

УДК
ГРНТИ
Инв. №

| |
|--|
| УТВЕРЖДЕНО: |
| Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук |
| От имени Руководителя организации _____/_____/_____ М.П. |

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 6 этапа Государственного контракта
№ П1194 от 04 июня 2010 г. и Дополнению от 28 февраля 2011 г. № 1, Дополнению от
26 марта 2012 г. № 2

| |
|---|
| Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук |
| Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.1 Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук. |
| Проект: Изучение свойств химических элементов в атмосферах магнитных химически пекулярных звезд |
| Руководитель проекта: _____/Семенко Евгений Алексеевич (подпись) |

Нижний Архыз
2012 г.

Оглавление

| | |
|---|-----------|
| Оглавление | 1 |
| Введение | 2 |
| 1 Аннотированная справка по научным результатам НИР, полученным на предыдущих этапах | 7 |
| 2 Аналитический отчет о проведении экспериментальных исследований | 27 |
| 2.1 Химический состав и стратификация химических элементов в атмосфере Ар-звезды HD 8441 | 27 |
| 2.1.1 Спектральный материал и его обработка. | 28 |
| 2.1.2 Определение эффективной температуры и ускорения свободного падения | 30 |
| 2.1.3 Факторы уширения спектральных линий – магнитное поле, вращение и микротурбуленция..... | 31 |
| 2.1.4 Химический состав атмосферы и распределение химических элементов с глубиной | 35 |
| 2.1.5 Эволюционный статус HD 8441 и сравнение ее с другими Ар-звездами | 39 |
| 2.1.6 Заключение | 42 |
| 3 Отчет по обобщению и оценке результатов исследований | 44 |
| 4 Публикации результатов НИР | 58 |
| Заключение..... | 60 |
| Список литературы | 65 |

Введение

Астрофизика – один из самых молодых разделов астрономии. Возникновение астрофизики было связано с началом применения методов спектроскопии для анализа изучения Солнца и звезд. Благодаря внедрению спектрального анализа в астрономические наблюдения человечеству стало известно, что Солнце – лишь рядовая звезда в нашей Галактике, что набор химических элементов в звездах и межзвездной среде мало чем отличается от земного, что физические законы везде одинаковы. Сейчас, спустя более чем 150 лет с момента первого отождествления линий в спектре, выполненного Кирхгофом, спектроскопия остается основным методом астрофизики. Создание больших телескопов, современных спектрографов и новых высокочувствительных приемников излучения позволили ученым расширить область исследуемых объектов. Из анализа спектров мы можем определять температуры звезд, их скорости вращения, направление и скорость пространственного движения, измерять магнитное поле и даже можем изучать поверхность звезд, неразрешимую даже для самых крупных современных телескопов.

Современные исследования в области звездной астрофизики направлены на решение фундаментальных проблем формирования и эволюции звезд. Много внимания уделяется изучению строения звезд и процессов, которые протекают в звездных атмосферах. Существование эффекта химически пекулярных звезд относится также к одному из наиболее актуальных направлений исследований. Более ста лет назад стало известно, что имеются горячие звезды с особенными (пекулярными) спектрами, которые выделяли их на фоне других звезд с той же температурой. В 1947 году у химически пекулярных звезд были обнаружены сильные (до нескольких килогаусс) крупномасштабные магнитные поля, а к середине 70-х г. г. стало понятно, что аномальные спектры горячих А- и В-звезд свидетельствуют о неоднородном химическом составе этих звезд. Для

объяснения эффекта химически пекулярных звезд было предложено много гипотез, из которых к настоящему времени наблюдательную проверку выдержала только одна – гипотеза о диффузии атомов в атмосферных слоях звезды под действием двух сил: силы тяжести и лучистого давления. Из теории диффузии следует также и существование вертикального градиента концентрации химических элементов. Последнее явление удалось впервые измерить только в первой половине 1990-х гг. [3]. Много вопросов вызывает существование магнитных полей у пекулярных звезд. Основные проблемы, которые нуждаются в решении: 1) каково происхождение поля? 2) что поддерживает магнитные поля в неизменном виде? 3) как влияет присутствие магнитного поля у звезды на строение и химический состав ее атмосферы? Наш проект исследований был направлен на решение третьего вопроса. Кроме того, результаты наших исследований позволяют приблизиться к ответу на вопрос о том, каким образом эволюционирует магнитное поле Ар/Вр-звезд.

Изучение отдельных звезд позволяет в той или иной мере детально судить о природе явлений, протекающих в их атмосферах. Однако обобщающие выводы можно сделать только опираясь на множество однотипных результатов анализа. Таким образом, перед нами возникает задача подробного исследования как можно большего количества магнитных CP-звезд. Условно все объекты наших исследований можно разделить на несколько групп: 1) маломассивные А- и F-звезды, в том числе и те, которые проявляют пульсационную активность или в ней заподозрены; 2) молодые Ар/Вр-звезды средней массы; 3) старые Ар-звезды средней массы; 3) наиболее массивные магнитные Вр-звезды. Такое деление, кроме удобства систематизации полученных результатов, преследует также целью попытку обнаружить последствия эволюции химического состава и магнитных полей у звезд разной массы. На предыдущих этапах работы нами были проведено детальное изучение ряда звезд, находящихся на разных стадиях эволюции – это такие объекты, как HD 50341, HD 63347, HD 201174 (все – на ранней

стадии эволюции на Главной последовательности), HD 96003, HD 8441 (проэволюционировавшие звезды), HD 207561, HD 178892 (маломассивные звезды), HD 184927, HD 36485, HD 35298 (массивные Вр-звезды). Подбор объектов для исследования специально осуществлялся так, чтобы молодые и старые магнитные звезды были расположены по возможности на эволюционных треках звезд одной и той же массы. Таким образом, мы можем судить о том, что произойдет с магнитным полем и содержанием химических элементов в наблюдаемых слоях звезды за время ее жизни на Главной последовательности. Наиболее быстрые эволюционные изменения можно было бы заметить у наиболее массивных Вр-звезд, но учитывая свойства этих объектов (малое количество линий в спектрах, быстрое вращение, протяженные магнитосферы и быстрые темпы потери массы), мы сосредоточили основные усилия на менее массивных А-звездах.

Обобщая все результаты астрофических исследований, полученные на 6 этапах выполнения проекта, можно прийти к следующим выводам:

1. Молодые звезды нашей выборки характеризуются умеренно быстрым вращением (десятки км/с), продольными магнитными полями умеренной величины (единицы килогаусс) и значимыми избытками редкоземельных элементов (РЗЭ).
2. Старые звезды средней массы (2-4 солнечных масс) вращаются медленно ($v \sin i$ порядка нескольких км/с), обладают очень слабыми полями (B_e порядка нескольких гаусс). Присутствие в атмосфере РЗЭ крайне слабо выражено, их линии в спектре крайне слабые или вообще отсутствуют. Анализ литературных данных о данной категории звезд приводит к выводу, что среди них большое число двойных. Последний вывод нуждается в отдельном и детальном рассмотрении.
3. Массивные и горячие магнитные звезды из нашей выборки обладают слабыми полями и характеризуются значимой спектральной переменностью. Оба обнаруженных факта, на наш

взгляд, не отражают типичные свойства, а являются следствием наблюдательной селекции. Из-за сложности с изучением спектров горячих звезд и их моделированием, а также в связи с недостатком качественного спектрального материала, все полученные результаты можно рассматривать как задел для будущих масштабных исследований.

Параллельно с проведением астрофизических исследований, в течение 3 лет мы проводили работы технического и методического характера. Основная цель таких работ заключалась в совершенствовании наблюдательной базы, основанной на использовании 6-м телескопа САО и его навесного оборудования, а также в создании алгоритмов обработки и анализа спектров. В результате, был создан рабочий макет блока фазовых пластинок с возможностью их непрерывного вращения, что позволяет выполнять компенсацию вращения плоскости поляризации, возникающую при использовании поляриметров нэсмитовского фокуса телескопа. На этом макете были опробованы основные режимы работы поляриметра, а по итогам испытаний принято решение реализовать аналогичный метод компенсации инструментальных эффектов в новой предщелевой части спектрографа ОЗСП, которая сейчас находится на стадии проектирования и будет установлена на спектрографе стационарно. Еще один результат методической работы – был разработан и реализован алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме обнаруживать и выделять отдельные линии в поляризованных спектрах.

В течение 3 лет успешно проводилась работа по привлечению в науку молодых кадров. Для ряда работ нами привлекались студенты ведущих университетов России (напр., Ахметханов Э.М., Глухова А.В. – Казанский (Приволжский) федеральный университет, Титаренко А.Р. – Московский государственный университет и др.), а один из исполнителей программы – Кичигина Л. А., будучи студенткой Казанского университета, с оценкой «отлично» защитила дипломную работу (тема: «Магнитные свойства и

химический состав холодных mCP-звезд», руководитель – Семенко Евгений Алексеевич). Позже она успешно сдала вступительные экзамены в аспирантуру Специальной астрофизической обсерватории РАН и в настоящее время продолжает свои исследования, начатые еще в университете.

1 Аннотированная справка по научным результатам НИР, полученным на предыдущих этапах

Успех в решении поставленных в работе задач в значительной степени зависит от того, насколько адекватное представление у исполнителей имеется о современном состоянии исследований в выбранной теме. На основе аналитического обзора, посвященного проблеме исследования атмосфер звезд Главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рессела, который был представлен в отчете по первому этапу, мы следующим образом обосновали свой выбор направления исследований: поскольку физические условия звездных атмосфер пока что нельзя воспроизвести в земных лабораториях, исследование свойств химических элементов методами звездной астрофизики представляет из себя актуальную задачу современной науки. Научная значимость настоящей работы заключается в том, что проверенными и апробированными методами мы будем изучать химически пекулярные звезды, обладающие магнитными полями. Наши исследования были направлены на изучение химического состава, магнитных полей и эволюции звезд с той целью, чтобы максимально прояснить роль магнитных полей звезд в возникновении феномена химически пекулярных звезд. Объектами исследований были избраны горячие В- и А-звезды с аномалиями химического состава, находящиеся на разных стадиях звездной эволюции. Кроме звезд с предельно сильными магнитными полями (более 10 кГс) внимание решено было уделить и тем звездам, поля которых близки к нижней границе точности современных зеемановских измерений (десятки и сотни гаусс). В плане оценки возраста звезд, по нашему мнению, лучше всего сосредоточится на исследовании близких звезд, до которых точно известно расстояние, или на изучении звезд-членов рассеянных скоплений.

Руководствуясь изложенными соображениями, на первом этапе проекта мы сформулировали план детальных исследований, которого впоследствии строго придерживались.

Этап 1. Первая работа на этапе №1 была направлена на решение технических задач и имела целью внедрить в постоянные наблюдения на звездных спектральных приборах 6-м телескопа БТА новую крупноформатную ПЗС-систему на основе приемника CCD 42-90 размером 4600×2050 элементов производства британской фирмы E2V. ПЗС-система была изготовлена в Лаборатории перспективных разработок САО и в наши задачи входило изготовление посадочного устройства для 2-й камеры Основного звездного спектрографа, а также проведение обширного тестирования системы в сочетании со спектрографом.

Результаты пробной эксплуатации показали, что новый приемник при близких со старой ПЗС характеристиках обладает рядом преимуществ:

1. Увеличенная площадь приемника.
2. Стационарная установка на спектрографе.
3. Отсутствие косметических дефектов на поверхности чипа.
4. Высокая эффективность при длительном накоплении сигнала (1 час и более).

