белых карликов и других вырожденных звезд

Bagnulo and Landstreet (2020) обнаружили шесть новых магнитных белых карликов в области расстояний до 20 пк. Величина поля у них от нескольких МГс до 200 МГс. Это исследование показывает, что по крайней мере 20% белых карликов в объеме до 20 пк обладают магнитным полем. Подтверждается, что магнетизм является скорее обычным, чем редким явлением у белых карликов. Рассматриваются инструментальные эффекты, которые могут помешать исследованию широкополосной поляризации в континууме.

В другой работе авторы (Bagnulo and Landstreet 2021) бросают новый взгляд на магнетизм вырожденных звезд, исходя из анализа выборки ближайших (на расстояниях менее 20 пк) белых карликов. Авторы нашли в этом объеме 152 белых карлика, среди которых 33 являются магнитными. Магнитное поле слабее 40 кГс не обнаружено. Авторы подтверждают тот факт, что магнитные поля чаще встречаются у более массивных и более молодых белых карликов. Не найдено доказательств распада поля со временем. Возможно, в фазе кристаллизации работает механизм динамо.

Wilson et al. (2021) сообщают об обнаружении молодого предпромежуточного поляра в двойной системе SS Cet. По сравнению с большим относительным количеством магнитных карликов среди одиночных звезд в двойных системах они очень редки. У найденной авторами двойной системы магнитное поле белого карлика достигает 600–700 кГс. Период вращения белого карлика — около 30 минут, а ось вращения не совпадает с магнитной осью. В работе приведены параметры атмосферы белого карлика.

Berdyugin et al. (2022) обсуждают вопросы измерений циркулярной поляризации при поисках магнитных белых карликов. По сравнению со спектрополяризацией наблюдения широкополосной круговой поляризации можно выполнить со значительно большей точностью. Проведены наблюдения на поляриметре DIPol-UF. Найдена связь между величиной поля и величиной широкополосной круговой поляризации.

#### 4.3. Магнитное поле неCP-звезд

David-Uraz et al. (2021a) обсуждают новые наблюдения звезды NGC 1624-2. Она обладает наиболее сильным магнитным полем среди всех известных O-звезд. Предыдущие наблюдения показали, что у звезды имеется мощная магнитосфера. Новые наблюдения не только подтвердили ее наличие, но и показали, что она имеет сложную структуру. Магнитное поле звезды отличается от дипольного.

Sikora et al. (2020) предлагают спектроскопический тест для объяснения фотометрической модуляции периодических кривых Ар-звезд, полученных со спутником Kepler. Пятнистые химически пекулярные звезды демонстрируют переменность. В результате наблюдений на Kepler оказалось, что 44% всех А-звезд демонстрируют фотометрическую переменность, но доля Ар-звезд составляет только около 10%. Поэтому предполагается, что часть этих объектов является двойными А-звездами.

Auگیère et al. (2021) описывают дипольное магнитное поле, которое найдено у звезды Pollux —

красного гиганта с планетной системой. Лучевая скорость меняется с периодом 590 суток. На спектрополяриметрах ESPaDOnS и NARVAL были получены циркулярно-поляризованные спектры. Найдено слабое магнитное поле величиной  $B_s = 0.44$  Гс, которое меняется по синусоидальному закону с периодом, близким к периоду переменности лучевой скорости. Авторы считают, что оно создано механизмом динамо.

Erba et al. (2021a) считают, что 7% массивных звезд имеют стабильное магнитное поле. Обычно они изучаются по линиям в видимой области спектра, а в этой работе исследуются возможности использования УФ-линий. Это необходимо для выполнения наблюдений на спектрополяриметре POLSTAR.

В работе Song et al. (2022) изучается звезда  $\sigma$  Ori E. Наблюдения со спутником GAIA показали, что звезда принадлежит скоплению  $\sigma$  Ori. Проведены новые определения металличности, массы и возраста. Найдено, что  $\sigma$  Ori E — очень молодая звезда (возраст менее 1 млн. лет). Масса звезды около  $9 M_\odot$ , магнитное поле на поверхности — 7 кГс.

