

УДК 524.35–337

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ И РОДСТВЕННЫХ ИМ ЗВЕЗД. 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2015 Г. И АНАЛИЗ БЛИЖАЙШИХ ПЕРСПЕКТИВ

© 2016 И. И. Романюк*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 22 января 2016 года; принята в печать 19 мая 2016 года

Представлен аналитический обзор основных публикаций, посвященных теме исследования звездного магнетизма, опубликованных в 2015 г. Рассмотрены около 80 важнейших, на наш взгляд, имеющихся публикаций, представлены их краткие рефераты и сделаны обобщения. В статье рассматриваются: приборы, методика наблюдений и анализа данных; крупномасштабные магнитные поля ОВА-звезд Главной последовательности (ГП) (формирование и эволюция, топология поля, поиск новых магнитных звезд, включая проекты MiMeS, BOB, VipaMIS и наблюдения на 6-м телескопе SAO РАН, анализ вращения и химического состава магнитных CP-звезд); магнитные поля, химический состав и переменность звезд, родственных пекулярным, в первую очередь активных холодных звезд, звезд солнечного типа и белых карликов; кратные магнитные звезды, включая данные интерферометрии, экзопланеты в системе магнитных звезд. Делается вывод, что точность измерений магнитных полей выросла в связи с повсеместным применением мультилинейных методов наблюдений, особенно на спектрополяриметрах высокого разрешения. Использование доплер-зеемановского картирования (ZDI) при анализе полученных данных позволяет уверенно искать и измерять поля сложной топологии величиной порядка 10 Гс. Впервые найдено магнитное поле у post-AGB-звезд и некоторых других типов объектов.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие резко возрос интерес к проблеме поиска магнитных полей у разнообразных объектов Галактики. Были созданы новые приборы и отлажены новые методики, позволяющие повысить точность магнитных измерений вплоть до единиц гаусс. Поиск магнитных полей стал возможен у новых классов объектов. Проводятся массовые магнитные измерения, изучаются поля не только простой дипольной структуры, как это было раньше, но уже строятся карты магнитных полей сложной топологии. Это позволяет снять ограничения, связанные с нечувствительностью прежней, разработанной еще Бэбкоком [1], методики обнаружения сложных полей, у которых видны одновременно области с разной полярностью. Вероятнее всего, именно такие поля и преобладают у большинства типов звезд.

Увеличение эффективности наблюдений привело к значительному росту количества публикаций.

Ежегодно выходят сотни статей с анализом полученных результатов измерения полей, и проводится несколько крупных международных научных конгрессов, в которых в той или иной мере затрагиваются проблемы звездного магнетизма. Все более актуальными представляются обзоры современных работ, которые позволяют оперативно ориентироваться в большом потоке публикуемых данных. Исследования звездного магнетизма перестали быть уделом узкой группы специалистов, поэтому очевидна необходимость систематизации полученных результатов.

В прошлом году мы начали такую работу, опубликовав свой первый обзор [2] с анализом основных результатов исследований магнитных полей химически пекулярных и родственных им звезд, полученных в 2014 г. В статье указаны основные мотивы, которыми мы руководствовались, выполняя настоящее исследование.

Как и ранее, хотелось бы отметить очень важную работу издателя электронного журнала «A Peculiar Newsletter»¹ д-ра Л. Фосатти по

*E-mail: roman@sao.ru

¹<http://apn.arm.ac.uk/newsletter>.

отслеживанию и публикации списка работ, индексируемых в базе данных NASA ADS. Мы широко используем эти данные в нашей работе.

Кроме статей, опубликованных в ведущих астрономических журналах, в анализ включены некоторые публикации трех крупных конференций:

- 1) «New Windows on Massive Stars: Asteroseismology, Interferometry, and Spectropolarimetry,» June 23–27, 2015, Geneva, Switzerland;
- 2) «Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars,» August 25–31, 2014, Nizhnii Arkhyz, Russia;
- 3) «Polarimetry: from the Sun to Stars and Stellar Environments,» 30 November–5 December, 2014, Punta Leona, Costa Rica.

Рецензируются также и некоторые отдельные доклады, представленные на других конференциях.

По сравнению с 2014 г. заметно выросло количество публикаций, связанных с поисками экзопланет вокруг магнитных звезд преимущественно солнечного типа. Мы проанализируем только некоторые из них, в особенности те, где методы доплеровской томографии дают результат, который можно интерпретировать либо как пятна яркости на поверхности вращающейся звезды, либо как прохождение планет на фоне ее диска.

Рубрикация останется примерно такой же, как и в работе [2], но с некоторыми очевидными изменениями. Во-первых, в наблюдениях использовались те же приборы, что и годом ранее. Описывать их снова нецелесообразно, сведения о них можно найти в [2] и приведенных в ней ссылках. Во-вторых, уменьшилось количество работ по исследованию магнитных полей Ар-звезд, акценты сместились в сторону изучения более горячих В- и О-звезд. И, в-третьих, значительно увеличилось количество публикаций, в которых применяются методы доплер-зеemanовского (ZDI) (или магнитного) картирования при анализе данных наблюдений.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

В данном разделе мы рассмотрим вопросы, связанные с методикой выполнения наблюдений и интерпретацией полученных данных. Хотя приборы для наблюдений остались прежними, расширился набор объектов, для которых были выполнены магнитные измерения. Возможность обнаружения поля в значительной степени зависит от его геометрии, крупномасштабные поля простой (например, дипольной) структуры обнаруживать значительно легче, чем мелкомасштабные сложные поля. Последние анализируются только методами ZDI

(описаны в работе [2]). Для их реализации требуются многократные (не менее 6–7) наблюдения одного и того же объекта с высокими спектральным разрешением и отношением S/N . Результаты анализа в этом случае в значительной степени более модельно зависимы по сравнению с анализом дипольных полей.

Особо большие риски ложных обнаружений существуют при исследовании ярких звезд (типа Веги), в которых авторы, по их утверждениям, находят магнитные поля на уровне 1 Гс. Поиск таких полей у звезд требует высочайшей стабильности работы аппаратуры и контроля многочисленных возможных инструментальных причин, которые могут существенным образом повлиять на результат.

2.1. Приборы и методика наблюдений

подавляющее большинство наблюдений, результаты которых были опубликованы в 2015 г., выполнялись на тех же инструментах, что были описаны годом ранее. Это спектрополяриметры низкого разрешения FORS1/2 (ESO VLT), умеренного разрешения ОЗСП 6-м телескопа и высокого разрешения HARPSpol (ESO), ESPaDOnS (CFHT), NARVAL (TBL).

Отдельные наблюдения выполнялись и на других приборах. К ним относятся спектрополяриметр DimaPol, спектрограф SOPHIE. Сведения о них будут помещены в соответствующих разделах обзора при анализе статей. Много новых данных получено космической миссией Kepler. С его помощью открыты очень маленькие изменения блеска, которые могут интерпретироваться и как транзиты экзопланет, и как быстрые пульсации звезд, в частности, химически пекулярных гоАр-звезд.

В литературе (Валявин и др. [3, 4]) описывается проект нового спектрографа высокого разрешения для 6-м телескопа. В нем предусмотрена поляриметрическая мода, которая позволит измерять очень слабые магнитные поля звезд (на уровне около 1 Гс).

Отметим здесь также, что на спекл-интерферометре 6-м телескопа мы продолжали получать данные о двойственности магнитных звезд. Прибор многократно описан, например, в работе [5] и ссылках в ней, а новые результаты наблюдений будут процитированы в соответствующих частях нашего обзора.

В заключение этого Раздела отметим, что наибольшее количество статей в 2015 г. было написано по результатам наблюдений на унифицированных спектрополяриметрах ESPaDOnS и NARVAL.

2.2. Методика анализа данных

В следующем десятилетии планируется ввод в строй новых, очень больших телескопов и интерферометров, что позволит разрешать детали поверхности звезд и видеть их структуру. В области исследований звездного магнетизма можно будет сравнивать прямые наблюдения топологии магнитных полей с картами, полученными разными вариантами метода ZDI.

Но это дело будущего, а в настоящее время широкое распространение получили различные способы построения карт магнитного поля и распределения химических элементов по поверхности, основанные на рафинированном анализе поляризованных профилей спектральных линий (метод ZDI), полученных из наблюдений со спектрополяриметрами высокого разрешения. Разрабатываются методики, с помощью которых можно различить пятна химического состава и спутники звезд и даже транзиты экзопланет. Методы спеклинтерферометрии позволяют обнаружить не только близкие спутники магнитных звезд, но и оценивать их линейные размеры и температуру. Оптическая интерферометрия с длинной базой в перспективе позволит не только определять фундаментальные параметры звезд, но и выявлять пульсации, отличия формы от сферической (из-за вращения) и др.

Определение фундаментальных параметров химически пекулярных звезд при помощи интерферометрии описано в работе Перро и др. [6]. Возможности интерферометрии в настоящее время и требования к будущим наблюдениям по непосредственному обнаружению пятен на поверхности CP-звезд обсуждаются в статье Шуляка и др. [7].

Крупным методическим недостатком в проблеме исследований звездного магнетизма является практически полная (за очень редким исключением) невозможность использования обычных спектров, полученных с умеренным разрешением, для измерений магнитных полей звезд. Требуются данные спектрополяриметрии, что резко ограничивает возможности наблюдений. В то же время, в архивах накоплены многие десятки тысяч или даже сотни тысяч спектров, из которых теоретически можно было бы извлечь информацию о магнитных полях.

Ранее предпринимались попытки разрешить ситуацию, но малоуспешно. Недавно сделана очередная попытка. Борра и Дешателе [8] предложили новый метод измерения магнитных полей звезд с помощью автокорреляции спектра. Измеряется уширение профилей линий, и таким образом определяется модуль магнитного поля, или, другими словами, «поверхностное поле» B_s (Матис и др. [9]). Используя автокорреляцию, можно измерить уширение всех линий одновременно, получив

некую усредненную псевдолинию. Авторы утверждают, что методика во многом похожа на хорошо известную методику LSD [10], но гораздо проще в реализации. При проведении автокорреляции континуум вычитается, рассматриваются только линии. Надо использовать максимально широкую область спектра. Процедура, предлагаемая авторами [8], основана на том, что уширение вращением (эффект Доплера) растет линейно с длиной волны, а уширение магнитным полем (эффект Зеемана) — квадратично. В качестве основного источника уширения принято вращение. Инструментальное уширение должно быть тщательно изучено и может быть удалено с помощью деконволюции. В статье проведено сравнение результатов, полученных методом автокорреляции для одних и тех же звезд с непосредственными измерениями эффекта Зеемана, выполненными Матисом и др. [9]. В статье дается обоснование того факта, что метод можно применять при поиске новых магнитных звезд по спектрам, полученным с низким спектральным разрешением, в различных обзорах. Чувствительность к полю зависит от скорости вращения звезды и количества линий в спектре, однако авторы полагают, что поля более 1 кГс можно будет обнаруживать массовым образом.