Значительная часть технических недоработок ПЗС-системы со временем была устранена изготовителями, недавно был изготовлен новый, более прочный и удобный в фокусировке посадочный узел. Сейчас ПЗС-система с приемником формата 4600×2050 элементов является основной на спектрографе ОЗСП и временно используется на спектрографе НЭС после выхода из строя ПЗС-камеры «Uppsala».

Штатные продолжительные наблюдения с крупноформатной ПЗС-системой показали, что в случае звезд с медленным вращением, за счет увеличения спектрального разрешения и спектрального диапазона, удается достичь точности измерения продольной компоненты магнитного поля CP-звезд около 15-20 Гс, что было новым для данного спектрографа.

Стационарная установка камеры на спектрографе дает возможность получать надежные измерения лучевых скоростей и других параметров звезд при длительных мониторинговых задачах, когда отдельные наблюдения разнесены во времени на многие недели и месяцы. Возросшее спектральное разрешение позволяет изучать большое число спектральных линий в спектрах звезд с ярковыраженной переменностью химического состава.

С целью формирования выборки новых магнитных звезд для дальнейших исследований на 1-м этапе была начата работа по выработке критериев отбора среди звезд-кандидатов. Для этих целей были использованы спектры низкого разрешения, получаемые на спектрографе UAGS 1-м телескопа САО РАН. В итоге, было отобрано 5 горячих В-звезд из скопления Collinder 65 (HD 34593, HD 35269, HD 35533, HD 35635, HD 36653) и 11 Ар-звезд в большом диапазоне эффективных температур (HD 6757, HD 8441, HD 96003, HD 110066, HDE 343872, BD +40°175 А и В, HD 9484, HD 10783, HD 51418, HD 178892). Критерии отбора зависят в первую очередь от эффективной температуры звезд – более холодные Ар-звезды отбирались в основном по глубине и степени переменности депрессии в континууме на длине волны 5200 Å. Горячие Вр-звезды, у которых данная депрессия не проявляется отбирались на основе наличия переменных линий гелия. На последующих этапах часть звезд была детально изучена.

Этап 2. На втором этапе выполнялись следующие работы: 1) создание системы обработки наблюдательных данных, полученных на эшелле-спектрометре НЭС 6-м телескопа; 2) разработка алгоритма поиска и выделения атомных линий в циркулярно-поляризованных спектрах; 3) изучение магнитного поля и химического состава магнитной звезды HD 178892; 4) спектральный мониторинг молодых гелиевых звезд, членов рассеянных скоплений на 1-м телескопе.

Необходимость создания новой системы обработки двумерных эшелле-спектров, основанной на одной из распространенных систем обработки данных (напр., IRAF или ESO MIDAS), вызвана двумя причинами – их

бесплатностью (в отличие от таких сред, как ITT IDL) и обширным обществом активных пользователей. Основные требования, которые предъявлялись к процессу обработки, были следующие:

- 1) процесс обработки должен выполняться по возможности максимально автоматически, но возможность вмешательства обработчика при необходимости должна быть сохранена;
- 2) обработка данных должна включать в себя все этапы первичной редукции: вычитание электронной подложки матрицы (bias), коррекцию неравномерной чувствительности элементов матрицы ПЗС;
- 3) в случае необходимости, данные об исследуемом объекте могут быть запрошены из одной из доступных в Интернет баз данных;
- 4) итоговые ненормированные на континуум спектры должны быть скорректированы за движение Земли по своей орбите.

За основу алгоритма была взята последовательность процедур, реализованных в REDUCE [29]. В качестве основы была выбрана система обработки и анализа данных IRAF (<http://iraf.net/>) с ее встроенным языком программирования CL. Получившаяся программа-скрипт имеет размер менее 500 строк и позволяет в полуавтоматическом или ручном режиме обрабатывать двумерные спектры, оставляя возможность обработчику контролировать промежуточные результаты и при необходимости их корректировать.

Результаты обработки с использованием созданной нами программы показали удовлетворительное согласие с теми, что были получены при экстракции спектров в REDUCE. Среди отмеченных недостатков – снижение спектрального разрешения. Для задач изучения химического состава небольшое снижение разрешения (в сравнении с тем, что получается при измерении отдельных срезов) не представляет проблемы, но при высокоточных измерениях лучевых скоростей или измерении магнитного поля отмеченный недостаток необходимо устранить. Второй параметр, по

которому оценивалось качество обработанных спектров – отношение величины полезного сигнала к шуму. По этому показателю оба результата обработки, полученные в REDUCE и IRAF, показали отсутствие качественных и количественных различий. Небольшие различия в интенсивностях экстрагированных спектров, показанные на рис. 6 отчета по второму этапу, не вносят систематических искажений в результаты нормировки на континуум.

Проблема поиска отдельных спектральных линий уже имеет множество решений. Наиболее часто для этих задач используются такие программы, как ARES [37], DAOSPEC [38], и им подобные. Для наших задач измерения и анализа спектров Ар-звезд необходимо было реализовать алгоритм, позволяющий без каких-либо предварительных сведений отождествлять линии в поляризованных спектрах, который мог бы быть встроен в существующий в Лаборатории исследований звездного магнетизма CAO набор программ.

Поставленная задача была решена с использованием языка программирования Python. Программа Lsearch ищет в первой, второй и третьей производных нули и локальные максимумы функции, которые отвечают за положение отдельных спектральных линий. Проверка работы Lsearch на спектрах типичных магнитных звезд показала значительное преимущество нашего алгоритма над традиционными средствами с аналогичным функционалом системы MIDAS. В большинстве случаев количество ложных срабатываний составило менее 15%, но возросло вдвое при попытке поиска линий в слабоэкспонированных спектрах. Для эффективной работы программы при анализе спектров звезд с отношением сигнал/шум менее 200 необходимо усовершенствовать алгоритм применением сглаживания для неполяризованных спектров, заданием критериев отсеивания линий по их глубине и т.п.

На втором этапе было начато изучение уникальной звезды HD 178892. Нами было измерено магнитное поле звезды – как его продольная, так и

поверхностная компонента, а также оценено содержание некоторых химических элементов. В результате был получен новый наблюдательный материал и проанализированы полученные ранее спектры. Измерения продольной компоненты магнитного поля звезды показали неудовлетворительное согласие с измерениями, опубликованными в статье Рябчиковой и др. [35]. Возможное объяснение найденных различий заключается в том, что период 8,2478 сут., приведенный в статье, неточен. Вместе с тем, между старыми и новыми измерениями модуля магнитного поля на поверхности звезды наблюдается хорошее согласие, а сама величина B_s меняется в противофазе с продольным полем B_e от 16 до 23 кГс. Наблюдаемое поведение магнитного поля свидетельствует о его сложной геометрии. Наше моделирование структуры магнитного поля показало, что действительно, присутствует сильная (до -40 кГс на полюсе) квадрупольная составляющая.

Сильное магнитное поле и относительно быстрое вращение звезды дали нам возможность проверить, оказывают ли влияние эти факторы на процесс диффузии атомов в атмосферах холодных CP-звезд. Известно, что у более горячих звезд, таких как 53 Cam и α^2 CVn были найдены подтверждения того, что определенные химические элементы сконцентрированы в областях атмосферы, где проявляются магнитные структуры. Мы выполнили изучение химического состава атмосферы звезды в фазы вращения, которые соответствуют максимальному и минимальному поверхностному магнитному полю. В результате выяснилось, что содержание элементов остается постоянным в пределах ошибок, т.е. поверхность звезды в химическом плане достаточно однородна. Этот результат представляется наиболее интересным, поскольку ставит перед теоретиками новые вопросы, связанные с природой диффузии атомов в атмосферах холодных звезд.

Во время анализа химического состава звезды были обнаружены некоторые косвенные свидетельства в пользу того, что звезда может

принадлежать к классу быстропульсирующих (избыток редкоземельных элементов ок. 4 порядков при эффективной температуре 7700 К). Наша попытка найти пульсации лучевых скоростей некоторых линий в спектре HD 178892 завершилась нулевым результатом. Отсутствие выделенной ненулевой частоты пульсаций еще не говорит об их полном отсутствии, а, скорее, может свидетельствовать о недостаточном качестве наблюдательного материала. Имеющийся материал (учитывая спектральное разрешение, стабильность спектрографа и время накопления спектров) позволяет найти измерения лучевых скоростей отдельных линий с амплитудой более 1 км/с и с периодом более 11 минут. Вторым фактором, существенно влияющим на результаты, является слишком длительное время экспозиции в 4 минуты. Получение спектров удовлетворительного качества с короткой экспозицией осложняется слабым блеском HD 178892 – $m_V = 8.94$.

Применяя кросс-корреляционный и частотный фурье-анализ по отношению к спектральным данным, не удалось найти значимых изменений анализируемых спектральных линий. Следовательно, если HD 178892 и относится к γ Ar-звездам, то ее пульсации должны иметь период от 5 (близко к минимуму для известных γ Ar-звезд) до 11 минут, либо длиннее, но тогда амплитуда колебаний должна быть существенно меньше 1 км/с.

Этап 3. На третьем этапе нами был начат анализ трех новых магнитных звезд, поля которых впервые были обнаружены нами по наблюдениям на 6-м телескопе. Это звезды HD 50341, HD 63347 и HD 96003. Используя набор одномерных циркулярно-поляризованных спектров, нами были проведены измерения продольного магнитного поля этих CP-звезд. Поиски магнитного поля ни у одной из изучаемых нами звезд ранее никем не проводились. Измерения показали, что звезда HD 63347 является реверсивной, т.е. в процессе вращения ее магнитное поле для наблюдателя меняет свой знак, а следовательно, мы наблюдаем попеременно оба магнитных полюса. Звезда HD 96003, по-видимому, видна нам только со стороны отрицательного полюса, а ее продольное поле в минимуме достигает -100 Гс, о максимальном

значении поля HD 96003 судить сложно, т.к. период звезды не известен. Два измерения продольного поля звезды HD 50341 отчетливо показали, что она относится к классу mCP. Больше ничего конкретного о магнитных свойствах HD 50341 нельзя сказать, необходимы дальнейшие наблюдения. Информацию о периодах вращения звезд HD 50341 и HD 63347 – 2,5092 сут. и 1,74984 сут., соответственно, мы взяли из литературы. Из анализа фотометрических данных, путем применения калибровок для эффективной температуры нами были оценены некоторые параметры звездных атмосфер. Для звезды HD 50341 мы получили следующие наборы параметров: 1) $T_{\text{eff}} = 11040 \pm 170$ К, $\lg g = 4.34$ dex, $[M/H] = 0$; 2) $T_{\text{eff}} = 10480 \pm 126$ К, $\lg g = 4.19$ dex, $[M/H] = +1$. Для звезды HD 96003 использование калибровок отдельно по индексам $[u-b]$ и $[cI]$ фотометрической системы Стремгрена, специально предназначенным для CP-звезд, дает величины T_{eff} , различающиеся почти на 1000 К (8760 К и 9730 К, соответственно). Такой разброс может объясняться как сильными аномалиями распределения энергии в непрерывном спектре, так и двойственностью звезды (разделение между компонентами – 2"). Отсутствие фотометрических данных для звезды HD 63347 не позволило нам оценить ее эффективную температуру. Профили линии H_{β} водорода в поляризованных спектрах указывают на температуру около 11 000 К, т.е. звезда по своим характеристикам ближе к HD 50341, чем HD 96003.