Das et al. (2022) нашли восемь радиопульсирующих эмиттеров, которые могут быть ключом к объяснению когерентной радиоэмиссии в горячих магнитных звездах. Наблюдения проводились на Giant Metrewave Radio Telescope в период 2015–2021 гг. Таким образом, около 32% горячих магнитных звезд имеют радиоэмиссию. Магнитное поле играет важную роль в этом процессе.

В работах Folsom et al. (2021), Grunhut et al. (2022) приводятся результаты изучения магнитного поля и магнитосферы звезды HD 47129. Она является спектрально-двойной, состоит из двух O-звезд, одна из которых обладает магнитным полем. Орбитальный период системы около 14 суток. Одна из звезд имеет узкие резкие спектральные линии, а вторая — широкие. Скомбинированы спектрополяриметрические и фотометрические наблюдения из архивов для построения магнитной модели звезды. Для анализа V-параметров Стокса использовался метод LSD. Найден период 1.21 суток и построена магнитная модель O-звезды. Поле в основном дипольное, наклон диполя к оси вращения около  $90^\circ$ , величина поля на полюсе  $B_p = 850$  Гс.

Shultz et al. (2021b) обнаружили экстремально сильное магнитное поле в двойной вырожденной звезде HD 144941. Эта система относится к редкому классу OB-субкарликов, сформировавшихся при слиянии двух белых карликов. Продольное

магнитное поле  $B_e \approx 8$  кГс, а расщепленные зеемановские компоненты указывают на модуль поверхностного магнитного поля  $B_s \approx 17$  кГс. Наблюдается слабая эмиссия в H $\alpha$ , согласующаяся с моделью центробежной магнитосферы. Нет указаний на двойственность звезды.

Nahlin et al. (2021) изучают магнитное поле затменной двойной UV Pis. Система состоит из двух активных звезд позднего типа UV Pis A (G5V) и B (K3V). На спектрополяриметре ESPaDOnS получены спектры высокого разрешения. Для построения карты магнитного поля использовался метод доплер-зеемановского картирования (ZDI). Оказалось, что UV Psc A и B имеют среднее магнитное поле 137 Гс и 88 Гс соответственно, мелкомасштабное поле существенно сильнее: 2.5 и 2.2 кГс. Метод ZDI позволяет картировать только 5% общего магнитного поля. Компонент A имеет более сильное поле, чем B. Из-за того, что система затменная, многие магнитные особенности не могут быть выявлены при использовании только циркулярной поляризации. Надо применять также зеемановскую интенсификацию линий.

Buchkov et al. (2021) исследовали магнитное поле и химический состав HD 110066. Наблюдения выполнены на 1-м телескопе Zeiss-1000 SAO РАН. Построена модель наклонного ротатора. Химический состав согласуется с полученным ранее на спектрополяриметре ESPaDOnS.

Mikulášek et al. (2020) изучили фотометрическую переменность звезды HD 174536 (B9pSi). Используя наблюдения миссии Kepler K2, получили переменную периодическую кривую блеска, которая по форме и амплитуде не похожа на типичные для CP2-звезд. Детально исследован химический состав. Магнитное поле сильнее 110 Гс не найдено. Обнаружено два периода около 4.0 и 2.11 суток, они стабильны на протяжении 17 лет наблюдений. Авторы считают, что пекулярная кривая блеска вызвана вращением с периодом 4.0 суток и пульсациями  $g$ -моды с периодом 2.11 суток.

Hubrig et al. (2020) исследовали магнитное поле у двух Вольф–Райе-звезд: WR 46 и WR 55. Наблюдения выполнялись на спектрополяриметре FORS2. Магнитное поле в несколько сотен Гс найдено у WR 55, а у звезды WR 46 поле не обнаружено.