По мнению автора обзора, развитие данного метода поможет существенным образом облегчить поиски новых магнитных звезд. Метод имеет большие перспективы.

На важность учета нефотонного шума в астрономической спектрополяриметрии указывается в работе Баньюло и др. [11]. Авторы напоминают, что применение методики переключения поляризованных лучей позволяет исключить множество ложных сигналов поляризации и других инструментальных эффектов. Однако при наблюдениях очень слабых магнитных полей, где требуется получить сверхвысокое отношение S/N , становятся существенными различные ограничения, вносимые прибором, атмосферой и даже методикой обработки данных. На примере наблюдений со спектрополяриметром FORSI показано влияние гнутый в приборе, установленном в фокусе Кассегрена 8-м телескопа, на ложную регистрацию магнитного поля. Авторы делают вывод, что прибор FORSI не следует использовать для поиска очень слабых магнитных полей.

Методы магнитного картирования разработаны на основе анализа деталей поляризованных профилей спектральных линий, полученных с высоким разрешением. Очень часто карты, построенные по линиям разных элементов, существенно различаются. Как уже упоминалось, Донати и др. [10] развили мультилинейную методику определения магнитных полей, в которой сигнал от V -параметра

Стокса всех использованных в маске линий собирается в одну псевдолинию (методика LSD). Кочухов [12] отмечает трудности применения мультилинейной LSD-методики для интерпретации результатов наблюдений. Прежде всего, используемый сигнал поляризации, усредненный по многим линиям, может нарушаться из-за принятых упрощений (слабые линии, слабое поле и линейность при складывании отдельных профилей). Автор показывает, что использование LSD при полях более 2 кГс приводит к искажениям. Более того, LSD-профили Q - и U -параметров Стокса не воспроизводятся одновременно с V -профилями при любой величине поля. Проблема в том, что LSD-профили Q - и U -параметров сильно зависят от интенсивности линий. В итоге карты распределения химических элементов, полученные методом LSD, оказываются смещенными по сравнению с построенными по индивидуальным линиям. Представлено решение этой проблемы путем разработки новых программ, позволяющих интерпретировать средние профили поляризации. Детально метод описан в работе Кочухова и др. [13].

Отметим, что при ранних наблюдениях, когда детектировались магнитные поля величиной более 100 Гс, не требовалось получать очень высокие отношения S/N . В настоящее время при анализе субгауссовых полей используются исключительно спектры высокого разрешения, выделяются очень слабые сигналы на фоне шумов. Исследователи сталкиваются с теми же проблемами, которые возникают при поиске экзопланет. Эти методики тесно переплетены и могут взаимно обогащать друг друга. Некоторые работы, наиболее близкие к теме обзора, связанные с экзопланетами, представлены ниже.

В первых в России наблюдениях транзитов экзопланет Валявиным и др. [14] исследовались две экзопланеты с разными глубинами затмений: WASP-43b и WASP-104b. Оба транзита зарегистрированы при фотометрических наблюдениях на 1-м телескопе САО РАН. Точность регистрации составила 0.001–0.003 зв. вел.

В другой работе этой команды (Валявин и др. [15]) развивается и тестируется методика спектрального детектирования света родительских звезд, отраженного от их экзопланет. Представленный метод основан на анализе динамических спектров, который позволяет получать остаточный сигнал за вычетом спектра родительской звезды с высоким соотношением S/N . Получена серия из нескольких десятков спектров умеренного спектрального разрешения родительской звезды HD 189733. Индивидуальные спектры имеют высокое отношение S/N (порядка 700). Явные следы присутствия отраженного света от экзопланеты не выявлены.

В работе Пети и др. [16] представлен метод поиска экзопланет рядом с активными звездами с использованием приближения максимума энтропии. Наличие пятен на поверхности молодых активных звезд искажает профили спектральных линий, что мешает поиску планет вокруг них. Предлагается простой метод одновременного получения карты яркости и набора орбитальных параметров. Проведена серия вычислений и построены карты распределения яркости по поверхности родительской звезды HR 1099 и параметры орбиты одиночной экзопланеты. Представленный метод позволяет определять эти параметры в случае очень искаженных профилей линий у активных звезд, когда классические методы, основанные на анализе лучевых скоростей, не работают. С его помощью можно получить амплитуду лучевой скорости, орбитальную фазу и орбитальный период планеты, за исключением случаев, когда орбитальный период близок к периоду вращения (коротация).

Отметим еще одну работу, в которой звездная активность рассматривается как шум при поисках экзопланет (Корхонен и др. [17]). Исследуются звезды солнечного типа с циклической активностью. Рассматривается влияние холодных пятен на возможность обнаружения экзопланет вокруг солнечноподобных звезд. Для изучения этого эффекта авторы построили синтетические спектры, используя уравнение лучистого переноса и известные атомные параметры линий. Установлено, что может быть обнаружена планета с массой Нептуна и периодом обращения около одного года. Вероятность найти планету с массой Земли на такой же орбите в данной методике невысока. Метод имеет большой потенциал для выполнения статистических исследований по обнаружению планет.

3. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ОВА-ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В последние несколько лет были выполнены массовые наблюдения горячих звезд Главной последовательности (ранние В- и О-звезды) с целью поиска у них магнитных полей. Оказалось, что можно выделить подгруппу так называемых Of?p-звезд, у членов которой обнаружено магнитное поле со структурой, подобной более холодным Ap- и Bp-звездам. Таким образом, с точки зрения звездного магнетизма, ОВА-звезды представляются единой группой, имеющей крупномасштабные поля достаточно простой (преимущественно дипольной) структуры. Доля магнитных среди этих звезд примерно одинакова — около 5–10% от их общего количества для каждого спектрального класса. Хотя метод измерения с использованием V -параметра Стокса показывает, что все

Of?p-звезды, исследованные до настоящего времени, обладают полем, пока нет оснований причислять их к классу химически пекулярных.

3.1. Формирование и эволюция магнитных полей OBA-звезд

В 2015 г. были опубликованы результаты реализации нескольких проектов, направленных на изучение формирования и эволюции магнитных полей звезд. На 6-м телескопе выполнялись исследования магнитных полей CP-звезд—членов рассеянных скоплений разного возраста. В завершившемся проекте MiMeS основное внимание уделялось поиску магнитных полей O-звезд. Поиском магнетизма горячих звезд был посвящен проект BOV. И, наконец, в прошлом году начал осуществляться проект VipaMICS, изучающий связь между магнетизмом и двойственностью пекулярных звезд. Ниже рассмотрим результаты каждого из проектов подробнее.

3.1.1. Магнитные Ap- и Bp-звезды в скоплениях разного возраста

На 6-м телескопе продолжались наблюдения магнитных звезд в рассеянных скоплениях. В основном завершено получение поляризованных спектров для молодых химически пекулярных объектов в созвездии Ориона (в ассоциации Орион OB1). Обзор текущего состояния этих исследований представлен в статье Романюка и Семенко [18]. Показано, что пространственное распределение магнитных CP-звезд в ассоциации Орион OB1 соответствует распределению нормальных A- и B-звезд. Всего в группировке найдено 85 CP-звезд из общего количества 814 членов ее звездного населения. Доля CP-звезд падает с возрастом от 21.4% в самой молодой подгруппе (d) до 7.7% в самой старой (a). В ассоциации найдено 33 магнитных звезды, из них 11 — на 6-м телескопе. Звезды со сверхсильным (более 50 кГс) магнитным полем не обнаружены. Звезда Бэбкока HD215441 остается объектом с самым сильным для невырожденных звезд полем на протяжении более чем 50 лет. Химический состав звезд с сильным и слабым полями не отличается, но звезды с сильными полями имеют существенно большие аномалии в распределении энергии.

В статье Якунина и др. [19] представлены результаты анализа наблюдений четырех магнитных B-звезд позднего типа. Три из них, HD 34736, HD 17330 и HD 188501, были обнаружены как магнитные впервые. Моделируя водородную линию H β , авторы получили их фундаментальные параметры.

В ходе исследования полной выборки химически пекулярных звезд в ассоциации Орион OB1

на 6-м телескопе в 2013 г. была обнаружена Bp-звезда HD 34736 с сильным полем и необычным характером его переменности. Новые результаты исследований HD 34736 опубликованы в работах Семенко и др. [20, 21]. Авторы показали, что продольное поле периодически меняется от -5 кГс до $+5$ кГс. Кроме того, объект является членом двойной системы, спектр второго компонента выявлен. Определены физические параметры и измерены лучевые скорости обоих компонентов системы. Период вращения главной магнитной звезды 1.29 суток и период обращения спутника, равный 83 суткам, не совпадают. Мониторинг системы продолжается.

3.1.2. Проект MiMeS: результаты

Большой наблюдательный обзор MiMeS по поиску магнитных полей у ранних B- и O-звезд завершен. В работе участвовали около 60 человек из разных стран. Выполнены наблюдения 560 этих объектов со спектрополяриметрами ESPaDOnS на 3.6-м телескопе CFHT, NARVAL — на 2-м TBL и HARPSpol на 3.6-м телескопе ESO (La Silla). Большая часть наблюдавшихся объектов — члены различных скоплений. Основные результаты представлены и обобщены в статьях Вэйда [22] и Вэйда и др. [23]. Общее количество впервые обнаруженных магнитных B- и O-звезд составляет 35. Из них найдены магнитные поля у 11 O-звезд. У одного объекта, NGC 1624-2, магнитное поле превышает 20 кГс. Магнитные O-звезды вращаются медленнее нормальных. Как правило, периоды вращения превышают один месяц, а для звезды HD 108 оценка дает 50 лет. Спектры сложные, в них имеются эмиссии. Абсорбции и эмиссии меняются с периодом вращения звезды. Примерно половина из магнитных O-звезд классифицируется как Of?p. Доля магнитных среди O-звезд составляет 7%, в целом такая же, как для B- и A-звезд.