На предыдущем 2-м этапе было начато изучение магнитного поля и химического состава холодной CP-звезды HD 178892 с экстремально сильным для своего спектрального класса магнитным полем. В частности, нами было найдено, что модуль поверхностного магнитного поля B_s меняется в противофазе с продольным полем B_e , что можно объяснить сложным строением общего магнитного поля звезды. В результате моделирования отдельных линий железа, хрома и некоторых РЗЭ было найдено, что новые измерения поля плохо ложатся на график его переменности, которая была рассчитана в предположении, что период вращения звезды равен 8.2478 сут. Имеющееся рассогласование нельзя

объяснить точностью измерений или ошибками в процедурах обработки данных. Попытавшись заново проанализировать все имеющиеся сведения о продольном и поверхностном поле звезды, включая и наблюдения 2010 г., пришли к уточненному периоду вращения звезды – 8,2549 сут. Затем, с учетом новых данных о переменности магнитного поля, были заново проанализированы спектры, полученные в моменты времени, совпадающие с экстремумами продольного и поверхностного магнитного поля. В процессе моделирования мы столкнулись с необходимостью задавать разную конфигурацию магнитного поля для различных ионов, а иногда – и для разных линий одного и того же иона. Подобное поведение линий отдельных ионов характерно для случая, когда они распределены по поверхности не равномерно, а наблюдаются обширные области с уменьшенной или увеличенной их концентрацией. Большинство линий в спектре в фазу минимального магнитного поля ($B_s = 16.6-17.5$ кГс, $\phi = 0.95$) удается аппроксимировать в предположении, что поле имеет конфигурацию (детали в статье Кочухова [17]) $(B_r, B_a, B_m) = (12.3, 12.3, 0)$, но некоторые линии, например, хрома лучше удается описать, когда вектор магнитного поля модели имеет вид $(0, 17.5, 0)$. Аналогичным образом, для фазы, соответствующей максимальному значению $B_s = 23$ кГс ($\phi = 0.4$), наибольшее число отклонений в геометрии поля потребовалось для описания линий Nd III и Tb III, в то время как линии Nd II никакой модификации модели не требуют. Нами было предложено три возможных объяснения: 1) влияние на теоретические профили линий упрощений при рассмотрении геометрии поля, принятых в использовавшихся программах моделирования; 2) нехватка точных атомных данных по большей части для РЗЭ; 3) наличие действительных областей концентрации отдельных ионов на поверхности звезды. Проверить последнюю гипотезу сложно из-за медленного вращения HD 178892, ее проекция скорости вращения на луч зрения составляет всего 9 км/с. Методы картирования, которые позволяют решить задачу изучения распределения химических элементов по поверхности, эффективны только в

тех случаях, когда звезда вращается относительно быстро – $v \sin i$ составляет десятки и сотни км/с.

Вопрос внедрения в постоянные наблюдения на 6-м телескопе в фокусе Нэсмита режима линейной спектрополяриметрии вынудил нас начать разработку нового модуля с поворотной полуволновой пластинкой, работающего в предщелевой части спектрографа ОЗСП. С целью удаленного управления фазовыми пластинками предщелевой части спектрографа нами был приобретен комплект фазовых полуволновых пластинок с просветляющим покрытием, повышающим пропускание. Пластинка устанавливается в моторизованную турель, которая управляется с компьютера, обслуживающего другие приборы стойки Н2. Моторизованная конструкция позволяет произвольным образом задавать угол ориентации пластинки и обеспечивает непрерывное вращение в течение требуемого времени с заданной скоростью. Таким образом, мы можем искусственно вращать плоскость поляризации излучения, прошедшего через оптический тракт телескопа. Компьютеризированное управление фазовой пластинки с использованием моторизованной турели позволяет реализовать два режима наблюдений. В первом режиме реализуются возможности старого привода фазовой пластинки. Для этого в программе управления турелью SMCView нужно указать необходимый угол поворота турели – $0, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$.

Второй режим подразумевает непрерывное слежение привода фазовой пластинки в течение всей экспозиции. Возможна как компенсация только вращения поля зрения телескопа, так и полная компенсация вращения, включая поворот плоскости поляризации для компенсации инструментальной поляризации зеркала М3. Последний вариант наблюдений мы не стали внедрять в тестовые наблюдения, поскольку слабо изученные свойства ломающего зеркала М4, имеющего защитный слой MgF_2 , не позволяют полностью скомпенсировать инструментальную поляризацию в фокусе Нэсмита. По причине неудовлетворительных погодных условий в

заявленные технические ночи, полноценных испытаний нового блока в то время провести так и не удалось.

Этап 4. На этом этапе выполнялись исключительно астрофизические исследования. Нами были изучены магнитные и физические свойства некоторых массивных химически пекулярных звезд (HD 36485, HD 35298 и др.), у 5 из них магнитное поле было обнаружено впервые. Еще одна задача была направлена на проверку эволюционного статуса звезды HD 207561, заподозренной в принадлежности к классу пульсирующих Ap-звезд. И, наконец, третья работа была посвящена измерениям круговой и линейной поляризации в спектрах новой магнитной звезды HD 201174. Далее о результатах подробнее.

Из общей выборки в 70 горячих звезд с неклассифицированными химическими аномалиями у 30 объектов по спектрам низкого разрешения (0,7 Å/пиксель) нами были обнаружены отклонения в содержании гелия (дефицит или избыток). Характерно, что почти все они ранее никем не изучались. Эта программа была начата в 2010 г., в последующее время мониторинг этих звезд был продолжен. Среди наиболее холодных В-звезд были отобраны несколько звезд, у которых в непрерывном спектре все еще была видна депрессия на длине волны 5200 Å. Список звезд для изучения был дополнительно расширен за счет горячих звезд-членов рассеянных скоплений, информация о которых была любезно предоставлена нам Дж. Ландстритом (Канада). В ходе работы для двух известных магнитных звезд HD 36485 и HD 35298 были получены наблюдательные данные для детального изучения из магнитных полей и физических свойств. Обе они представляют интерес с той точки зрения, что хотя и имеются сведения об их очень сильном (несколько килогаусс) продольном магнитном поле, сведения о переменности B_e либо отсутствуют (HD 35298), либо отдельные измерения демонстрируют сильный разброс (HD 36485). В результате, в течение 2010-2011 гг. были измерены магнитные поля 35 массивных В-звезд. Нам удалось у 5 звезд обнаружить значительное продольное магнитное поле,

как минимум в два разных момента времени. Для уже известных магнитных звезд из выборки были получены новые данные. По результатам измерения циркулярно поляризованных спектров звезды HD 36485 нами было предложено новое значение периода вращения – 1,495 сут., что несколько больше ранее известных 1,47775 сут. Расхождение возможно заключается в том, что в разных случаях для измерения поля B_e использовались линии разных элементов (в нашей работе это линии металлов), что при неравномерном их распределении способно исказить итоговое представление о величине и характере переменности магнитного поля. Новые наблюдения звезды HD 35298, обладающей очень сильным полем, проведенные со спектрографом ОЗСП 6-м телескопа, выявили присутствие эффекта кроссовер в поляризованных спектрах. В обычных условиях это явление свидетельствует об ориентации звезды относительно наблюдателя преимущественно с магнитного экватора. Нами была предпринята попытка изучить, как меняется величина продольного магнитного поля, измеренная по линиям разных химических элементов. Основываясь на списке спектральных линий из базы данных VALD и модели атмосферы звезды с температурой 15200 К, мы рассчитали синтетический спектр, по которому затем было проведено отождествление линий в наблюдаемом спектре звезды. Мы установили, что в некоторых случаях величина B_e , измеренная по линиям разных элементов, может различаться на сотни гаусс. Таким образом, поверхность звезды HD 35298 в химическом плане должна быть крайне неоднородной, а благодаря короткому периоду вращения звезда является хорошим объектом для магнитно-доплеровского картирования.

Холодная звезда HD 207561 спектрального класса F0 была заподозрена индийскими учеными на предмет быстрых колебаний блеска [11]. Чтобы проверить это предположение, мы выполнили анализ эшелле-спектров, полученных ранее в 2008 г. на 6-м телескопе, а также провели наблюдения на ОЗСП с анализатором круговой поляризации с целью обнаружить присутствие магнитного поля, характерного для всех быстропульсирующих

гоAr-звезд. Мы определили основные физические параметры атмосферы звезды. Согласно калибровке Муна и Дворецкого [24]: $T_{\text{эфф}} = 7917 \pm 193$ К, $\lg g = 4,17 \pm 0,10$ dex. Применение калибровок из работы [26] дало несколько меньшие значения: $T_{\text{эфф}} = 7650 \pm 150$ К, $\lg g = 4,0 \pm 0,1$ dex. С целью сравнения была посчитана сетка моделей звездных атмосфер для разных значений температуры, ускорения свободного падения и металличности. Для расчета моделей атмосферы была использована программа Куруца Atlas9, синтетические спектры рассчитывались с помощью программы Synth3, созданной Н. Пискуновым и усовершенствованной затем О. Кочуховым. Все расчеты были выполнены в предположении локального термодинамического равновесия и при нулевом общем магнитном поле звезды. Наилучшее совпадение расчетного спектра с наблюдаемым было достигнуто при следующих значениях: $T_{\text{эфф}} = 7300 \pm 200$ К, $\lg g = 3,7 \pm 0,1$ dex, $[M/H] = +0,2$.

Для моделирования спектров звезды HD 207561 был произведен расчет модели звездной атмосферы для значений эффективной температуры 7300 К и ускорения свободного падения 3,7 dex, определенных по линии водорода. Модель атмосферы рассчитывалась с помощью программы Куруца Atlas9, теоретические спектры были получены в программе Synth3 на основе списка линий из базы данных VALD. Перед сравнением спектров, теоретические спектры были свернуты с инструментальным профилем спектрографа и функцией уширения, соответствующей скорости вращения $v \sin i = 80$. Предварительный анализ зеемановских спектров показал явное присутствие линий железа, хрома, магния и некоторых других элементов, которые выступали в основном в роли бленд. Сравнивая наблюдаемые спектры звезды с теоретическими, мы оценили содержание 14 химических элементов (Табл. 5 в отчете по этапу №4). Наш анализ показал, что Ca и Sc имеют небольшой дефицит содержания, в то время как Fe, Cr, Mg и ряд других элементов представлены в избытке. Из таблицы также видно, что такие элементы как C и O также имеют дефицит содержания, что характерно для Ar-звезд. Линий редкоземельных элементов обнаружить не удалось, хотя

моделирование нескольких линий-бленд неодима показало приблизительно солнечное содержание. Таким образом, имеется картина обилия химических элементов, характерная для металлических А-звезд. Измерение трех зеемановских спектров, полученных в разные моменты времени показало, что продольное магнитное поле звезды в пределах ошибок измерения отсутствует. Таким образом, мы констатируем, что HD 207561 с большой долей вероятности является либо быстровращающейся звездой с умеренными аномалиями типа Am, либо – нормальная А-звезда.