Järvinen et al. (2021) изучали сильное магнитное поле Of?p звезды NGC 1624-2. Ранее сообщалось об обнаружении поля на поверхности:  $B_s > 20$  кГс. Продольное поле меняется от  $-0.2$  кГс до 4.5 кГс. Построена модель поля, согласно которой минимум продольного поля совпадает с максимумом поверхностного. Это означает, что поле имеет структуру центрального диполя.

Przybilla et al. (2021) изучили экстремально пекулярную звезду с усиленными линиями гелия HD 144941. На FORS1 найдено продольное магнитное поле:  $B_e \approx 9$  кГс. Зеемановское расщепление линий указывает на поле  $B_s \approx 15$  кГс. Эффективная температура  $T_{\text{eff}} \approx 22000$  К,  $\lg g = 4.20$ , доля гелия 0.95 по количеству поглощающих атомов. Содержание металлов на порядок больше солнечного.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели около 80 работ, опубликованных в основном в 2021 г. и в начале 2022 г., выполненных в области исследований звездного магнетизма.

В связи с эпидемией коронавируса резко сократилось количество международных конференций и научных докладов. Основными источниками сведений являются международные астрономические журналы *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* и *Astronomy and Astrophysics*. Некоторое число статей опубликовано в российском журнале *Astrophysical Bulletin*. Основное внимание уделено обнаружению магнитных полей, детектированию спектральной и фотометрической переменностей химически пекулярных звезд. Несколько работ посвящены исследованиям магнитных белых карликов. Обнаружены магнитные поля у некоторых звезд типа Вольф–Райе и объектов других типов.

В целом можно сделать вывод, что по-прежнему основными поставщиками информации о магнитном поле звезд являются 6-м телескоп БТА САО РАН и спектрополяриметр FORS2 ESO, активные наблюдения проводятся также и на спектрополяриметрах высокого разрешения ESPaDOnS и NARVAL.

Отметим также, что фотометрические наблюдения со спутниками TESS и Kepler позволили построить очень точные кривые блеска и определить периоды вращения большого количества химически пекулярных звезд. Найдены критерии, по которым можно выделить пекулярные звезды из большого массива переменных объектов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Автор благодарит Российский научный фонд за частичную финансовую поддержку работы (грант РФФ № 21-12-00147).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- G. Alecian and M. J. Stift, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (1), 1370 (2021).
- M. Aurière, P. Petit, P. Mathias, et al., *Astron. and Astrophys.* **646**, id. A130 (2021).
- S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **643**, id. A134 (2020).
- S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (4), 5902 (2021).
- A. V. Berdyugin, V. Pirola, S. Bagnulo, et al., *Astron. and Astrophys.* **657**, id. A105 (2022).
- K. Bernhard, S. Hümmerich, E. Paunzen, and J. Šupíková, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (3), 4561 (2021).
- V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, J. Madej, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (3), 297 (2021).
- G. Catanzaro, M. Giarrusso, M. Munari, and F. Leone, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **499** (3), 3720 (2020).
- B. Das, P. Chandra, M. E. Shultz, et al., *Astrophys. J.* **925** (2), id. 125 (2022).
- A. David-Uraz, V. Petit, M. E. Shultz, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **501** (2), 2677 (2021a).
- A. David-Uraz, M. E. Shultz, V. Petit, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (4), 4841 (2021b).
- M. Deal, M. S. Cunha, Z. Keszthelyi, et al., *Astron. and Astrophys.* **650**, id. A125 (2021).
- C. Erba, V. Petit, K. Gayley, et al., arXiv e-prints astro-ph:2:2107.09007 (2021a).
- C. Erba, M. E. Shultz, V. Petit, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (2), 2296 (2021b).
- N. Faltová, K. Kallová, M. Prišegen, et al., *Astron. and Astrophys.* **656**, id. A125 (2021).
- C. P. Folsom, J. H. Grunhut, and G. A. Wade, in *Proc. MOBSTER-1 virtual conference: Stellar Variability as a Probe of Magnetic Fields in Massive Stars, 2020*, id. 10 (2021).
- J. H. Grunhut, G. A. Wade, C. P. Folsom, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **512** (2), 1944 (2022).
- A. Hahlin, O. Kochukhov, E. Alecian, et al., *Astron. and Astrophys.* **650**, id. A197 (2021).
- D. L. Holdsworth, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **8**, id. 31 (2021).
- D. L. Holdsworth, M. S. Cunha, D. W. Kurtz, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (1), 1073 (2021).
- S. Hubrig, S. P. Järvinen, I. Ilyin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **508** (1), L17 (2021).
- S. Hubrig and M. Schöller, *Magnetic Fields in O, B, and A Stars* (IOP Publishing, Bristol, 2021).
- S. Hubrig, M. Schöller, A. Cikota, and S. P. Järvinen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **499** (1), L116 (2020).
- S. P. Järvinen, S. Hubrig, G. Mathys, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **499** (2), 2734 (2020).
- S. P. Järvinen, S. Hubrig, M. Schöller, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **501** (3), 4534 (2021).