В работе [22] детально рассматриваются три наиболее интересные магнитные O-звезды, исследованные в ходе выполнения проекта MiMeS. Построены их магнитные модели, в которых показано, что поле имеет крупномасштабную, близкую к дипольной структуру. Обсуждается также проблема взаимодействия магнитного поля со звездным ветром. Все O-звезды принадлежат Главной последовательности. Магнитное поле сильное и организованное (дипольное), ось диполя с наклоном к оси вращения. Так как периоды длинные, на каком-то этапе формирования магнитных O-звезд произошла потеря углового момента. Содержание легких элементов сравнимо с таковым у немагнитных O-звезд. Звездный ветер управляется магнитным полем (центробежные магнитосферы). Найдены Of?p-звезды в Большом и Малом Магеллановых Облаках. Но их магнитные поля до

настоящего времени не изучались. Обсуждается вопрос о наличии «магнитной пустыни» — отсутствия магнитных полей в промежутке от единиц до 100 Гс в звездах спектральных классов от O до A.

Рассмотрим несколько конкретных результатов, полученных в ходе выполнения проекта MiMeS. Шульц и др. [24] сообщают о результатах спектрополяриметрии звезды с усиленными линиями гелия ALS 3694 (CPD – 48°8684) на спектрополяриметре ESPaDOnS. В течение шести ночей наблюдений продольное магнитное поле имело величину порядка 2 кГс; существенные изменения от ночи к ночи не отмечены. В спектре линии H α видна эмиссия. Профиль эмиссии находится в согласии со следствием проявления центробежной магнитосферы.

Детальное изучение Of?p-звезды CPD – 28°2561 предпринято в работе Вэйда и др. [25]. Получено более 75 новых спектров на пяти разных спектрографах и спектрополяриметрах. Изучена переменность эквивалентных ширин фотосферных и чувствительных к ветру спектральных линий. Найден период переменности 73.41 суток. Продольное магнитное поле показывает максимум +565 Гс на фазе 0.5 и минимум –335 Гс в фазе 0.0. Построена модель, в которой поле на полюсе диполя $B_d = 2.6 \pm 0.9$ кГс. Наблюдения подтверждают физический сценарий, в котором переменность всех линий является следствием процессов, происходящих в наклонной коротационной динамической магнитосфере.

В рамках программы MiMeS Вэйдом и др. [26] были выполнены спектрополяриметрические наблюдения 85 классических Be звезд. В статье детально описывается научное обоснование работы и методики проведения наблюдений. В результате анализа полученных для этой большой выборки результатов ни у одной из звезд дипольное поле выше точности измерений (десятки Гс) обнаружено не было.

В работе Якунина и др. [27] исследовано магнитное поле и распределение химического состава звезды HD 184927 (B2V) с усиленными линиями гелия. Наблюдения выполнялись в рамках реализации проекта MiMeS. Найденный период вращения составил 9.531 суток. Измерено продольное магнитное поле по линиям водорода, гелия и металлов. Распределение элементов по поверхности крайне неоднородно. Построена карта. Сделано заключение, что звезда имеет центробежную магнитосферу. Судя по магнитному торможению, возраст звезды 5.8 млн лет.

В ходе выполнения проекта MiMeS была исследована еще одна горячая звезда с аномальными, на сей раз ослабленными, линиями гелия,

HR 2949 [28]. Зеeman-эффект виден в циркулярно поляризованных спектрах, полученных с высоким спектральным разрешением, во многих линиях. Продольное поле меняется между –650 Гс и +150 Гс, величина поля на полюсе диполя B_d оценивается в 2.4 кГс. Звезда имеет сверхвысокое содержание элементов железного пика и экстремально сильное сверхобилие редкоземельных элементов. Однако гелий, алюминий и сера — в недостатке. Таким образом, HR 2949 (HD 61556) является химически пекулярной звездой. Требуется пересмотр фундаментальных параметров объекта, в частности, она несколько больше по размеру, горячее и имеет большую светимость, чем это предполагалось ранее. Признаков эмиссии в спектре не видно. Звезда является прекрасным кандидатом на выполнение доплер-зеemanовского картирования.

Вопрос о наличии ультраслабого магнитного поля у звезд с усиленными линиями металлов (Am-звезд) обсуждается в работе Blazere et al. [29]. Показано, что у Сириуса A, β UMa и θ Leo найдено необычное для магнитных звезд поведение V-параметра Стокса в виде положительного горба. По мнению авторов, этот горб имеет зеemanовскую природу, указывая на наличие у этих трех звезд поля порядка 1 Гс. В приведенной статье не дается реалистичное объяснение полученных результатов, поэтому не исключена возможность того, что горб может иметь и другую, инструментальную причину.

В работе [30] представлены результаты анализа шестилетних спектрополяриметрических наблюдений звезды типа β Cep KSI1 CMa (BIII, HD 46328). Продольное поле изменилось от 340 ± 17 Гс в 2009 г. до 251 ± 3 Гс в 2014 г. Эта высокоточная магнитометрия согласуется с периодом вращения звезды, превышающим 40 лет. Линии поглощения хорошо воспроизводятся в невращающейся модели. Такое торможение могло бы произойти вследствие потери углового момента на магнитосфере, если бы поле на полюсе диполя превышало 6 кГс. Это самая медленно вращающаяся из всех B-звезд.

В работе Сикоры и др. [31] подтверждается, что горячая (B3IV) звезда HD 23478 является магнитной и имеет центробежную магнитосферу, яркую в H α . Проведены 23 измерения магнитного поля, из них 12 — с высоким разрешением на ESPaDOnS и NARVAL и 11 — с низким разрешением на поляриметре DimaPol Доминионской обсерватории. Определены фундаментальные параметры звезды: масса $6 M_{\odot}$, эффективная температура 20 000 К, радиус $2.7 R_{\odot}$, возраст 3 млн лет. Продольное поле равно 2 кГс. Период вращения, 1.05 суток найден по фотометрии спутника HIPPARCOS. Для HD 23478 вычислен Кеплеровский радиус $R(K)$, на котором силы гравитации уравновешиваются

центробежными силами. Он составляет 2.9 солнечных. Вычислен также и радиус Альфвена $R(A)$. Его величина зависит от величины поля на экваторе звезды, радиуса звезды, темпа потери массы в отсутствие поля и других параметров. $R(A)$ равен 19 солнечных. Если $R(A)/R(K) > 1$, то магнитосфера является центробежной. Здесь этот случай явный: отношение равно 13.3. Звезда имеет усиленные линии гелия, а также кремния и железа. У магнитного поля преимущественно дипольная структура с величиной поля на полюсе $B_d = 9.5$ кГс. Вокруг звезды имеется плазма, контролируемая магнитным полем.

3.1.3. Магнитные измерения, выполненные по другим программам

В работе Романиюка и др. [32] приводятся полные результаты измерений магнитных полей звезд, выполненных на 6-м телескопе в 2008 г. Представлены результаты наблюдений 37 химически пекулярных и 4 нормальных звезд Главной последовательности. Обнаружены четыре новые магнитные звезды (HD 25999, HD 35100, HD 96237 и HD 279021), присутствие поля заподозрено еще у двух звезд (HD 2887 и BD $-12^\circ 2366$). Для построения магнитных кривых были продолжены наблюдения шестнадцати прежде известных магнитных звезд. Показано, что ошибки измерений для звезд с узкими и резкими линиями не превышают 10–20 Гс. Систематические инструментальные искажения не выявлены.

В работе [33] представлены результаты спектрополяриметрии трех звезд типа Ae Хербига, выполненной на спектрополяриметре HARPS. Были выбраны объекты с узкими линиями, у которых $v \sin i < 15$ км с $^{-1}$. Ae-звезды Хербига HD 101412, HD 104237 и HD 190073 наблюдались с высокой фотометрической точностью и с высоким спектральным разрешением. У HD 104237 был найден вторичный компонент. Он оказался звездой типа T Tau с магнитным полем $B_z = +129 \pm 12$ Гс, а у главного компонента поле обнаружить не удалось. Наблюдения HD 190073 подтвердили наличие у нее переменного магнитного поля. Показано, что околос звездное окружение оказывает серьезное воздействие на наблюдаемые поляризаационные особенности.

В работе Баньюло и др. [34] представлен каталог измерений магнитных полей по наблюдениям на спектрополяриметре FORS1. Получено 1400 поляризованных спектров 850 объектов с низким спектральным разрешением ($R = 2000$). Спектрополяриметр широко использовался разными группами наблюдателей, которые применяли различные методики наблюдений и обработки данных. Спектры очень многих объектов получены впервые, определен спектральный класс и некоторые другие

параметры. Оценены точности измерений магнитных полей, и показано, что в некоторых работах не полностью были учтены инструментальные погрешности. Делается вывод о том, что FORS1 не является оптимальным инструментом для исследования слабых магнитных полей, но является очень полезным для систематических поисков больших полей, таких, которые обнаруживаются у Ap/Vp-звезд и белых карликов.

Магнитные белые карлики наблюдаются не только на FORS1, но и на 6-м телескопе, и на ESPaDOnS. В работе [35] предложен новый чувствительный метод поиска слабых магнитных полей у белых карликов типа DA, имеющих сильные водородные линии. Это слабые объекты, поэтому для них трудно выполнить высокоточные измерения магнитных полей. В связи с этим вопрос о том, существуют ли магнитные белые карлики с полями ниже 500 кГс, является спорным. Предложен новый метод, заключающийся в измерении поля по V -параметру Стокса в узкого ядра водородной линии $H\alpha$. По сравнению с широкими крыльями наклон профиля линии здесь гораздо выше, что обеспечивает прямо пропорционально более высокий сигнал поляризации. На ESPaDOnS CFHT были проведены наблюдения белого карлика 40 Eri B, и получено стандартное отклонение 85 Гс. Магнитное поле не обнаружено, таким образом, авторы заключают, что продольное поле у него ниже 250 Гс. Это наиболее высокая точность измерений поля белого карлика, достигнутая к настоящему времени.