Магнитное поле звезды HD 201174 ($\alpha = 21^{\text{h}}06^{\text{m}}22^{\text{s}}$, $\delta = 45^{\circ}16'13''$) впервые было измерено Д. О. Кудрявцевым в CAO РАН в 2006 г. Наблюдения звезды проводились в рамках программы по поиску новых магнитных звезд. Затем последовал двухлетний перерыв, после которого наблюдения этой звезды были продолжены уже нами. В одну из дат 2008 г. при анализе зеемановских данных были обнаружены большие различия между внешним видом одних и тех же спектральных линий в циркулярно-поляризованных спектрах, что указывало на существование сильного кроссовер-эффекта. Этот эффект проявляется в спектрах магнитных звезд только при определенных обстоятельствах, а именно, в тех случаях, когда пространственная ориентация способствует одновременной видимости обоих магнитных полюсов диполя. То есть луч зрения наблюдателя в этот момент пересекает (cross-over) магнитный экватор звезды. Дополнительное (к зеемановскому) искажение профилей спектральных линий приводит к занижению оценок величины продольного поля. Несмотря на то, что точное значение периода еще не установлено (не хватает измерений продольного магнитного поля), по имеющимся данным можно ожидать, что период будет около 1,6 сут. Полагая, что звезда вращается быстро (короткий период), и приняв во внимание малую величину проекции скорости вращения на луч зрения ($v \sin i = 16$ км/с определено по линии Fe II 4508.288 Å), можно сделать определенные выводы о пространственной ориентации звезды. Мы полагаем, что подобного сочетания параметров можно добиться, когда угол i

между осью вращения звезды и лучом зрения составляет небольшую величину ($10-30^\circ$), а угол β между осью вращения и осью магнитного диполя близок к 90° . При таких обстоятельствах действительно в течение почти всего периода вращения звезды будет наблюдаться в спектрах кроссовер-эффект, а следовательно, поперечная компонента магнитного поля – малая в обычных условиях – будет значимой и ее можно попытаться измерить методами линейной спектрополяриметрии.

После обработки всех 22 зеемановских спектров, полученных к тому времени на 6-м телескопе, мы выполнили измерения продольной компоненты магнитного поля звезды HD 201174. По этим данным частотным методом был определен период вращения звезды – 1,5996 сут., который все же недостаточно хорошо описывает все измерения V_c . Пробные наблюдения звезды в режиме линейной поляризации были проведены 11 августа 2011 г. на 6-м телескопе БТА с использованием спектрографа ОЗСП. Результаты обработки одномерных спектров звезды HD 201174 выявили присутствие широкополосной поляризации в непрерывном спектре, однако после нормировки параметры Стокса q'/I и u'/I показали во всех линиях отчетливый сигнал, величина которого доходила в отдельных случаях до 2%, что нехарактерно для звезд без оболочек. В качестве контрольной звезды с заведомо известной величиной линейной поляризации в непрерывном спектре мы наблюдали HD 188512. Анализ полученных инструментальных величин показал, что в некоторых случаях в линиях, как и ранее у звезды HD 201174, проявляется сигнал определенной величины. Таким образом, чтобы выяснить окончательно вопрос с измерением линейной поляризации на спектрографе ОЗСП, мы считаем необходимым детально изучить поляризационные свойства отдельных узлов спектрографа в лабораторных условиях и лишь затем заново проводить поляриметрические наблюдения магнитных CP-звезд с анализатором линейной поляризации.

Этап 5. Пятый этап предполагал проведение двух астрофизических исследований: 1) изучение свойств двух молодых магнитных Ap/Bp-звезд HD

50341 и HD 63347, открытых на 6-м телескопе CAO, а также 2) изучение фундаментальных параметров, физических и магнитных свойств звезды Ne-strong HD 184927.

Первая из перечисленных работ по своей сути является продолжением исследований, начатых на 3-м этапе программы. После детального анализа всех имеющихся сведений о звездах, применяя новейшие атомные данные, и на основе анализа нового более качественного наблюдательного материала, мы провели изучение физических свойств и оценили эволюционный статус звезд HD 50341 и HD 63347. Австрийские ученые из фотометрии HIPPARCOS определили период вращения HD 50341 – 2,5092 дня. Близкое к двум суткам значение периода также встречается еще в двух работах – Дубата и др. [13] и Райта и др. [30]. Кроме того, в последней работе приводятся и другие оценки параметров: $T_{\text{эфф}} = 9860$ К, $\lg L/L_{\odot} = 1.48$, $M = 2.29M_{\odot}$, $\tau = 0.18$. Обращает на себя тот факт, что авторы оценивают звезду, как ушедшую от ГП нулевого возраста (возраст ее равен 18% жизни на ГП), но ошибка оценки все же достаточно велика – ± 0.30 . Для одиночных и достаточно удаленных звезд (исходя из параллакса HIPPARCOS, HD 50341 удалена от Солнца на $d = 236$ пк) большие ошибки определения возраста – обычное явление. В общей сложности, для звезды HD 50341 удалось получить 4 зеемановских спектра. Согласно калибровке Гарманца [9], звезда с эффективной температурой HD 50341 (10500 К) должна иметь размер 2,27 солнечных радиусов. Приняв во внимание среднее и максимальное значение продольного поля звезды (91 Гс и 570 Гс, соответственно), мы определили основные параметры геометрии магнитного поля звезды в дипольном приближении: угол β между осью диполя и осью вращения звезды равен 73° . Угол i между осью вращения и направлением на луч зрения равен 64° . В этом случае, напряженность магнитного поля на полюсе диполя будет равна 2160 Гс, что достаточно мало для горячих магнитных Вр-звезд. Аналогичным образом были найдены параметры геометрии поля звезды HD 63347: $R=2.36R_{\odot}$, $v_{\text{eq}}\sin i = 39$ км/с, $i = 35^{\circ}$, $\beta = 86^{\circ}$, $B_d = 5960$ Гс, а $v_{\text{eq}} = 69$ км/с.

С учетом парралаксов изучаемых звезд и данных фотометрии, мы пришли к следующим значениям абсолютной звездной величины и светимости звезд: $M_v(\text{HD } 50341) = 1.18$, $\lg(L/L_\odot)(\text{HD } 50341) = 1.60$, $M_v(\text{HD } 63347) = 1.08$, $\lg(L/L_\odot)(\text{HD } 63347) = 1.64$. Для обеих звезд с использованием моделей Куруца и списков линий из Венской базы атомных данных (VALD) была рассчитана сетка синтетических спектров в области линии водорода H_β с целью независимого определения параметров $T_{\text{эфф}}$, $\lg g$ и $[M/H]$. В итоге, наилучшее согласие было достигнуто для случая звезды HD 50341 при $T_{\text{эфф}} = 10800 \pm 200$ К, $\lg g = 4.1 \pm 0.1$ dex, $[M/H] = +1$. Такая же металличность, но $T_{\text{эфф}} = 11300 \pm 300$ К и $\lg g = 4.2 \pm 0.1$ dex были получены для HD 63347. Будучи помещенными на теоретическую диаграмму Герцшпрунга-Рессела, звезды попадают на ее левый край и расположены вблизи линии нулевого возраста. Положению звезд (рис. 3 отчета по этапу №5) отвечают теоретические эволюционные треки для звезд с массами 2.5-2.6 солнечных. ИК-избытки излучения в полосах JHK обзора 2MASS у обеих звезд, возможно являются остатками газо-пылевых дисков, из которых звезды сформировались. Наша попытка проверить принадлежность звезд к молодым объектам Ae/Be Хербига не показала наличия характерного признака – эмиссии в отдельных линиях. Другое возможное объяснение избытка ИК-излучения – присутствие холодных близких компонентов большой светимости, которые не разделяются оптически. Тетцлафф с коллегами [39] нашли, что возраст звезды HD 63347 около 20 млн. лет, а значит предположение о остаточных пылевых дисках этих двух звезд более предпочтительно.

В результате аппроксимации отдельных участков в зеемановских спектрах звезды HD 50341 и в эшелле-спектре звезды HD 63347, мы оценили содержания нескольких элементов, в том числе: железа, хрома, титана, магния и кремния. Эти результаты следующие: у обеих звезд содержание железа приблизительно одинаково и показывает избыток по сравнению с Солнцем [2] на 0.94 dex в спектре HD 50341 и 1.34 dex – у HD 63347. Хром также представлен в одинаковом избытке (2.70 dex). Титан в спектре HD

50341 показывает избыток на 0.09 dex, что является незначимой величиной, а вот у HD 63347 избыток достигает 0.60 dex. Статистически не значимый избыток обнаружен у магния (0.03 dex у звезды HD 50341 и 0.16 dex – у HD 63347). Широкий спектральный диапазон эшелле-спектра звезды HD 63347 позволил оценить содержание кремния, который оказался в дефиците (-0.97 dex в сравнении с Солнцем). Из редкоземельных элементов в спектре HD 63347 наблюдаются линии Nd III, из интенсивности которых следует, что элемент на 2.59 dex обильнее представлен в атмосфере пекулярной звезды. Еще больше обогащение показали несколько линий Eu (+3.97 dex по отношению к Солнцу). В целом, полученная картина содержания элементов отвечает молодому возрасту звезд.

В отличие от остальных звезд, изученных в ходе выполнения нашего проекта, исследования свойств горячей звезды HD 184927 с усиленными линиями гелия в спектре были основаны на наблюдательном материале, полученном на зарубежном канадо-франко-гавайском телескопе CFHT. HD 184927 показывает несколько необычных для представителя класса He-strong звезд характеристик. В частности, это резкие спектральные линии. Это делает звезду очень удобным объектом для моделирования, так как магнитное уширение в резких линиях регистрируется легче, чем в широких. Согласно литературным данным, скорость вращения $v \sin i = 35$ км/с. Это значение существенно ниже, чем среднее для He-strong звезд. Сочетание низкой скорости вращения и сильной переменности делает HD 184927 уникальным объектом среди звезд He-strong.

Для анализа геометрии магнитного поля и физических свойств HD 184927 было использовано 22 циркулярно поляризованных спектра. Для построения модели атмосферы были взяты два спектра (A и B) в фазах максимальной и минимальной интенсивности гелиевых линий. Для моделирования был использован код TLUSTY, позволяющий проводить не-ЛТР анализ атмосферы. Для построения синтетического спектра использовался код SYNSPEC. Были рассчитаны плоскопараллельные

атмосферы в предположении гидростатического равновесия с учетом покровного эффекта металлических линий. Эффективная температура была получена исходя из предположения ионизационного баланса линий Si II-III (Si II 4124-31, Si III 4553, Si III 4575). Совместное соответствие модельных профилей с данными линиями в спектрах при одной и той же температуре возможно только в предположении содержания кремния на 30-50% ниже солнечного. Оба спектра могут быть описаны при эффективной температуре $T_{\text{эфф}} = 22000$ К. Значение $\lg g$ по спектру А – 4.0, по спектру В – 3.75. Значение светимости $L = 4000L_{\odot}$. Радиус был рассчитан напрямую из уравнения Стефана-Больцмана. Масса высчитывалась по значению радиуса и $\lg g$, отсюда и большая неопределенность этой величины. Итоговые параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Итоговые физические параметры звезды HD 184927.

| Спектральный класс | B2V |
|--------------------|-------------------------------|
| $T_{\text{эфф}}$ | 22000±1000 К |
| $\lg g$ | 3.75 – 4.00 |
| $\lg L/L_{\odot}$ | 3.60 |
| R/R_{\odot} | 4.3 |
| M/M_{\odot} | 4 – 7 |
| $v \sin i$ | 10 ± 5 км/с |
| Si/H | $(1.62 – 2.27) \cdot 10^{-5}$ |

Среднее продольное магнитное поле B_e было посчитано по методу Least-Squares Deconvolution (LSD) для серии средних профилей. Кривая магнитного поля (рис. 12 отчета по этапу №5) хорошо аппроксимируется синусоидой, что говорит о его простом строении. Мы попытались описать такое поведение кривой в терминах модели наклонного ротатора. Кривая продольного магнитного поля хорошо описывается центральным диполем с углом наклона к оси вращения $\beta = 48^{\circ}$ и величиной магнитной индукции

на полюсе $B_d = 3400$ Гс. Угол наклона оси вращения к лучу зрения составляет примерно 50° . Однако, магнитное поле, измеренное по линиям водорода, оказывается заметно выше, чем методом LSD, что может говорить о отличной от дипольной структуре магнитного поля. Для выяснения этого вопроса нами была применена техника доплер-зеemanовского картирования поверхности на основе триплета кислорода в области 7774 \AA .