26. A. S. Jermyn and M. Cantiello, *Astrophys. J.* **900** (2), id. 113 (2020).
27. A. F. Kholtygin, A. A. Batrakov, S. N. Fabrika, et al., in *Proc. MOBSTER-1 virtual conference: Stellar Variability as a Probe of Magnetic Fields in Massive Stars, 2020*, id. 44 (2021a).
28. A. F. Kholtygin, A. V. Moiseeva, M. S. Kurdoyakova, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (2), 185 (2021b).
29. A. F. Kholtygin, A. V. Moiseeva, I. A. Yakunin, et al., *Geomagnetism and Aeronomy* **61** (7), 923 (2021c).
30. A. K. Kholtygin, M. A. Burlak, and O. A. Tsiopa, *Astronomicheskij Tsirkulyar* **1649**, 1 (2021d).
31. O. Kochukhov, V. Khalack, O. Kobzar, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (4), 5328 (2021a).
32. O. Kochukhov, J. Labadie-Bartz, V. Khalack, and M. E. Shultz, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (1), L40 (2021b).
33. V. V. Komarov, A. S. Moskvitin, V. D. Bychkov, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 486 (2020).
34. G. Mathys, D. W. Kurtz, and D. L. Holdsworth, *Astron. and Astrophys.* **660**, id. A70 (2022).
35. Z. Mikulášek, E. Paunzen, S. Hümmerich, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **498** (1), 548 (2020).
36. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **5** (12), id. 281 (2021a).
37. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **5** (12), id. 284 (2021b).
38. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **5** (11), id. 270 (2021c).
39. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **5** (11), id. 261 (2021d).
40. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **5** (12), id. 287 (2021e).
41. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **5** (9), id. 203 (2021f).
42. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **5** (10), id. 226 (2021g).
43. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **6** (1), id. 9 (2022a).
44. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **6** (1), id. 15 (2022b).
45. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **6** (3), id. 48 (2022c).
46. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **6** (2), id. 30 (2022d).
47. R. Monier, *Research Notes of the American Astronomical Society* **6** (1), id. 21 (2022e).
48. R. Monier and D. Mary, *Research Notes of the American Astronomical Society* **6** (2), id. 40 (2022).
49. P. Morel and Y. Lebreton, *Astrophys. and Space Sci.* **316** (1-4), 61 (2008).
50. E. Muslimov, J.-C. Bouret, C. Neiner, et al., *SPIE Conf. Proc.* **11444**, id. 114446G (2020).
51. E. Muslimov, N. Levraud, V. Chambouleyron, et al., *SPIE Conf. Proc.* **11876**, id. 118760H (2021).
52. F. Ochsenein, P. Bauer, and J. Marcout, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 23 (2000).
53. C. N. Oiodum, P. N. Okeke, and B. I. Okere, *New Astronomy* **84**, article id. 101537 (2021).
54. E. Paunzen, J. Supíková, K. Bernhard, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (3), 3758 (2021).
55. V. Pirola, I. A. Kosenkov, A. V. Berdyugin, et al., *arXiv e-prints astro-ph:2011.02129* (2020).
56. N. Przybilla, L. Fossati, and C. S. Jeffery, *Astron. and Astrophys.* **654**, id. A119 (2021).
57. D. M. Pyper and S. J. Adelman, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **133** (1026), id. 084203 (2021).