В рамках проекта BOB [36] на спектрополяриметре FORS2 были исследованы две массивные горячие звезды HD 23478 и HD 345439. Оба объекта являются аналогами магнитной звезды σ Ori E. У HD 23478 по линиям водорода было найдено достаточно сильное продольное поле величиной вплоть до 1.5 кГс и до 1.3 кГс при использовании остального спектра. У HD 345439 поле больше 3σ не обнаружено, но анализ субэкспозиций показывает, что она может иметь быстро меняющееся поле с периодом 88 минут.

3.1.4. Проект BinaMIcS

Проект BinaMIcS (Binarity and Magnetic Interactions in various classes of Stars) [37] нацелен на изучение происхождения магнитных полей звезд в тесных двойных системах. В настоящее время установлено, что часть массивных (более $8 M_\odot$) объектов звездного населения имеют сильные магнитные поля, скорее всего, реликтового происхождения. Детали процесса формирования полей подобного типа до сих пор неясны. Проект BinaMIcS должен стать важным шагом в понимании взаимодействия между двойственностью и магнетизмом в течение эволюции звезды, так как направлен

на изучение магнитных свойств близких двойных систем. Наиболее правдоподобно предположение, что компоненты таких систем формируются вместе, в одно и то же время, в одной и той же окружающей среде. Предполагается, что основные наблюдения будут получены на спектрографах ESPaDOnS и NARVAL. Автор обзора считает нужным отметить, что результаты магнитных наблюдений и спеклинтерферометрии на 6-м телескопе также активно будут использоваться при реализации проекта VinaMIS.

В рамках проекта VinaMIS уже получены первые результаты — обнаружено магнитное поле у обоих компонентов В-звезды ϵ Lupi (HD 136504). Главный компонент (B2V) этой SB2-системы уже был ранее известен как магнитная звезда с продольным полем -200 Гс. В работе [38] найдено магнитное поле вторичного компонента (B3V), равное $+100$ Гс. Наблюдения были проведены на Канадо-Франко-Гавайском телескопе с ESPaDOnS. Они могут быть описаны моделью, в которой предполагается, что магнитные оси двух звезд ориентированы в противоположных направлениях и примерно параллельны соответствующим осям вращения. Определены радиусы обеих звезд, величина которых указывает на то, что магнитосферы компонентов могут быть взаимодействующими.

Магнитное поле еще одной звезды, HD 5550, было обнаружено в ходе выполнения проекта VinaMIS [39]. Это спектрально-двойная система, состоящая из двух А-звезд. Наблюдения проведены на спектрополяриметре NARVAL. Было обнаружено, что один из компонентов — Ар-звезда с очень слабым магнитным полем (на полюсе диполя 65 Гс). Компаньон — Ам-звезда, у которой магнитное поле не обнаружено. Система очень тесная, вращение главного компонента синхронизовано с орбитальным, однако полностью система не синхронизировалась до настоящего времени. По-видимому, она молодая.

3.2. Топология магнитного поля и пятен химического состава CP-звезд

В работе Кочухова и др. [40] изучена топология магнитного поля и распределение пятен химического состава уникальной Ар-звезды HD 75049. Эта звезда имеет поверхностное магнитное поле 30 кГс — одно из сильнейших для невырожденных объектов. Авторами была проведена серия спектрополяриметрических наблюдений с высоким разрешением на спектрографе HARSPol, и данные были интерпретированы с использованием программ доплер-зеemanовского картирования и моделей атмосфер, в которых учитывается несолнечный химический состав и сильное магнитное поле. В результате измерений и моделирования

был с высокой точностью найден период вращения звезды $4^d048267$ и уточнены фундаментальные параметры: $T_{\text{eff}} = 10\,250$ К, $\lg g = 4.3$. Топология магнитного поля звезды полоидальна с доминирующим вкладом дипольной компоненты. Пик поверхностного поля равен 39 кГс. В то же время наблюдаются существенные отклонения от классической осесимметричной дипольной конфигурации. Построены карты распределения различных химических элементов по поверхности. Si, Cr, Fe и Nd показывают усиление на 0.5–1.4 порядка. Nd концентрируется вблизи магнитных полюсов, в то время как Si and Cr — преимущественно в области магнитного экватора. Железо имеет две слабоконтрастные особенности как на полюсах, так и на экваторе. В целом морфология поля и свойства химических пятен в HD 75049 качественно согласуются с таковыми для звезд с меньшей величиной поля.

Для холодной Ар-звезды HD 24712 были построены трехмерная магнитная модель и карта распределения химических элементов (Русомаров и др. [41]). В наблюдениях на HARSPol получены все четыре параметра Стокса в разных фазах периода вращения звезды. Для интерпретации данных использовалась программа доплер-зеemanовского картирования INVERS10, позволяющая одновременно выполнить картирование химических элементов и найти геометрию магнитного поля. Сильный сигнал поляризации (линейной и круговой) был найден в линиях Fe I, Fe II, Nd III и Na I. Магнитные карты удачно воспроизводят данные наблюдений. Анализ показывает, что магнитное поле HD 24712 имеет преимущественно дипольную компоненту с небольшим вкладом гармоник более высокого порядка. В поверхностном распределении железа и кальция наблюдается повышенное их обилие около магнитного экватора и некоторый дефицит в области видимого положительного полюса, где значительно увеличивается содержание Nd. На концентрируется вокруг ненаблюдаемого отрицательного полюса. Карты распределения элементов не согласуются с современными теоретическими вычислениями атомной диффузии в присутствии магнитного поля.

Развитие техники наблюдений, в частности, появление мультилинейных методов обработки данных, необходимых для регистрации очень слабых полей, требует адекватного отражения и в методах моделирования. Много в этом направлении было сделано Олегом Кочуховым. В работе [42] он исследует вопрос диагностики магнитных полей по кумулятивному циркулярно поляризованному профилям. Подавляющая часть информации о топологии звездных магнитных полей получена преимущественно из наблюдений циркулярно поляризованных линий с высоким спектральным разреше-

нием. Поскольку профили имеют сложную форму, они интерпретируются с помощью инверсной методики, такой как доплер-зеemanовское картирование. Кочухов [42] развивает новый метод картирования с использованием кумулятивных профилей V -параметров Стокса. Метод протестирован на двух звездах, для которых ранее было выполнено доплер-зеemanовское картирование по отдельным линиям. В частности, для звезды HD 37776 данные согласуются с полученными по ZDI, но противоречат популярной гипотезе, что в магнитном поле этой звезды доминирует осесимметричный квадрупольный компонент.

В работе [43] обсуждается топология магнитного поля и химический состав Ар-звезды HD 32633. Предыдущие наблюдения показали, что ее магнитное поле необычайно сложное и не может быть описано простой дипольной структурой. В указанной работе построены магнитные карты и карты распределения химических элементов на основании данных, полученных при наблюдениях четырех параметров Стокса на спектрополяриметрах ESPaDOnS и NARVAL. Карты построены с помощью программы INVERS10. Они показывают, что HD 32633 имеет сильное магнитное поле с двумя большими областями противоположной полярности, но сильно отличающееся от простой дипольной модели. Разложение на сферические гармоники показывает, что поле полоидально, с гармониками равными 1 и 2 и малым вкладом тороидальной компоненты. В то же время поле не может быть описано дипольной или дипольной плюс квадрупольной геометрией. Построены карты распределения химических элементов Mg, Si, Ti, Cr, Fe, Ni и Nd. Авторы установили, что элементы железного пика показывают примерно одинаковое распределение, но они не смогли найти выраженную корреляцию с топологией магнитного поля.

В работе [44] проведено моделирование атмосферы и магнитосферы звезды σ Ori E. Были использованы спектрополяриметрия высокого разрешения и MDI-методика. Это позволило одновременно определить магнитную конфигурацию, которая является преимущественно дипольной с величиной поля на полюсе около 7.5 кГс и малым вкладом неосесимметричной квадрупольной составляющей, и распределение He, Fe, C и Si по поверхности. На основании спектральных наблюдений была синтезирована кривая блеска. Результирующая расчетная эмиссия в H α и широкополосные фотометрические данные в целом согласуются с наблюдениями, но не во всех деталях. Включение в вычисленную фотометрию модуляции яркости не приводит к улучшению согласия между наблюдаемой и вычисленной фотометрией. Делается заключение, что разногласия не могут быть объяснены неоднородностью поверхности звезды.

Для улучшения соответствия модели жестко вращающейся магнитосферы результатам наблюдений звезд такого типа необходимо учитывать в расчетах дополнительные физические процессы.

Выполнялись и более простые реконструкции магнитных полей звезд. Например, Глаголевский и Назаренко [45] построили модели одиннадцати химически пекулярных звезд, используя развитый ими метод «магнитных зарядов.» Во всех случаях поле можно описать набором диполей.

3.3. Возраст и эволюция химического состава CP-звезд

В работе [46] определен возраст шести А-звезд в близкой движущейся группе звезд Большой Медведицы. Использовалась интерферометрия CHARA. По крайней мере четыре из этих звезд быстро вращаются ($v \sin i \gg 170 \text{ км с}^{-1}$) и должны быть сплюснутыми. Эти интерферометрические измерения были использованы для построения сплюснутой модели атмосферы, из которой были найдены радиусы и температура. Сравнение результатов с эволюционными звездными моделями MESA позволило определить массу и возраст этих объектов. Возраст группы UMa по такой независимой оценке составляет 490 млн лет, и это согласуется с предыдущими измерениями.

Бэйли и др. [47] обнаружили вековую эволюцию обилия элементов в атмосферах Ар-звезд. Для звезд промежуточных масс ($3.5 M_{\odot}$) найдено, что: 1) содержание легких элементов (O, Mg, Si) не меняется с возрастом: по сравнению с Солнцем кислород и магний в недостатке, а кремний всегда в сверхобилии; 2) содержание элементов железного пика и редких земель падает; 3) обилие гелия с возрастом неожиданно увеличивается от 1% до 10% солнечного содержания, и причина этого роста непонятна.

В работе [48] выполнен детальный анализ магнитного поля и химического состава CP-звезды HD 94660 на основе спектров высокого разрешения, полученных на спектрографах UVES, HARPSpol and ESPaDOnS. С использованием программы синтеза ZEEMAN выполнен анализ содержания семнадцати элементов. Используя измерения как продольной компоненты поля B_e , так и поверхностного поля B_s , авторы построили модель, состоящую из дипольной, квадрупольной и октупольной компонент. Наблюдаемая переменность магнитного поля HD 94660 сложная, распределение химических элементов неоднородное, с сильным переизбытком элементов железного пика и редкоземельных элементов. Видна вертикальная стратификация элементов. Найдена переменность лучевых скоростей с периодом порядка 840 суток,

что указывает на двойственность источника. Спутник должен быть массивным и компактным, что наблюдается впервые для магнитных звезд.