Мы использовали триплет кислорода O III $7772, 7774, 7775 \text{ \AA}$, позволяя программе подогнать содержание и силы осцилляторов двух более слабых линий. Магнитное поле выражалось как суперпозиция сферических гармоник с $l_{\max} = 2$. Это основная параметризация, включающая в себя полоидальную и тороидальную компоненты и независимые коэффициенты для радиального и горизонтального полоидального поля. Конечный расчет геометрии магнитного поля представлен на рис. 13 отчета по пятому этапу программы. Для наглядности на рис. 14 этого же отчета приведены синтетические линии для приближения полностью дипольного поля. Можно заметить из сравнения, что разница не сильная, но довольно заметная.

Таким образом, в результате доплер-зеemanовского картирования было получено поверхностное распределение кислорода и восстановлено распределение магнитного поля звезды. Наши результаты показали, что в первом приближении строение магнитного поля можно принять за диполь, однако детальное моделирование обнаруживает ряд отличий в геометрии. Сопоставление распределений магнитного поля и кислорода в атмосфере звезды не обнаруживает каких-либо значимых корреляций между ними – пятно с увеличенным содержанием кислорода как бы «предшествует» появлению пятна с усиленным полем. Более интересные результаты стоит ожидать по итогам картирования по линиям железа или кремния. Поэтому полученные в результате выполнения работы результаты можно рассматривать как промежуточные.

2 Аналитический отчет о проведении экспериментальных исследований

2.1 Химический состав и стратификация химических элементов в атмосфере Ар-звезды HD 8441

Звезда HD 8441 относится к химически пекулярным звездам, принадлежащим, согласно классификации Каули и Генри [15], к подгруппе Ар-звезд с сильными и многочисленными линиями элементов железного пика в спектрах, тогда как редкоземельные элементы, в сравнении с другими Ар-звездами, представлены слабо. Кроме HD 8441, к этой подгруппе Каули и Генри отнесли еще три Ар-звезды. Рябчикова с коллегами [33] изучали одну из звезд этой группы – HD 204411 и подтвердили относительно низкое содержание редкоземельных элементов и значительные избытки элементов Sr и Fe, а также определили, что звезда близка к завершению своей жизни на Главной последовательности. В последние годы были обнаружены еще несколько звезд, обладающих подобными характеристиками: HD 133792 [16], HD 103498 [12], HD 5797, HD 40711 [36].

Следуя результатам из работы Норта и др. [27], HD 8441 является первичным компонентом тройной системы типа SB1. Период двойной системы составляет 106.357 дней, третий компонент имеет оценочный орбитальный период более 5000 дней. Период вращения HD 8441 $P = 69.5$ суток был определен Вольф и Моррисон [8] по изменению блеска в системе Стрёмгрена, а затем уточнен Ракошем и Фидлером [31] по изменению блеска в системе UVV. Уточненный период составляет 69.43 суток. Этот период недавно был подтвержден по высокоточным измерениям магнитного поля, выполненными Орьером и др. [28]. Продольное магнитное поле HD 8441 меняется в пределах $-100 - +200$ гаусс, что вполне согласуется с более

ранними менее точными измерениями продольного поля, выполненными Бэбкоком [6].

Все перечисленные проэволюционировавшие Ар-звезды имеют достаточно слабые магнитные поля, продольная составляющая которых не превышает нескольких сотен гаусс. Узкие линии в спектрах свидетельствуют о периодах вращения больше 10 суток. HD 103498 так же как и HD 8441 является членом кратной системы. Однако, согласно литературным данным, по химическому составу HD 8441 может отличаться от других членов указанной выше подгруппы. Химический состав HD 8441 впервые был исследован в работе Адельмана [1] по фотографическим спектрам в области 3800-4700 Å, а затем был переопределен в последующих работах с его участием с использованием более современных атомных данных, но основываясь на тех же самых измерениях эквивалентных ширинок линий в фотографических спектрах. В этих работах было получено достаточно высокое содержание некоторых редкоземельных элементов, но все оценки базировались на измерениях малого числа линий для каждого иона. Неучет блендирования линиями элементов железного пика, содержание которых очень велико в атмосфере, может существенно повлиять на определение содержания других химических элементов. Для уточнения химического состава атмосферы HD 8441, ее эволюционного статуса и принадлежности к той или иной группе необходимо провести детальное изучение атмосферы звезды по спектрам высокого разрешения и в более широком спектральном диапазоне.

2.1.1 Спектральный материал и его обработка.

Для анализа химического состава звезды были использованы два эшелле-спектра, полученные со спектрографом МАЭСТРО на 2-м телескопе обсерватории на пике Терскол в 2008 г. Первичная обработка двумерных данных состояла в построении усредненного снимка с током смещения (bias) с его вычитанием из всех спектров плоского поля, звезды и калибровочной

лампы, исправлении изображений за неоднородность чувствительности элементов приемника и экстракции одномерных спектров. Привязка спектров к длинам волн осуществлялась по спектру сравнения ThAr лампы. Затем отдельные порядки эшелле-спектров были нормированы на уровень непрерывного спектра. Все перечисленные операции выполнялись с использованием программ из состава системы обработки данных IRAF. Сведения о спектрах приведены в сводной таблице 2.

Таблица 2. Журнал наблюдений с указанием юлианской даты.

| JD, 2450000+ | Диапазон, Å | Спектральное разрешение | S/N (λ) | Прибор |
|---------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 4488.135 | 3800-7000 | 36 000 | 250 (5500 Å) | МАЭСТРО |
| 4808.163 | 3780-7000 | 38 500 | 140 (5520 Å) | МАЭСТРО |
| 5765.483 | 4420-4970 | 15 000 | 270 (4650 Å) | ОЗСП |

С целью измерения продольного магнитного поля HD 8441 на 6-м телескопе БТА с Основным звездным спектрографом (ОЗСП) в режиме круговой спектрополяриметрии был получен один зеемановский спектр. В наблюдениях использовался анализатор поляризации с вращающейся четвертьволновой пластинкой в сочетании с резателем изображения [44]. В качестве приемника излучения использовалась ПЗС-система на основе чипа EEV CCD42-90, изготовленная в CAO Лабораторией перспективных разработок. Итоговый зеемановский спектр получается из суммы двух экспозиций, полученных при разной ориентации фазовой пластинки (0, 45°) относительно дихроичного поляризатора. Такой наблюдательный подход обеспечивает регистрацию ортогонально-поляризованных спектров на одних и тех же элементах приемника и, следовательно, снижает влияние инструментальных эффектов. Вся обработка данных, за исключением нормировки на континуум, была выполнена в системе ESO MIDAS с использованием набора программ Zeeman, написанного Д.О. Кудрявцевым

[18]. Поляризованные спектры были нормированы на уровень непрерывного спектра с помощью программы Continuum из состава IRAF. Последовательность шагов обработки и экстракции одномерных спектров полностью аналогична тем, что были в случае эшелле-спектров, кроме коррекции неоднородной чувствительности элементов ПЗС и с учетом другого формата данных. Отказ от процедуры нормировки на плоское поле обусловлен тем, что наши измерения продольного магнитного поля (см. соответствующий раздел) носят позиционный характер и незначительные ошибки проведения континуума не влияют на точность измерения B_e .

2.1.2 Определение эффективной температуры и ускорения свободного падения

Используя наблюдаемые фотометрические индексы в стремгреновской и женевской системах, мы получили оценочные значения эффективной температуры и логарифма ускорения силы тяжести для HD 8441. Значения индексов в системе Стрёмгрена: $V = 6.676$, $b-y = 0.022$, $mI = 0.145$, $cI = 1.145$, $\beta = 2.833$, были взяты из каталога [41]. Фотометрические данные женевской системы: $U = 1.557$, $V = 0.934$, $B1 = 0.875$, $B2 = 1.496$, $VI = 1.640$, $G = 2.109$ взяты из каталога [32].

По калибровкам индексов $[b-y]$ и $[cI]$ [26] была получена эффективная температура $T_{\text{eff}} = 9130$ К и логарифм ускорения силы тяжести $\lg g = 3.42$. Калибровки индексов Женевской системы [20], реализованные в пакете программ TempLogG дают $T_{\text{eff}} = 9248 \pm 98$ К, $\lg g = 3.64 \pm 0.10$ для солнечной металличности и $T_{\text{eff}} = 9005 \pm 78$ К, $\lg g = 3.30 \pm 0.11$ для металличности $[M/H] = +1$.

Усреднение этих данных приводит к следующим параметрам атмосферы звезды: $T_{\text{eff}} = 9130 \pm 100$ К, $\lg g = 3.45 \pm 0.17$.

Для дальнейшего уточнения параметров атмосферы звезды использовался наблюдаемый профиль линии H_{β} . В этой области

эффективных температур профиль линии больше чувствителен к ускорению силы тяжести.

По программе Куруца ATLAS9 для температур в диапазоне от 8900 до 9300 К (с шагом 100 К) и значений логарифма ускорения силы тяжести от 3.3 до 3.6 (с шагом 0.1) была рассчитана сетка моделей атмосфер.

Далее, по программе Synth3 [17] была рассчитана серия синтетических спектров в области водородных линий, профили которых сравнивались с наблюдаемыми. В результате оказалось, что эффективная температура $T_{\text{eff}} = 9130$ К и $\lg g = 3.4$ достаточно хорошо подходит для описания профиля линии H_{β} . На рис. 1 приведено сравнение наблюдаемого профиля линии H_{β} с синтетическими профилями, рассчитанными для набора моделей атмосферы.

2.1.3 Факторы уширения спектральных линий – магнитное поле, вращение и микротурбуленция

Принадлежность HD 8441 к классу магнитных Ap-звезд была установлена Г. Бэбкоком по 13 измерениям продольного магнитного поля (V_e). На основании этих измерений, Штейниц [45] определил период переменности магнитного поля звезды 2.9632 дня. Бычков и др. [5], анализируя, в основном, эти же данные, пришли к выводу о другом возможном периоде переменности продольного поля 1,80889. На основе 8 однородных высокоточных наблюдений, Орьер и др. [28] показали, что период измерения магнитного поля лежит вблизи 69.5 дней, что соответствует периоду фотометрической переменности.