58. A. M. Romanovskaya, D. V. Shulyak, T. A. Ryabchikova, and T. M. Sitnova, *Astron. and Astrophys.* **655**, id. A106 (2021).
59. I. Romanyuk, *Universe* **7** (12), 465 (2021a).
60. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **70** (2), 191 (2015).
61. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 498 (2021b).
62. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, E. A. Semenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (3), 294 (2020).
63. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, E. A. Semenko, et al., *VizieR Online Data Catalog (other)* **0330**, J/other/AstBu/77 (2022).
64. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (1), 39 (2021a).
65. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (2), 163 (2021b).
66. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *VizieR Online Data Catalog (other)* **0330**, J/other/AstBu/74 (2021c).
67. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *VizieR Online Data Catalog (other)* **0330**, J/other/AstBu/76 (2021d).
68. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *VizieR Online Data Catalog (other)* **0330**, J/other/AstBu/76 (2021e).
69. E. Semenko, Z. Mikulasek, and I. Romanyuk, in *Proc. MOBSTER-1 virtual conference: Stellar Variability as a Probe of Magnetic Fields in Massive Stars, 2020*, id. 37 (2021).
70. M. E. Shultz, E. Alecian, V. Petit, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (3), 3203 (2021a).
71. M. E. Shultz, O. Kochukhov, J. Labadie-Bartz, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (1), 1283 (2021b).
72. M. E. Shultz, T. Rivinius, G. A. Wade, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (4), 4850 (2021c).
73. J. Sikora, G. A. Wade, and J. Rowe, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **498** (2), 2456 (2020).
74. H. F. Song, G. Meynet, A. Maeder, et al., *Astron. and Astrophys.* **657**, id. A60 (2022).
75. K. Thomson-Paressant, C. Neiner, K. Zwintz, and A. Escorza, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **500** (2), 1992 (2021).
76. G. A. Wade, K. Woodcock, O. Lim, et al., in *Proc. MOBSTER-1 virtual conference: Stellar Variability as a Probe of Magnetic Fields in Massive Stars, 2020*, id. 3 (2021).
77. W. W. Weiss, K. Zwintz, R. Kuschnig, et al., *Universe* **7** (6), 199 (2021).

78. D. J. Wilson, O. Toloza, J. D. Landstreet, et al., (2021).  
Monthly Notices Royal Astron. Soc. **508** (1), 561  
(2021).
79. K. Woodcock, G. A. Wade, O. Kochukhov, et al., 80. K. Zwintz, C. Neiner, O. Kochukhov, et al., Astron.  
Monthly Notices Royal Astron. Soc. **502** (4), 5200 and Astrophys. **643**, id. A110 (2020).

## **Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars. VIII. Main Results of 2021 and Near-Future Prospects**

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

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

We present a review of the papers written in the research field of stellar magnetism in 2021. The instruments, observation, and data analysis methods, photometry, spectroscopy, and spectropolarimetry results are considered. We present new data on magnetic fields of chemically peculiar stars and other objects of various types.

Keywords: *stars: magnetic field—stars: chemically peculiar—stars: solar-type—stars: white dwarfs*