На примере Вр-звезды HD 133652 Бэйли и Ландстрит [49] обсуждают вопрос о том, как меняется магнитное поле и содержание химических элементов Ар/Вр-звезд во время их жизни на Главной последовательности. Данные, полученные на спектрополяриметре ESPaDOnS и спектрографе FEROS, были использованы для построения простой модели магнитного поля и определения содержания химических элементов: He, O, Mg, Si, Ti, Cr, Fe, Pr и Nd. Для анализа содержания использовалась программа ZEEMAN. Спектральный синтез выполнен с учетом магнитного поля. Структура поля аппроксимирована простым коллинеарным мультиполярным приближением. Содержание каждого элемента рассчитывалось отдельно для каждой полусферы. Его анализ показывает, что все элементы (за исключением He, O и Mg) находятся в переизбытке. Разница в их содержании в двух полусферах не обнаружена. Индивидуальные профили линий очень сложные и демонстрируют мелкомасштабную структуру переменности на звездной поверхности. Таким образом, HD 133652 является еще одним объектом в увеличивающемся списке горячих Вр-звезд с известным возрастом, для которого проведен подобный анализ.

В работе Перро и др. [50] изучаются фундаментальные параметры Ар-звезды 78 Vir и обсуждается вопрос о быстрых осцилляциях в ее атмосфере. Получены уникальные по точности интерферометрические наблюдения с длинной базой в видимой области спектра. Авторы наблюдали 78 Vir при помощи визуального оптического спектрографа VEGA, установленного в комбинированном фокусе оптического интерферометра с длинной базой CHARA. С очень высокой точностью ($0.346 \pm \pm 0.006$ mas) был найден угловой диаметр и соответствующий линейный радиус $R = 2.11 \pm 0.04 R_{\odot}$, светимость $L = 27 \pm 2 L_{\odot}$ и $T_{\text{eff}} = 9100 \pm 190$ K. Это один из редких примеров, когда удалось прямо измерить радиус Ар-звезды. Найдено, что звезда может быть кандидатом в гоАр-звезды, поэтому необходимо получить для нее астросейсмические данные.

3.4. Химический состав и поиски CP-звезд за пределами Галактики

3.4.1. Анализ химического состава

В ряде работ Виктора Халака, например [51, 52], представлен проект VeSElKa. В нем предлагается массовое определение эффективных температур,

ускорений сил тяжести, химического состава и возможной стратификации элементов, лучевых скоростей и других параметров атмосфер слабо изученных CP-звезд. Сетка моделей атмосфер вычисляется программой PHOENIX. Наблюдения предполагается выполнять на CFHT. В первый список для наблюдений отобрано шестнадцать звезд.

А в работе [53] приведены первые результаты проекта — выполнен анализ химического состава четырех пекулярных звезд: HD 71030, HD 95608, HD 116235 и HD 186568. Наблюдения получены на спектрополяриметре ESPaDOnS CFHT. Найдено веское доказательство существования стратификации железа в атмосферах HD 95608 и HD 116235. Хром также показывает градиент содержания в верхней атмосфере указанных звезд. Проявлений стратификации для HD 71030 и HD 186568 нет.

В работе [54] исследована химически пекулярная звезда HD 49310 с использованием результатов наблюдений, полученных с помощью спутника COROT. Высококачественная фотометрия выполнялась на протяжении 25 суток практически непрерывно. Этот анализ напоминает спектроскопическое доплеровское картирование, но это не томографический метод. Авторам удалось воссоздать кривую блеска при условии, что на поверхности звезды имеется шесть стационарных круглых ярких пятен. Они определили физические параметры HD 49310 и ее положение на диаграмме Герцшпрунга—Рессела. Была исследована также возможная связь звезды с близким молодым рассеянным скоплением NGC 2264. Найден период $P = 1^{\text{d}}91909 \pm 0.00001$. Пятна оказались на 40% ярче невозмущенной поверхности, три из них очень большие — до 40° в диаметре. В итоге сделан вывод о том, что HD 49310 — классическая кремниевая CP2-звезда с массой около $3 M_{\odot}$. Звезда не является членом скопления NGC 2264.

Монье и др. [55] обнаружили четыре новых HgMn-звезд: HD 18104, HD 30085, HD 32867 и HD 53588. Спектры с разрешением $R = 75\,000$ получены на спектрографе SOPHIE. Несколько линий Hg II, Mn II и Fe II были синтезированы с использованием модели атмосферы и программы спектрального синтеза SYNPEC48, включающей расчеты сверхтонкой структуры различных изотопов. Проведено сравнение синтетических спектров с наблюдаемыми и определено содержание разных элементов. В указанных выше четырех звездах найдено повышенное содержание Hg и Mn.

Эрдин и др. [56] рассмотрели, как пекулярные звезды представлены в обзоре 2MASS. В нем проведено множество фотометрических измерений звезд в близкой ИК-области. Авторы изучили отличия пекулярных звезд от нормальных. Для своего

анализа они сформировали две выборки: в первой оказалось 622 CP-звезды, а во второй — 639 нормальных (непекулярных) A- и B-звезд. Были построены изохроны, и также выполнен анализ, который показал, что различия астрофизических параметров между объектами этих выборок не найдены. Следовательно, используя только фотометрические цвета 2MASS, обнаруживать CP-звезды невозможно.

Михайлитская [57] изучала редкие земли в атмосфере гоAr-звезды HD 134214. Представлены результаты анализа редкоземельных и некоторых других элементов.

3.4.2. Магнитные звезды за пределами Галактики

Уже возможны наблюдения самых ярких магнитных звезд за пределами Галактики. Отличительной их чертой является регулярная периодическая переменность. В работе [58] был определен период фотометрической переменности первых кандидатов в магнитные звезды в Магеллановых облаках, где было заподозрено пять Of?p-звезд. Так как все Of?p-звезды в нашей Галактике имеют сильные магнитные поля и модулированные вращением фотометрические и спектральные изменения с периодами от недель до нескольких лет, в указанной работе авторы решили проверить фотометрическое поведение рассматриваемых объектов. Они обнаружили переменность всех пяти кандидатов на шкале времени от одной недели до более чем четырех лет, включая четкие периодические изменения для трех из них. Все спектральные характеристики аналогичны тем, которые наблюдаются в Галактике. Это подтверждает идею о том, что эти объекты являются O-звездами с сильным магнитным полем.

В работе Вальборна и др. [59] выполнен спектральный мониторинг двух кандидатов в Of?p-звезды в Малом и одной — в Большом Магеллановых Облаках. Все три звезды показывают спектральные особенности, типичные для Of?p-звезд Галактики. Теперь нужна спектрополяриметрия для поиска магнитного поля.

3.5. Вращение и быстрая переменность

3.5.1. Вращение CP-звезд

В работе [60] Матис исследует очень медленное вращение магнитных Ar-звезд. Давно установлено, что пекулярные звезды вращаются со скоростью в 3–4 раза меньшей, чем нормальные звезды той же температуры. Но имеются еще и сверхмедленные ротаторы. На данный момент известно 33 магнитных Ar-звезды с периодом вращения более 30 суток. Это существенная доля Ar-звезд, период которых достоверно установлен. Пять объектов

из них имеют периоды более 1000 суток. Исходя из зависимости между периодом и количеством магнитных звезд, автор считает, что будут найдены звезды, период вращения которых будет достигать 300 лет, а в некоторых случаях и 1000 лет. Модель наклонного ротатора, безусловно, справедлива. Пять или шесть порядков величины, охватывающих периоды вращения Ar-звезд, дают уникальный шанс для понимания их происхождения и эволюции. Разные теории формирования магнитного поля дают разные зависимости между величиной поля и скоростью вращения звезды, что можно проверить путем наблюдений.

Романюк и др. [61] провели мониторинг магнитного поля химически пекулярной звезды HD 965. На протяжении 2000–2015 гг. на 6-м телескопе были получены более 30 спектров с зеемановским анализатором. Продольное поле достигло положительного экстремума (+600 Гс) в 2005 г. и прошло отрицательный экстремум (–1300 Гс) в 2015 г. Данное исследование показывает, что период магнитной переменности (т.е. период вращения звезды) превышает 15 лет. Таким образом, HD 965 входит в пятерку наиболее медленных ротаторов среди магнитных CP-звезд.

3.5.2. гоAr-звезды

гоAr-звезды — это химически пекулярные звезды спектральных классов, близких к F0, которые показывают быструю переменность блеска и спектра. Абсолютное большинство из них обнаружено на южном небе. Паунзен и др. [62] закончили фотометрический обзор в обсерватории Hvar, целью которого было обнаружение новых быстро пульсирующих гоAr-звезд на северном небе. В результате не было найдено ни одной такой новой звезды.

В работе [63] изучены кратковременные вариации частоты и амплитуды пульсаций гоAr-звезды HD 217522. В 1981 г. у нее были найдены пульсации с частотой $\nu_1 = 1.21529$ мГц. Наблюдения 1989 г. показали наличие дополнительной частоты $\nu_2 = 2.0174$ мГц. Новые наблюдения 2008 г. подтвердили присутствие моды $\nu_2 = 2.0174$ мГц. Перепроверка данных 1989 г. показала наличие модуляции амплитуды на шкале времени порядка суток, что значительно короче, чем наблюдалось у других гоAr-звезд. Спектральные наблюдения на VLT в 2008 г. с высоким разрешением подтвердили наличие частоты ν_2 и кратковременной модуляции амплитуды лучевой скорости в редкоземельных элементах. Авторы интерпретируют изменения в частоте ν_1 в промежутке между данными 1981 и 1989 гг. как часть общей переменности, наблюдаемой у этой звезды на многих частотах.

Адельман и Джонс [64] продолжают изучать переменность магнитных CP-звезд, используя

Стремгеновскую *uvby*-фотометрию на автоматических фотометрических телескопах FCAPT. Обнаружена фотометрическая переменность нескольких объектов. Особо интересна переменность двух звезд: HD 5797, у которой вариация в фильтре *v* наименьшая, и ее период составляет половину периода, найденного в других фильтрах, и HD 49713, у которой периодограмма в фильтре *u* показывает сильный пик в третьей гармонике в противовес очень асимметричной кривой блеска.