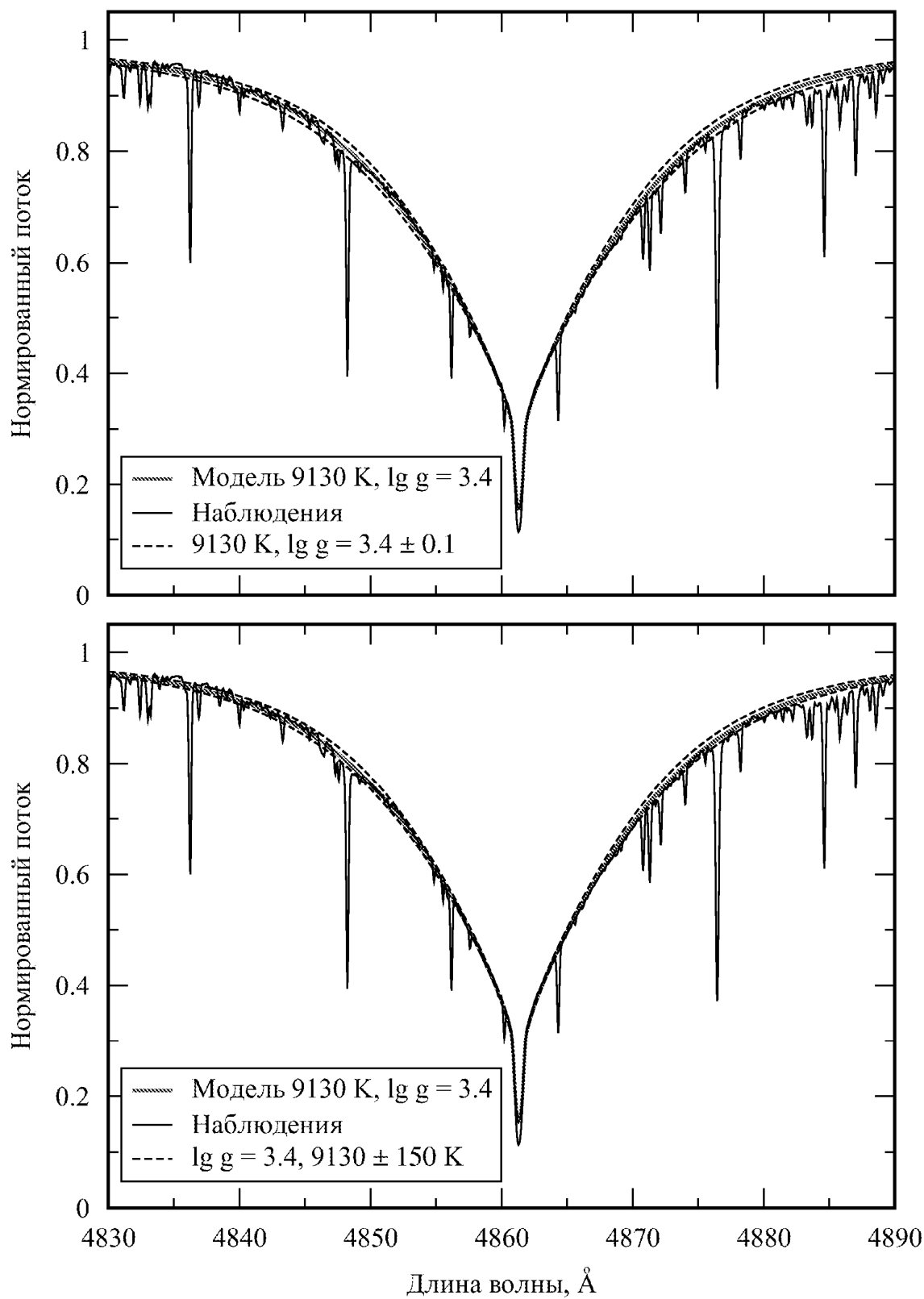


Рис. 1. Сравнение наблюдаемого профиля линии H_{β} в спектре HD 8441 с теоретическими, рассчитанными для разного набора параметров атмосферы.

Чтобы проверить предположение о большом периоде вращения звезды нами на 6-м телескопе САО РАН с Основным звездным спектрографом в режиме спектрополяриметрии были проведены наблюдения. Измерение смещений центров тяжести отдельных линий в поляризованных спектрах приводит к значению продольного магнитного поля $B_e = 124 \pm 50$ Гс. Данная величина была получена как среднее по 210 линиям и соответствует моменту времени JD2455765.483. Для контроля в эту же ночь были получены спектры звезд-стандартов: β CrV и HD 158974. Первый стандарт – магнитная Ар-звезда с хорошо известным законом изменения продольного магнитного поля. Вторая звезда не имеет в пределах ошибки измерений магнитного поля и была использована нами для оценки величины инструментальной поляризации. За счет регистрации поляризованных спектров на одних и тех же элементах приемника при разном положении фазовой пластинки, после сложения двух снимков инструментальная поляризация должна обратиться в нуль. Измерение продольного магнитного поля немагнитной HD 158974 по 303 линиям дало величину $B_e = 0 \pm 50$ Гс, подтверждая хороший учет инструментальных эффектов. Продольное магнитное поле звезды β CrV в момент времени JD2455765.285 по измерениям 252 линий было равно - 164 ± 50 Гс.

Рис. 2 демонстрирует фазовую кривую изменения продольной составляющей магнитного поля HD 8441, построенная по данным из работы Орьеера и др. [28] с периодом $P = 69.2$ дня, на которую нанесена точка, соответствующая нашим измерениям. Несмотря на значительный сдвиг по времени нашего наблюдения от наблюдений Орьеера и др., видно, что наше значение продольного поля хорошо согласуется с периодом вращения около 69 дней. В то же время наша точка не ложится на кривую, представленную в работе Бычкова и др. Амплитуда поля невелика (от -100 до 200 Гс). Необходимо отметить, что такие слабые магнитные поля не характерны для большинства магнитных Ар-звезд.

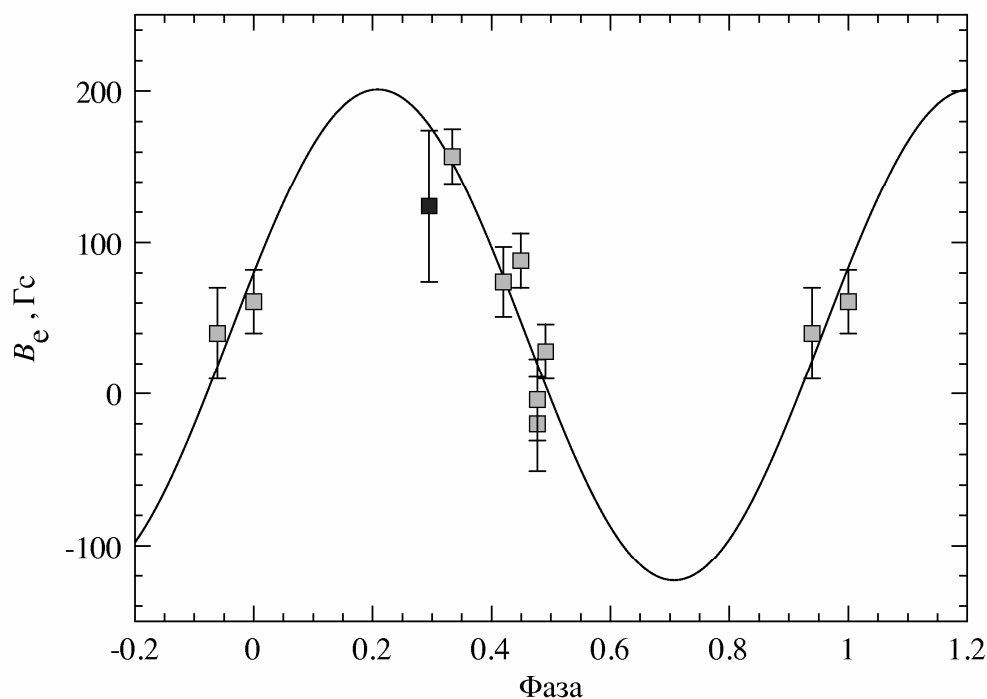


Рис. 2. Кривая переменности продольного магнитного поля HD~8441 согласно Орьеру и др. Черным цветом отмечено значение, полученное нами на 6-м телескопе в 2011 г.

Предположение о медленном вращении HD 8441 можно проверить, воспользовавшись формулой твердотельного вращения, если известен период и радиус звезды в солнечных единицах.

Предполагая $R = 3-4$ радиуса Солнца и период $P = 69.2$ дня, скорость вращения на экваторе HD 8441 должна быть равной 2-3 км/с. Если воспользоваться значением периода из работы Бычкова и др. [5], тогда экваториальная скорость звезды должна быть достаточно большой: от 84 до 110 км/с. В спектре HD 8441 все неблендированные линии – узкие, что говорит о малой проекции скорости вращения звезды. Вследствие этого факта, при коротком периоде вращения звезда должна быть видна со стороны полюса. Однако, фотометрическая переменность звезды косвенно свидетельствует о том, что угол i между осью вращения и направлением на луч зрения большой. Уточнить проекцию скорости на луч зрения по имеющимся у нас спектрам нельзя, т.к. ширина инструментального профиля спектрографа МАЭСТРО в наши ночи наблюдений соответствует значению

$v \sin i \approx 7.5$ км/с. В то же время, согласно Карье и др. [14] и Норту и др. [27], проекция скорости вращения HD 8441 существенно ниже 7 км/с и равна, соответственно, 2.9 и 2.35 км/с. Таким образом, период вращения HD 8441 $P \approx 69$ сут. по всей видимости является более предпочтительным.

Микротурбулентная скорость обычно определяется значением, при котором исчезает зависимость содержания по индивидуальным линиям от эквивалентных ширин. Нами использовалась большая выборка по линиям нейтрального и однократно-ионизованного железа, по которой было получено, что значение микротурбулентной скорости лежит в пределах от 0 до 0.5 км/с, что говорит об отсутствии значительного магнитного усиления интенсивности спектральных линий, т.е. о небольшой величине модуля магнитного поля. Для дальнейших расчетов химического состава нами было выбрано значение микротурбулентной скорости 0.3 км/с.

2.1.4 Химический состав атмосферы и распределение химических элементов с глубиной

Отождествление линий в спектре проводилось сравнением наблюдаемого и синтетического спектров, который был рассчитан по программе Synth3 для принятой модели атмосферы с $T_{\text{eff}} = 9130$ К и $\lg g = 3.4$. Атомные данные для расчета взяты из базы данных VALD. В наблюдаемом спектре HD 8441 нами были измерены эквивалентные ширины более чем 850 свободных от блендирования линий. По измеренным эквивалентным ширинам и выбранной модели атмосферы были определены содержания химических элементов в атмосфере HD 8441. Для анализа химического состава использовалась версия 2010 года программы WIDTH [43]. Содержания по индивидуальным линиям химических элементов рассчитывались для набора микротурбулентных скоростей. Окончательное значение микротурбулентной скорости, при которой отсутствует корреляция между индивидуальным содержанием и эквивалентной шириной линий Fe, принято $v_{\text{micr}} = 0.3$ км/с. Содержания по индивидуальным линиям

элементов/ионов усреднялись. Окончательное содержание элементов приведено в таблице 3. На примере линий Fe I, Fe II, Cr I, Cr II видно существенное различие в содержаниях для линий одного элемента, находящегося в разных стадиях ионизации. В частности, содержание по линиям элемента в первой стадии ионизации существенно выше, чем по линиям нейтрального элемента. В нормальных звездах это свидетельствует о неправильном выборе параметров атмосферы звезды. В частности, для HD 8441 ионизационное равновесие может быть достигнуто при увеличении эффективной температуры до 9400 К, что не согласуется с фотометрическими данными и профилями водородных линий. В атмосферах магнитных пекулярных звезд, где медленной вращение и магнитное поле приводят к стабилизации всех макро- и микро-движений, диффузия химических элементов под совокупным действием радиационного давления и гравитации [23] создает градиенты химического состава. Поэтому мы предположили, что в атмосфере HD 8441 существует вертикальная стратификация элементов, т.е. неоднородное распределение химических элементов в атмосфере с глубиной. В пользу такого предположения говорит низкая скорость вращения HD 8441 и наличие магнитного поля, дополнительно стабилизирующее атмосферные слои. Для стратификационного анализа нами были выбраны около 20 линий хрома и железа, и несколько меньшее количество линий элементов Si, Ca, Mn, которые образуются в разных слоях атмосферы. Это, например, линии с одинаковыми силами осцилляторов, но существенно отличающимися потенциалами возбуждения, и, наоборот – с похожими значениями потенциалов возбуждения и различающимися силами осцилляторов. Измерениям подвергались линии в двух стадиях ионизации.