Обзор лучевых скоростей на спектрополяриметре HARPS (La Silla, Chile) провели Хартман и Хатзес [65]. Была обнаружена первая спектрально-двойная звезда HD 42659, одним из компонентов которой является быстро осциллирующая Ар-звезда. До настоящего времени не была найдена ни одна гоАр-звезда среди спектрально-двойных, в то время как неосциллирующих Ар-звезд в двойных обнаружено великое множество. Были выполнены наблюдения 65 химически пекулярных звезд в период с 2004 по 2009 гг. Лучевые скорости измерялись при помощи нового программного обеспечения, называемого HARPS-TERRA, основанного на корреляции каждого индивидуального спектра с высоким отношением S/N для каждой звезды. В частности, для HD 42659 был найден период переменности лучевой скорости равный 93.2 суток и полуамплитудой 11.85 км с^{-1} , что интерпретируется как двойственность. В то же время звезда принадлежит группе гоАр-звезд. Авторы нашли, что спутник имеет массу $0.47 M_{\odot}$, орбита слегка эксцентрична ($e = 0.146$) с разделением 0.55 а.е. Таким образом, HD 42659 — первая подтвержденная спектрально-двойная с относительно близкой орбитой. Это показывает, что тесное взаимодействие в двойных системах обязательно препятствует пульсациям в Ар-звездах.

У яркой длиннопериодической Ар-звезды KIC 4768731, наблюдавшейся с помощью спутника Kepler, Смолли и др. [66] нашли осцилляции. KIC 4768731 (HD 225914) — относительно яркая ($V = 9.17$) звезда, имеет период вращения 5.21 суток. Другие физические параметры: $T_{\text{eff}} = 8100 \pm 200 \text{ К}$, $\lg g = 4.0 \pm 0.2$, $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.31 \pm 0.24$ и $v \sin i = 14.8 \text{ км с}^{-1}$. Линии Sr, Cr, Eu, Mg и Si наиболее сильные, когда звезда наиболее яркая, в то время как Y и Ba меняются в противофазе с другими элементами. Авторами найдены осцилляции с частотой 711.2 мГц (23.4 мин.) и амплитудой 62.6×10^{-6} зв. вел. Судя по литературным данным, лучевые скорости за 30 лет исследований сильно изменились. Однако в представленной работе за четыре года наблюдений изменений проекции лучевой скорости на луч зрения не видно.

Првак и др. [67] промоделировали магнитную переменность CP-звезды φ Dra. Моделирование велось в предположении неравномерного распределения тяжелых элементов по поверхности и при сравнении с наблюдаемой переменностью звезды. Использовалась сетка моделей TLUSTY и код SYNSPES. Получено, что синтетические кривые блеска в УФ и видимой областях находятся в очень хорошем согласии с наблюдениями. Уточнен период вращения ($P = 1^{\text{d}}716500$). Таким образом, мы видим, что неравномерное распределение элементов, перераспределение потоков из ультрафиолета в визуальную область и вращение являются вполне достаточными условиями для объяснения переменности звезды в видимой и близкой ультрафиолетовой областях спектра. Перераспределение потока в основном вызывается связанно-свободными (bound-free) переходами кремния и связанно-связанными (bound-bound) переходами железа.

4. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ПЕРЕМЕННОСТЬ ЗВЕЗД, РОДСТВЕННЫХ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫМ

4.1. Картирование поверхности холодных звезд

В работе [68] обсуждаются первые результаты доплер-зеemanовского картирования холодных звезд с использованием четырех параметров Стокса. Поскольку линейную поляризацию очень трудно обнаружить, основные данные о сложных магнитных полях этих объектов получены после анализа круговой поляризации. Тем не менее, анализ показывает, что включение линейной поляризации позволяет избежать многих ложных интерпретаций полученных особенностей. В работе проведены наблюдения четырех параметров Стокса звезды типа RS CVn II Peg для двух разных эпох. Это первое изучение холодных активных звезд методом ZDI. Анализ показал, что поле сильно структурировано для обеих эпох. Степень некоторых особенностей увеличивается в два, а то и в четыре раза, если принимать во внимание данные линейной поляризации. Полная магнитная энергия такой реконструированной карты также в 2–4 раза сильнее. Увеличивается и общая сложность поля. На расстоянии нескольких звездных радиусов поле ослабевает так же, как и крупномасштабный компонент поля.

В работе [69] рассмотрено доплеровское картирование звезды LQ Hydrae в 1998–2002 гг. Это активная звезда типа BY Dra. Было проведено доплеровское картирование с использованием инверсного кода для построения температурных карт. В работе представлены новые температурные карты в целом для семи сезонов. Авторы не нашли признаков активных долгот. Пятенная активность

концентрируется в двух широтных областях. Используя принятый ими период вращения, авторы предположили, что пятенная структура меняется с большим периодом. Было сделано заключение, что долгопериодическая активность LQ Hya более хаотична, чем у ранее изученных подобным методом двойных звезд.

В работе [70] исследована долговременная эволюция крупномасштабного магнитного поля холодных карликовых звезд с помощью ZDI-методики. В выборку вошли 104 магнитные карты для 76 объектов: от аккрецирующих звезд, не достигших Главной последовательности, до объектов ГП, покрывающих интервал возрастов от 1 миллиона до 10 миллиардов лет. Имеются доказательства работы линейного динамо, в котором поверхностное магнитное поле линейно зависит от угловой скорости. Этот тренд, который авторы нашли по ZDI, соответствует тренду, полученному по зеемановскому уширению линий. Такое сходство означает, что крупномасштабные и мелкомасштабные поля генерируются одним и тем же механизмом динамо. Показанный результат дает важные наблюдательные сведения о работе механизма динамо в маломассивных холодных звездах.

В работе [71] сообщается об обнаружении магнитного поля у звезды типа δ Sct HD 188774 из списка объектов спутника Kepler. На спутнике Kepler проводятся высокоточные исследования переменности этих звезд с целью определить, является ли она результатом двойственности или вращения неоднородной поверхности в присутствии магнитного поля. HD 188774 демонстрирует гибридную переменность с большим набором разных частот. Один из периодов составляет 2.9 суток. Авторы решили проверить наличие магнитного поля у этого объекта. Наблюдения были проведены на спектрографе ESPaDOnS. Анализ данных выполнен стандартным образом с использованием метода LSD. Были найдены явные зеемановские особенности в профилях V -параметра Стокса. Продольное поле составляет 75 ± 13 Гс. Авторы считают, что низкие частоты в гибридной переменности вызваны вращением запятненной звезды.

В работе [72] сообщается о первом обнаружении магнитного поля у *post-AGB*-звезд U Mon и R Sct. Ранее некоторые исследования показали наличие магнитного поля в околозвездных оболочках, джетах и выбросах из *post-асимптотических* гигантских звезд и планетарных туманностей. Для проверки этого факта авторами были выполнены новые спектрополяриметрические наблюдения на спектрографах ESPaDOnS и NARVAL. Из семи наблюдавшихся объектов две звезды типа RV Tau

(U Mon and R Sct) продемонстрировали четкие зеемановские особенности. Магнитное поле определено методом LSD и составляет 10.2 ± 1.7 Гс для U Mon и 0.6 ± 0.6 Гс для R Sct. Это первое обнаружение магнитного поля на уровне 10 Гс для *post-AGB*-звезд.

В работе [73] изучаются магнитные поля активных одиночных G–K-гигантов. На ESPaDOnS и NARVAL выполнены наблюдения 48 красных гигантов. Измерены также их классические S -индексы, индикаторы магнитной активности по линиям H и K Ca II и лучевые скорости. Однозначно обнаружено магнитное поле у 29 из 48 красных гигантов общей выборки. Зеемановские особенности есть у всех 24 красных гигантов с сильными S -индексами и у 6 из 17 ярких гигантов. Однако магнитное поле не было найдено ни у одного из семи неправильных гигантов. Детальное изучение 16 гигантов с известными периодами вращения показало, что измеренное магнитное поле тесно коррелирует со характеристиками вращения, в частности, с периодом вращения и числом Россби Ro . Данные исследования показывают, что эти поля генерируются механизмом динамо. Те четыре звезды, у которых магнитное поле намного больше, чем это следует из зависимости «период–поле», рассматриваются как потомки магнитных Ар-звезд. Субгауссные магнитные поля были обнаружены у гиганта Поллукса и четырех ярких гигантов (Альдебаран, Альфард, Арктур и η Psc). Наряду с Арктуром, они не рассматривались ранее как активные гиганты.

Саванов [74] проанализировал свойства активных областей (холодных пятен) на поверхности 279 звезд спектрального класса G, для которых было открыто 1547 супервспышек на основании фотометрии, полученной со спутника Kepler. Главный вывод автора исследования состоит в количественной оценке повышенной запятненности поверхности звезд со супервспышечной активностью, которая свидетельствует об увеличенной магнитной активности этих объектов. Кроме того, сделано заключение о том, что звезды с супервспышками не обладают выделяющими их из общего массива данными параметрами дифференциального вращения. В результате анализа нескольких десятков вспышек, зарегистрированных у пяти звезд, следует, что для одной и той же звезды при малых изменениях запятненности S могут достигаться значительные изменения энергии. На примере объекта KIC 10422252 показано, что при изменении параметра S в шесть раз происходили изменения энергии вспышек на порядки.

В работе [75] изучаются магнитные поля молодых звезд солнечного типа HD 35296 и HD 29615. Спектрополяриметрия была выполнена на TBL и на англо-австралийском телескопе. Обе звезды

показывают переменность с вращением и имеют сложное крупномасштабное поле с существенной тороидальной компонентой. Для обеих звезд отмечена большая степень дифференциального вращения.

В статье [76] исследуется геометрия магнитного поля молодой звезды солнечного типа HN Pegasi (HD 206860). Это звезда спектрального класса G0, молодой аналог Солнца. Реконструкция магнитного поля выполнялась методом ZDI для шести наблюдательных эпох, покрывающих семь лет. По измерениям потока в ядрах спектральных линий-индикаторов была также исследована хромосферная активность и ее вариации. Результат следующий: магнитная топология HN Peg имеет сложную и переменную геометрию. В то время как радиальное поле показывает стабильную положительную полярность магнитной области на полюсах в каждую наблюдаемую эпоху, азимутальное поле сильно переменное по величине. Это поле исчезает в середине временного диапазона наблюдений, появляясь снова в две последних эпохи. Среднее магнитное поле вычислялось по магнитным картам, и оно следует тому же тренду — минимум поля приходился на эпоху 2009.54. Суммируя все данные, можно утверждать, что HN Peg обладает слабым продольным магнитным полем, меняющимся от -14 Гс до $+13$ Гс; более долговременный тренд отсутствует.

4.2. Картирование поверхности горячих нормальных звезд

Кочухов и Вэйд [77] изучили магнитную топологию звезды τ Sco. Это ранняя В-звезда с необычно сложным магнитным полем, но имеющим слабую величину. Его топология ранее изучалась методом ZDI путем моделирования профилей V -параметра Стокса. Здесь авторы выполнили новую реконструкцию геометрии поля. Были использованы старые наблюдения и два метода моделирования: общее гармоническое разложение и прямое попиксельное воспроизведение поля. Удалось воспроизвести ранее полученные карты, из которых следует, что в магнитное поле τ Sco сравнимый вклад вносят полоидальная и тороидальная компоненты. Найдено, что V -параметр Стокса нечувствителен к разным методам реконструкции, дающим разные карты. Однако линейная поляризация будет отличаться, поэтому единственный способ построить модель поля — использовать данные о Q - и U -параметрах Стокса этой звезды.

В работе [78] найдены пятна на Вега. Авторы предполагают, что это первое спектроскопическое обнаружение структуры поверхности у нормальной А-звезды. Вега много раз исследовалась с очень высокой точностью. Недавно у нее было найдено

очень слабое поле, но структурные детали поверхности ранее не проявлялись. С этой целью был проведен спектральный мониторинг с высоким разрешением и высоким отношением S/N в течение пяти ночей подряд (со 2 по 6 августа 2012 г.). Использовались несколько методов анализа данных. В результате были обнаружены очень слабые по контрасту (порядка 10^{-3}) пятна. Определенный по ним период вращения 0.68 суток совпадает с результатами предыдущих спектрополяриметрических измерений. Большинство пятен локализовано в экваториальной области. Пока непонятно, то ли это очень тонкий конвективный слой, который генерирует слабое поле, то ли надо привлекать новый механизм для объяснения активности в атмосфере Веги.

4.3. Химический состав и переменность

Халак и др. [79] провели спектральный анализ и определили содержание элементов у post-HB-звезды HD 76431. Найдено повышенное на 0.5 порядка содержание гелия. Углерод и азот показывают вертикальную стратификацию. Содержание углерода увеличивается с глубиной. Это первое обнаружение стратификации у горячей post-HB-звезды, и на сегодня это самая горячая звезда со стратификацией. Кроме того, в спектре впервые обнаружены эмиссии в линиях Si III и Ti III.

Габдеев [80] провел фотометрический мониторинг кандидатов в поляры. Представлены результаты фотометрических наблюдений двух таких объектов: IRHAS J052832.69+283837.6 и 1RXS J073346.0+261933. Оба объекта показывают переменность блеска с орбитальным периодом с амплитудой, близкой к 1^m , и на длительной шкале времени с амплитудой, близкой к 0^m5 . Долговременные наблюдения позволили определить орбитальный период первой системы и уточнить орбитальный период второй, они оказались равны 0^d055 и 0^d139 соответственно. Анализ фотометрических данных подтверждает, что эти системы могут быть полярами.

5. КРАТНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЗВЕЗДЫ; ЭКЗОПЛАНЕТЫ В СИСТЕМЕ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД

5.1. Новые каталоги двойных магнитных звезд

На 6-м телескопе САО РАН ведутся систематические спекл-интерферометрические наблюдения с целью поиска близких спутников у магнитных CP-звезд. Для наблюдений доступны объекты ярче двенадцатой звездной величины в визуальной области спектра. Предел разрешения около 20

угловых миллисекунд. В работах [81, 82] опубликованы два онлайн каталога. В них представлены результаты измерений около 60 Ар/Вр-звезд. Исследования показали, что в среднем спутник на 3–4 величины слабее в случае, если главный компонент — А-звезда, а в случае В-звезд разница в блеске меньше — 1–2 звездные величины.

5.2. Поиски экзопланет в системах магнитных звезд разных типов

Поиск экзопланет в настоящее время — одно из наиболее популярных направлений в астрофизических наблюдениях. Ежегодно публикуются сотни статей с результатами наблюдений и теоретических расчетов. Мы не будем в обзоре затрагивать столь обширную тему. Проанализируем лишь несколько работ, в которых поиски планет ведутся у магнитных звезд. В частности, уделим внимание первым работам на эту тему, выполненным в России.

Саванов [83] исследовал холодные пятна на поверхности звезд, обладающих планетными системами по данным космического телескопа Kepler. Проанализированы свойства активных областей (холодных пятен) на поверхности 737 звезд, обладающих планетными системами (экзопланетами). Рассмотрены три метода определения площади запятненности (S) поверхности звезд. Не найдены указания на то, что магнитная активность звезды с экзопланетами имеет выраженные особенности, отличающие ее от активности звезд более обширной выборки. Запятненность звезд с планетными системами в подавляющем большинстве случаев не превосходит 5% от площади их поверхности. Среди звезд с эффективными температурами менее 5750 К и периодами вращения до 10 суток отсутствуют звезды с малыми величинами S (менее 0.002). Звезды с эффективными температурами более 5750 К имеют очень малую запятненность при быстром вращении, но S возрастает для объектов с периодами вращения 20–25 суток.

Валеев и др. [84] привели результаты фотометрических исследований магнитного белого карлика WD 0009+501. Наблюдения проводились на телескопах метрового класса Специальной и Крымской астрофизических обсерваторий. Обнаружена регулярная переменность блеска в фильтре V с периодом $P = 8^h$. Амплитуда переменности постоянна на временах более двух лет и составляет $\pm 1^m$. Результат интерпретируется в рамках вращательно-модулированной переменности магнитных свойств атмосферы этой звезды. Обсуждается также возможность переменности за счет присутствия планетных спутников у звезд этого класса.

В работе [85] исследуется магнитная активность и структура поля солнечноподобной звезды HD 1237 с планетной системой. Наблюдения

были выполнены на спектрополяриметре HARPS. Найдены доказательства наличия вращательной модуляции в измерениях продольной компоненты магнитного поля, в согласии с проведенным ZDI-анализом, с периодом около семи суток. Использовалась LSD-методика обработки данных. Реконструированная магнитная карта показывает достаточно сильное (величиной +90 Гс) распределение азимутального поля кольцеподобной структуры и сложное радиальное поле на средних широтах (порядка 45°). Такая же магнитная карта была получена по наблюдениям, проведенным через пять месяцев. В будущих работах будет исследовано, как подобное распределение поля на поверхности влияет на магнитное поле короны и расширенное окружение этой звезды с планетной системой.

Донати и др. [86] исследовали активность и горячие юпитеры молодых солнц. Были проведены спектрополяриметрические и фотометрические наблюдения звезд типа Т Тау со слабыми линиями (wTTs) V 819 Tau и V 830 Tau на спектрополяриметре ESPaDOnS. При возрасте порядка 3 млн лет обе звезды потеряли свой диск недавно, это интересные объекты для изучения проблемы формирования планет. Были построены магнитные карты и карты распределения яркости для обеих звезд. Найдено, что крупномасштабное магнитное поле V 819 Tau и V 830 Tau преимущественно полоидальное и может быть аппроксимировано диполем с величиной поля 350–400 Гс, наклоненным на 30° к оси вращения. Реконструкция карт яркости показывает, что пятна холодные, а факелы теплые. Дифференциальное вращение слабое, примерно в четыре раза меньше, чем у Солнца. Найдены слабые колебания лучевой скорости с амплитудой 33 м с^{-1} для V 819 Tau и 104 м с^{-1} для V 830 Tau. Эти данные указывают на возможность присутствия горячего юпитера на орбите вокруг V 830 Tau, но для подтверждения данного факта требуются дополнительные исследования. Следы гигантской планеты рядом с V 819 Tau не найдены.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели важнейшие работы, выполненные в области изучения звездного магнетизма, опубликованные в 2015 г. Видим, что, как и прежде, основной наблюдательный материал получен на спектрополяриметрах ESPADONS, NARVAL и HARPSpol. Высокое разрешение получаемых спектров достаточно для того, чтобы реализовать метод зееман-доплеровского картирования с целью изучения топологии поля и составления карт распределения пятен химического состава. Применение мультилинейных методов анализа для медленно вращающихся звезд, не имеющих делителей в линиях, позволяет достигать очень высокой

кумулятивной точности измерений и обнаруживать у этих объектов поля слабее 10 Гс.

Продолжались систематические поиски новых магнитных звезд на 6-м телескопе, в частности, в ассоциации молодых звезд Орион OB 1. Найдена звезда с усиленными линиями кремния HD 34736 с уникальными параметрами. Для ее дальнейшего изучения объявлена международная программа наблюдений.

Появляется все больше подтверждений тому, что горячие Of?p-звезды обладают крупномасштабными полями, по величине и структуре аналогичными тем, что наблюдаются у более холодных Вр- и Ар-звезд. Имеются ли аномалии химического состава у этих объектов, пока непонятно.

Найдены две очень медленно вращающиеся звезды с периодами в несколько лет и десятилетий. Поскольку таких сверхмедленных ротаторов обнаружено уже несколько, можно считать, что такое замедление вращения возникло не в результате случайного совпадения обстоятельств, а является закономерностью в распределении CP-звезд по периодам вращения.

Впервые найдено магнитное поле у post-AGB-звезд и некоторых других типов объектов.

В целом мы проанализировали около 80 работ. Видим, что тон в мире задают всего 4–5 групп исследователей звездного магнетизма. Они получают абсолютное большинство новой информации в этой области. Одна из таких групп по-прежнему работает в САО РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Российский научный фонд за финансовую поддержку настоящего исследования (грант РНФ № 14-50-00043), а также выражает благодарность редактору электронного журнала «A Peculiar Newsletter» Dr. Luca Fossati за работу по отслеживанию и публикации списка статей по теме настоящего обзора, индексируемых в базе данных NASA ADS, и В. Н. Комаровой за помощь в редактировании статьи и подготовке ее к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. W. Babcock, *Astrophys. J. Suppl.* **30**, 141 (1958).
2. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **70**, 191 (2015).
3. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 305 (2015).
4. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).
5. D. A. Rastegaev, Yu. Yu. Balega, V. V. Dyachenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 296 (2014).