Таблица 3. Содержание элементов в атмосфере HD 8441. Для сравнения приведены данные о содержании элементов в атмосферах HD 66318 и HD 144897, а также данные о солнечном содержании элементов, n – число измеренных линий.

| Ион | HD 8441 | | HD 66318 | HD 144897 | Солнце |
|----------------------|-------------------------------------|-----|------------------------|------------------------|------------------------|
| | $\lg N/N_{\text{tot}}$ (σ) | n | $\lg N/N_{\text{tot}}$ | $\lg N/N_{\text{tot}}$ | $\lg N/N_{\text{tot}}$ |
| Na I | -5.66 (0.19) | 3 | | | -5.87 |
| Mg I | -4.70 (0.26) | 4 | -4.95 | -5.6 | -4.51 |
| Mg II | -4.57 (0.23) | 3 | -4.95 | -5.6 | -4.51 |
| Si II | -5.10 (0.37) | 5 | -2.8 | -3.8 | -4.53 |
| Ca I | -6.44 (0.25) | 3 | -6.4 | -6.0 | -5.73 |
| Ca II | -6.37 (0.27) | 2 | -6.4 | -6.0 | -5.73 |
| Sc II | -9.90 | 1 | | | -8.99 |
| Ti II | -7.20 (0.19) | 30 | -5.15 | -6.4 | -7.14 |
| V II | -8.80 (0.12) | 2 | | | -8.04 |
| Cr I | -4.16 (0.19) | 131 | -3.8 | -4.3 | -6.40 |
| Cr II | -4.06 (0.14) | 214 | -3.8 | -4.3 | -6.40 |
| Mn I | -6.24 (0.22) | 6 | -6.85 | -5.3 | -6.65 |
| Mn II | -5.75 (0.17) | 10 | -6.85 | -5.3 | -6.65 |
| Fe I | -4.00 (0.20) | 157 | -3.05 | -3.5 | -4.59 |
| Fe II | -3.64 (0.20) | 249 | -3.05 | -3.5 | -4.59 |
| Co I | -6.14 (0.13) | 2 | | -4.67 | -7.12 |
| Ni I | -6.08 (0.09) | 2 | | | -5.81 |
| Sr II | -6.98 (0.25) | 4 | | -7.45 | -9.12 |
| Y II | -9.69 (0.11) | 6 | | -7.70 | -9.83 |
| Ba II | -9.59 (0.19) | 3 | | -9.0 | -9.87 |
| Pr III | -9.41 | 1 | -8.3 | -6.69 | -11.33 |
| Nd III | -9.26 (0.28) | 9 | -7.0 | -6.45 | -10.59 |
| Eu II | -9.36 (0.04) | 4 | -8.4 | -7.75 | -11.52 |
| Gd II | -9.27 (0.25) | 4 | ≤ -9.0 | -6.95 | -10.92 |
| Dy III | -9.17 | 1 | | -6.99 | -10.90 |
| T_{eff} , К | 9130 \pm 100 | | 9200 \pm 200 | 11250 | 5777 |
| $\lg g$, dex | 3.4 \pm 0.1 | | 4.25 | 3.7 | 4.44 |
| B_s , κΓс | 0.3 | | 14.5 | 8.8 | |
| $v \sin i$, км/с | ≤ -7.0 | | ≈ 3.0 | 3.0 | |

По линиям хрома отмечена тенденция, что однородная модель атмосферы дает избытки в содержаниях для верхних слоев атмосферы, где формируется ядра линий, и недостаточное содержание для глубоких слоев атмосферы, где формируются крылья линий. По линиям железа отмечена тенденция, что однородная модель атмосферы достаточно хорошо описывает ядра линий, но содержания для глубоких слоев атмосферы, где формируются крылья линий, меньше истинных.

Анализ стратификации проводился по наблюдаемым профилям линий с использованием программы DDaFit, написанной О. Кочуховым на языке программирования IDL. В этой программе распределение элемента аппроксимируется ступенчатой функцией, и мы находим 4 параметра: содержание элемента в нижних слоях атмосферы, содержание элемента в верхних слоях атмосферы, положение и ширину скачка в содержании, а также формальную ошибку моделирования для каждого параметра.

В результате стратификационного анализа была получена уточненная модель атмосферы, в которой распределение таких элементов как кальций, хром, железо, марганец и кремний имеет неоднородный характер. На рис. 3 представлено распределение элемента в атмосфере HD 8441 на примере хрома и кремния. Заштрихованная область соответствует формальной ошибке моделирования $\pm 1\sigma$. Для сравнения на этом же рисунке показано распределение этих элементов, рассчитанное по теории диффузии в атмосфере звезды с параметрами $T_{\text{eff}} = 9200 \text{ K}$, $\lg g = 4.0$. [22]. Качественно, наблюдаемое нами распределение элементов согласуется с теоретически предсказанной стратификацией.

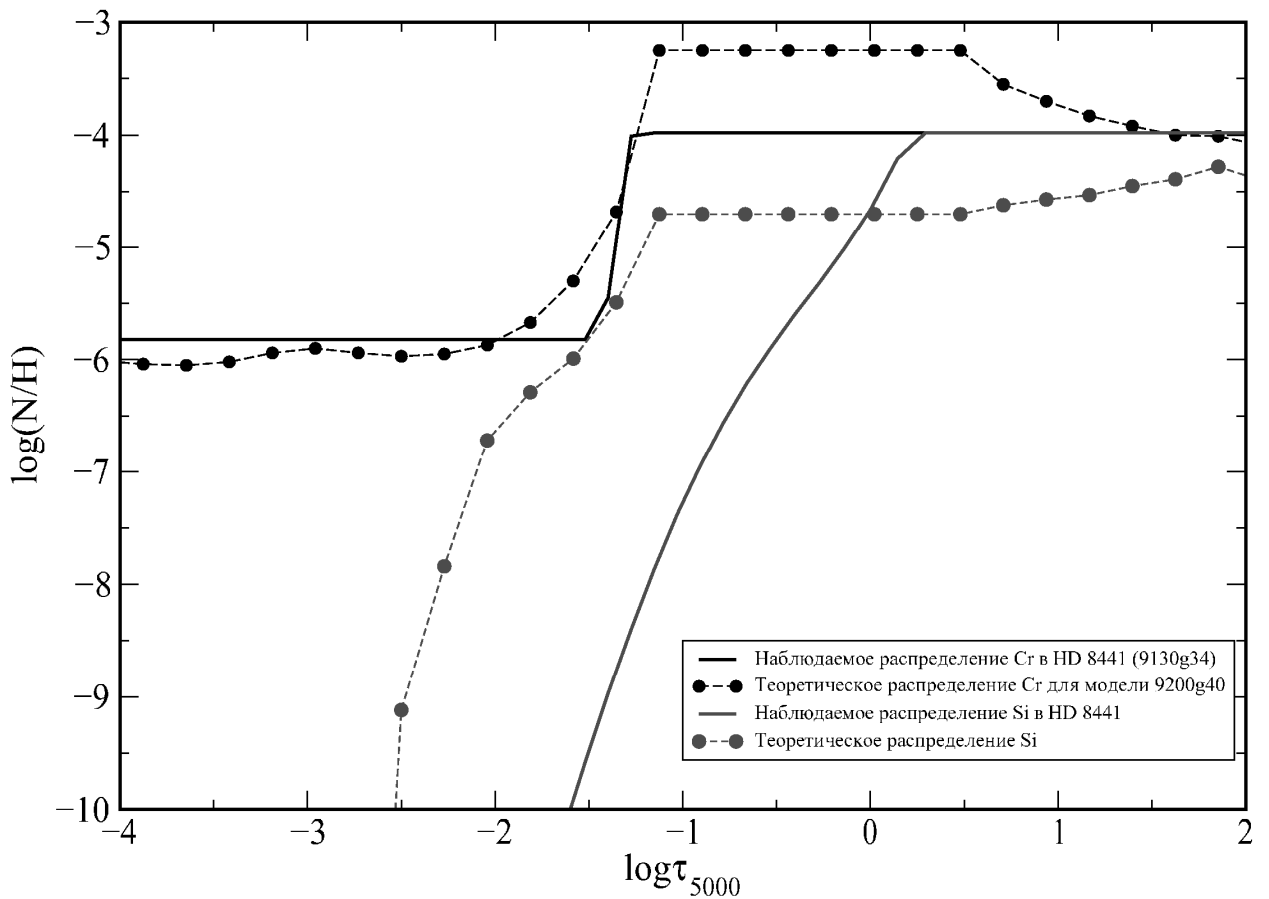


Рис. 3. Распределение элементов хрома и кремния в атмосфере HD 8441. Заштрихованная область соответствует формальной ошибке моделирования.

2.1.5 Эволюционный статус HD 8441 и сравнение ее с другими Ар-звездами

К настоящему времени из-за малой численности изученных Ар-звезд, обладающих слабыми магнитными полями и находящихся вблизи линии Главной последовательности нулевого возраста, затруднительно дать ответ на вопрос о причинах наблюдаемых отклонений. В данном исследовании мы предприняли попытку сравнить химический состав звезды HD 8441 с аналогичными показателями двух звезд с близкими атмосферными параметрами, но разными эволюционными статусами.

Оценка возраста HD 8441, ее массы и светимости была получена с использованием стандартных соотношений. Исходные данные следующие: параллакс $\pi = 4.88 \pm 0.59$ угловых мс [7], $m_V = 6.68$, $T_{\text{eff}} = 9130$ К. Эквивалентная ширина линии Na D1 0.1 \AA позволяет оценить степень

межзвездного покраснения. Согласно калибровке для соотношения $E(B-V)-W_\lambda(D1)$ из работы Мунари и Цвиттера [25], избыток цвета для HD 8441 равен 0.03^m , следовательно, $A_V = 0.09^m$. Боллометрическая поправка -0.08^m получена путем интерполяции таблиц из работы Флауэра [40]. Таким образом, абсолютная звездная величина HD 8441 $M_V = 0.03 \pm 0.25$, а ее светимость $\lg L/L_\odot = 1.91 \pm 0.12$. Эти данные позволяют определить положение звезды на теоретической диаграмме Герцшпрунга-Рессела и оценить ее возраст и эволюционный статус. Из рис. 4. видно, что звезда на диграмме попадает на трек для звезды с массой $2.7M_\odot$, а ее возраст, оцененный по изохронам из работы Джирарди и др. [10], приблизительно равен 5.2×10^8 лет. Судя по возрасту звезды и ее положению среди других, ранее изученных, проэволюционировавших Ар-звезд, нет сомнений в принадлежности HD 8441 к этой группе. Результаты изучения химического состава атмосферы HD 8441 служат еще одним подтверждением этому выводу.