6. K. Perraut, M. Cunha, D. Mourard, and N. Nardetto, in *Proc. Intern. Conf. on Putting A-stars into Context, Moscow, Russia, 2013*, Ed. by G. Mathys, E. Griffin, O. Kochukhov, et al. (Publ. house «Pero,» Moscow, 2014), p. 120.
7. D. Shulyak, C. Paladini, G. Li Causi, et al., in *Proc. Intern. Conf. on Putting A-stars into Context, Moscow, Russia, 2013*, Ed. by G. Mathys, E. Griffin, O. Kochukhov, et al. (Publ. house «Pero,» Moscow, 2014), p. 129.
8. E. F. Borra and D. Deschatelets, *Astron. J.* **150**, 146 (2015).
9. G. Mathys, S. Hubrig, J. Landstreet, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **123**, 353 (1997).
10. J.-F. Donati, M. Semel, B. Carter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **291**, 658 (1997).
11. S. Bagnulo, L. Fossati, J. D. Landstreet, and O. Kochukhov, *IAU Symp.* **305**, 181 (2015).
12. O. Kochukhov, *IAU Symp.* **305**, 216 (2015).
13. O. Kochukhov, T. Luftinger, C. Neiner, et al., *Astron. and Astrophys.* **565**, 83 (2014).
14. G. G. Valyavin, A. F. Valeev, D. R. Gadelshin, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 315 (2015).
15. G. G. Valyavin, A. O. Grauzhanina, G. A. Galazutdinov, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 466 (2015).
16. P. Petit, J.-F. Donati, E. Hebrard, et al., *Astron. and Astrophys.* **584**, 84 (2015).
17. H. Korhonen, J. M. Andersen, N. Piskunov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **448**, 3038 (2015).
18. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and I. A. Yakunin, *ASP Conf. Ser.* **494**, 15 (2015).
19. I. A. Yakunin, E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, and M. Sachkov, *ASP Conf. Ser.* **494**, 86 (2015).
20. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, and I. A. Yakunin, *Astrophysical Bulletin* **70**, 191 (2015).
21. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, and I. A. Yakunin, *ASP Conf. Ser.* **494**, 51 (2015).
22. G. A. Wade, *ASP Conf. Ser.*, **494**, 30 (2015).
23. G. A. Wade, C. Neiner, E. Alecian, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456**, 2 (2016).
24. M. Shultz, G. Wade, T. Rivinius, et al., *arXiv:1411.2534S* (2014).
25. G. A. Wade, R. H. Barba, J. Grunhut, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, 2551 (2015).
26. G. A. Wade, V. Petit, J. Grunhut, and C. Neiner, *arXiv:1411.616* (2014).
27. I. Yakunin, G. A. Wade, D. Bohlender, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, 1418 (2015).
28. M. Shultz, T. Rivinius, C. P. Folsom, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, 3945 (2015).
29. A. Blazere, P. Petit, F. Lignieres, et al., *IAU Symp.* **305**, 67 (2015).
30. M. Shultz, G. Wade, T. Rivinius, et al., *IAU Symp.* **307**, 399 (2015).
31. J. Sikora, G. A. Wade, D. A. Bohlender, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451**, 1928 (2015).

32. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **70**, 444 (2015).
33. S. P. Jarvinen, T. A. Carrol, S. Hubrig, et al., *Astron. and Astrophys.* **584**, 15 (2015).
34. S. Bagnulo, L. Fossati, J. D. Landstreet, and C. Izzo, *Astron. and Astrophys.* **583**, 115 (2015).
35. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. G. Valyavin, et al., *Astron. and Astrophys.* **580**, 120 (2015).
36. S. Hubrig, M. Scholler, L. Fossati, et al., *Astron. and Astrophys.* **578**, L3 (2015).
37. E. Alecian, C. Neiner, G. A. Wade, et al., *IAU Symp.* **307**, 330 (2015).
38. M. Shultz, G. A. Wade, E. Alecian, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **454**, L1 (2015).
39. C. Neiner and E. Alecian, arXiv:1510.02120 (2015).
40. O. Kochukhov, N. Rusomarov, J. A. Valenti, et al., *Astron. and Astrophys.* **574**, A79 (2015).
41. N. Rusomarov, O. Kochukhov, T. Ryabchikova, and N. Piskunov, *Astron. and Astrophys.* **573**, A123 (2015).
42. O. Kochukhov, *Astron. and Astrophys.* **580**, A39 (2015).
43. J. Silvester, O. Kochukhov, and G. A. Wade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453**, 2163 (2015).
44. M. E. Oksala, O. Kochukhov, J. Krticka, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451**, 2015 (2015).
45. Yu. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **70**, 89 (2015).
46. J. Jones, R. J. White, and T. Boyajian., *Amer. Astron. Soc. Meet.* **225**, 1203 (2015).
47. J. D. Bailey, J. D. Landstreet, and S. Bagnulo, *IAU Symp.* **307**, 365 (2015).
48. J. D. Bailey, J. Grunhut, and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **575**, A115 (2015).
49. J. D. Bailey and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **580**, A81 (2015).
50. K. Perraut, M. Cunha, I. Brandao, et al., *Astron. and Astrophys.* **579**, A85 (2015).
51. V. Khalack and F. LeBlanc, *IAU Symp.* **307**, 381 (2015).
52. V. Khalack and F. LeBlanc, *Astron. J.* **150**, 2 (2015).
53. F. LeBlanc, V. Khalack, B. Yameogo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453**, 3766 (2015).
54. E. Paunzen, H.-E. Frohlich, M. Netopil, et al., *Astron. and Astrophys.* **574**, A56 (2015).
55. R. Monier, M. Gebran, and F. Royer, *Astron. and Astrophys.* **577**, A96 (2015).
56. A. Herrin, E. Paunzen, and M. Netopil, *Astron. and Astrophys.* **585**, A67 (2015).
57. N. G. Mykhailytskaya, *Astrophysics* **58**, 512 (2015).
58. Y. Naze, N. R. Walborn, N. Morrel, et al., *Astron. and Astrophys.* **577**, A107 (2015).
59. N. R. Walborn, N. Morrel, Y. Naze, et al., *Astron. J.* **150**, 99 (2015).
60. G. Mathys, *ASP Conf. Ser.* **494**, 3 (2015).
61. I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, E. A. Semenko, and I. A. Yakunin, *Astrophysical Bulletin* **70**, 456 (2015).
62. E. Paunzen, M. Netopil, M. Rode-Paunzen, et al., *Astron. and Astrophys.* **575**, A24 (2015).
63. R. Medupe, D. W. Kurtz, V. G. Elkin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **446**, 1347 (2015).
64. S. J. Adelman and R. Jones Dukes, *IAU General Assembly* **22**, id. 2245933A (2015).
65. M. Hartmann and A. P. Hatzes, *Astron. and Astrophys.* **582**, A84 (2015).
66. B. Smalley, E. Niemczura, S. J. Murphy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **452**, 3334 (2015).
67. M. Prvak, J. Liska, J. Krticka, et al., *Astron. and Astrophys.* **584**, A17 (2015).
68. L. Rosen, O. Kochukhov, and G. A. Wade, *Astrophys. J.* **805**, 169 (2015).
69. E. M. Cole, T. Hackman, M. J. Kapyla, et al., *Astron. and Astrophys.* **581**, A69 (2015).
70. A. Vidotto, S. Gregory, M. Jardine, et al., *IAU General Assembly* **22**, id. 2232877 (2015).
71. C. Neiner and P. Lampens, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **454**, L86 (2015).
72. L. Sabin, G. A. Wade, and A. Lebre, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **446**, 1988 (2015).
73. M. Auriere, R. Konstantinova-Antova, C. Charbonnel, et al., *Astron. and Astrophys.* **574**, A90 (2015).
74. I. S. Savanov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 292 (2015).
75. I. A. Waite, S. C. Marsden, B. D. Carter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, 8 (2015).
76. S. Boro Saikia, S. V. Jeffers, P. Petit, et al., *Astron. and Astrophys.* **573**, A17 (2015).
77. O. Kochukhov and G. A. Wade, arXiv:1511.07881 (2015).
78. T. Bohm, M. Holschneider, F. Lignieres, et al., *Astron. and Astrophys.* **577**, A64 (2015).
79. V. Khalack, B. Yameogo, F. LeBlanc, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **445**, 4086 (2015).
80. M. M. Gabdeev, *Astrophysical Bulletin* **70**, 460 (2015).
81. D. A. Rastegaev, Yu. Yu. Balega, V. V. Dyachenko, et al., 2015yCatp033006902R (2015).
82. Yu. Yu. Balega, V. V. Dyachenko, A. F. Maximov, et al., 2015yCatp033006701B (2015).
83. I. S. Savanov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 83 (2015)
84. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 318 (2015).
85. J. D. Alvarado-Gomez, G. A. J. Hussain, J. Grunhut, et al., *Astron. and Astrophys.* **582**, A38 (2015).
86. J.-F. Donati, E. Hebrard, G. A. J. Hussain, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453**, 3706 (2015).

Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars. 2. Main Results of 2015 and Near-Future Prospects

I. I. Romanyuk

We present an analytical survey of key publications concerned with the study of stellar magnetism published in 2015. We considered about 80 publications, the most significant from our point of view, presented brief reviews of them, and made generalizations. The paper considers: instruments, techniques of observations and analysis; large-scale magnetic fields of OBA stars on the Main Sequence (MS) (formation and evolution, field topology, search for new magnetic stars including the projects MiMeS, BOB, and BinaMIcS and observations with the Russian 6-m telescope, rotation and chemical abundance analysis of magnetic CP stars); magnetic fields, chemical abundance and variability of stars related to peculiar, primarily, active cool stars, solar-type stars and white dwarfs; multiple magnetic stars including interferometry data, exoplanets in a system of magnetic stars. We make a conclusion that the accuracy of magnetic field measurements has grown due to universal application of the multiline method of observations especially with high-resolution spectropolarimeters. Usage of Zeeman-Doppler imaging technique (ZDI) when analyzing the obtained data allows us to confidently search and measure fields of complex topology of the order of 10 Gs. For the first time, a magnetic field has been detected for post-AGB stars and some other types of objects.

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