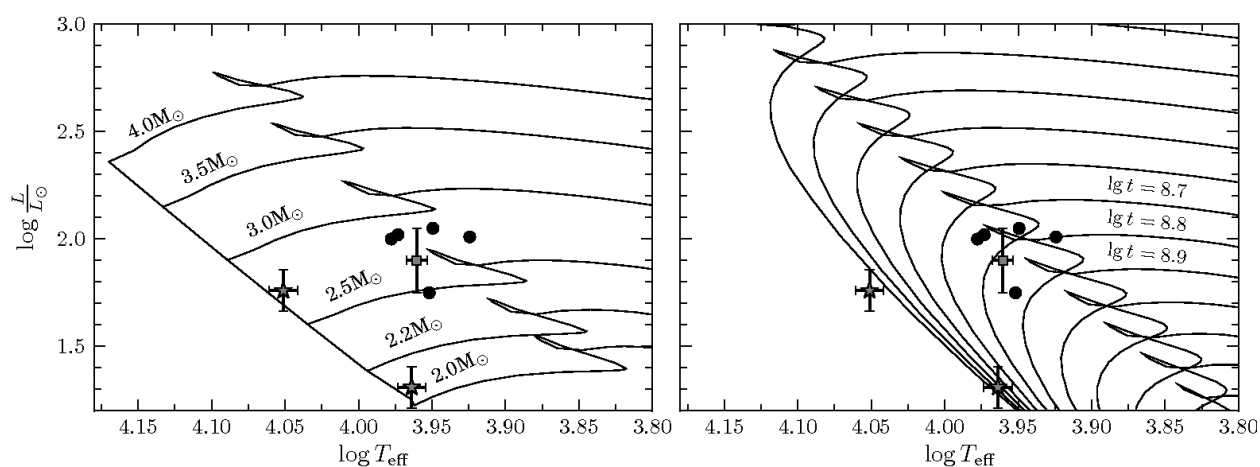


Рис. 4. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела с отмеченным положением звезды HD 8441 (серый квадрат) и звезд сравнения HD 66318, HD 144897. Точками отмечены ранее изученные проэволюционировавшие магнитные Ар-звезды.

Для сравнения были выбраны две Ар-звезды: HD 66318 и HD 144897. Первая звезда была изучена в работе Баньюло и др. [4]. Следуя авторам, она имеет близкую к HD 8441 эффективную температуру – 9200 К, и несколько меньшую массу – $2.1M_\odot$ против $2.7M_\odot$ у HD 8441. Положение звезды на

Главной последовательности вблизи линии нулевого возраста говорит о том, что звезда молодая. Результаты изучения химического состава атмосферы HD 66318, представленные в работе Баньюло и др. и для удобства приведенные в табл. 3, показывают сильный избыток содержания отдельных элементов, особенно это касается кремния, железа и редкоземельных элементов (РЗЭ) – празеодима, неодима и европия. HD 66318 имеет сильное магнитное поле 14.5 кГс.

Вторая звезда – HD 144897 [34] – с эффективной температурой 11250 К имеет такую же массу, как и HD 8441. С учетом положения звезды недалеко от области нулевого возраста Главной последовательности, HD 144897 может рассматриваться, как предшественник группы магнитных Ар-звезд со слабыми аномалиями содержания РЗЭ. Именно поэтому изучение аналогичных объектов представляет особый интерес для прояснения механизма процессов, ответственных за «обеднение» атмосфер звезд типа HD 8441 редкоземельными элементами. В атмосфере HD 144897 наблюдается сильный избыток практически всех РЗЭ со стабильными ядрами, например, обилие Nd более чем на 4 порядка превышает солнечное. Большие избытки показывают Pr и Eu. Для более детального сравнения содержание химических элементов в атмосфере HD 144897 приведено в таблице 3. Магнитное поле на поверхности звезды достаточно велико, 8.8 кГс.

Из анализа данных таблицы 3 становится ясно, что звезды с разным эволюционным статусом и/или магнитным полем отличаются не только содержанием РЗЭ. Элементы α -процесса Si и Ti, а также, возможно, Co показывают тенденцию к уменьшению содержания с возрастом звезды, тогда как содержание других элементов Ca, Cr, Fe меняется существенно меньше и практически не зависит от возраста и магнитного поля. Этот предварительный вывод справедлив для звезд с сильными и слабыми магнитными полями, которые находятся на разных стадиях эволюции. Однако, малое количество детально исследованных Ар-звезд пока не

позволяет нам однозначно утверждать о закономерности наблюдаемых различий.

2.1.6 Заключение

Выполненное нами изучение химического состава и эволюционного статуса звезды HD 8441 подтверждает ее принадлежность к группе проэволюционировавших Ар-звезд со слабыми магнитными полями и ослабленными линиями редкоземельных элементов в спектре. Сравнение измерений продольного поля из работы Орьера и др. [28] с нашими данными свидетельствует в пользу периода вращения звезды 69.2 дня. Таким образом, обилие резких линий в спектре HD 8441 являются результатом медленного вращения звезды, а не особой ориентации в пространстве.

Используя температурные калибровки для данных женеvской и стремгеноvской фотометрии, а также на основе сравнения наблюдаемых профилей линии водорода H_{β} с расчетными, мы определили следующие параметры атмосферы звезды: $T_{\text{eff}} = 9130$ К, $\lg g = 3.4$ dex. Положение звезды на диаграмме ГР позволяет оценить массу звезды ($2.7M_{\odot}$) и ее возраст (5.2×10^8 лет).

Используя модель атмосферы звезды с указанными параметрами, по индивидуальным неблендированным линиям нами был уточнен химический состав HD 8441. Результаты основаны на измерении более 850 линий. Для элементов Si, Ca, Fe, Cr и Mn был выполнен стратификационный анализ. Полученное нами распределение элементов в атмосфере с глубиной качественно согласуется с теоретическими расчетами диффузии элементов.

Сравнение химического состава атмосферы HD 8441 с ранее опубликованными результатами исследования звезд HD 66318 и HD 144897 показало, что объекты сравнения, являясь более молодыми, в то же время содержат в своих атмосферах на один-два порядка больше РЗЭ, чем звезды, близкие к уходу с Главной последовательности. Кроме того, величина магнитного поля звезды не играет здесь определяющей роли. Обнаруженные

различия в химического составе звезд разного возраста, по всей видимости являются результатом работы механизма диффузии атомов в течение продолжительного времени. Однако, чтобы подтвердить данное объяснение требуются дополнительные исследования звезд, включая и поиски новых представителей этой группы, поскольку количество известных и изученных проэволюционировавших магнитных Ар-звезд в настоящее время невелико.

3 Отчет по обобщению и оценке результатов исследований

Основное отличие астрофизики от других естественнонаучных дисциплин заключается в методе исследований. Тогда как физические исследования предполагают повторение эксперимента в заданных условиях необходимое количество раз, физические условия на поверхности и внутри небесных тел делают каждый момент наблюдений уникальным. Кроме того, в астрофизике зачастую приходится иметь дело с регистрацией предельно малого количества света, что создает необходимость использования крупных телескопов со сверхчувствительными приемниками. Современный уровень звездных исследований невозможно представить без телескопов с диаметром зеркала 3-10 м., оснащенных крупноформатными ПЗС-матрицами. Специальная астрофизическая обсерватория РАН – единственный институт на территории бывшего Советского Союза, который располагает крупным оптическим инструментом (6-м телескоп БТА) с современным навесным оборудованием. Спектрографы ОЗСП и НЭС активно используются для регистрации спектров, на основе анализа которых решается большой набор астрофизических задач.

Наши исследования имели целью проверенными и апробированными методами выполнить изучение химически пекулярных звезд, обладающих сильными крупномасштабными магнитными полями. Интерес к изучению звезд, обладающих сильными и крупномасштабными магнитными полями, вызван в первую очередь уникальными условиями, которые нельзя в настоящий момент реализовать в условиях земных лабораторий. Изучая атмосферы звезд разной массы и на разных стадиях эволюции, мы попытались приблизиться к ответу на вопросы: что происходит с химическими элементами в сильном магнитном поле и при высокой

температуре звездных атмосфер, как меняется содержание одних и тех же элементов в звездах одинаковой массы с возрастом?

В своих исследованиях мы приняли решение разделить все изучаемые объекты на следующие четыре группы:

- 1) маломассивные А- и F-звезды, в том числе быстропульсирующие γ Ar-звезды, и которые заподозрены в пульсационной активности;
- 2) молодые Ar-звезды средней массы;
- 3) старые Ar-звезды средней массы;
- 4) наиболее массивные Vr-звезды на разных стадиях эволюции.

Наиболее маломассивные магнитные звезды спектральных классов А и F находятся у границы эффективных температур около 6500-7000 К. Их положение на Главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рессела соответствует полосе пульсационной нестабильности, в которой расположены и переменные типа δ Щита. Последние от пульсирующих Ar-звезд отличаются в первую очередь большими периодами пульсаций (несколько часов против нескольких минут) и другим, менее пекулярным, химическим составом. Быстропульсирующие звезды Ar демонстрируют сильнейшие избытки редкоземельных элементов, которые в отдельных случаях могут достигать 4-5 порядков. Но еще одно и, возможно, наиболее значимое различие – сильное структурированное магнитное поле, которое имеется у всех γ Ar-звезд и не было найдено ни у одного представителя звезд типа δ Щита. Что касается методов поиска и отождествления γ Ar-звезд, то здесь могут быть использованы данные фотометрии или спектроскопии. Фотометрические колебания блеска γ Ar-звезд происходят с периодами от 5 до 26 минут, но их амплитуда (несколько звездных милливеличин) мала настолько, что выделить характерные частоты можно только в случае очень высокого качества наблюдательных данных. Спектральный метод отождествления более предпочтителен. Быстрые изменения лучевых скоростей отдельных спектральных линий происходят с амплитудами от нескольких десятков м/с до нескольких км/с и поэтому их

измерение возможно даже с использованием спектрографов среднего разрешения. Колебания лучевых скоростей наблюдаются практически только у РЗЭ, линии железа – наиболее представленного в спектре элемента – не меняют своего положения. Единственное сильное ограничение применимости этого метода поиска α Ar-звезд – блеск объекта. Даже использование крупнейших современных телескопов не дает возможности изучать короткопериодические пульсации звезд слабее 8-9 величины.

В программу наших исследований были включены две звезды, которые по своим характеристикам и положению на ГП могут быть заподозрены в пульсационной активности. Первый объект – HD 178892 – изучалась ранее, но наши наблюдения на спектрометре НЭС показали, что известный период вращения звезды и ее поверхностное магнитное поле нуждаются в пересмотре. Новые измерения поверхностного поля показали, что в максимуме его значение достигает 23 кГс (рис. 5), что больше 17.5 кГс, как считалось ранее [35] и очень близко к значению B_s у звезды – HD 154708 [42].

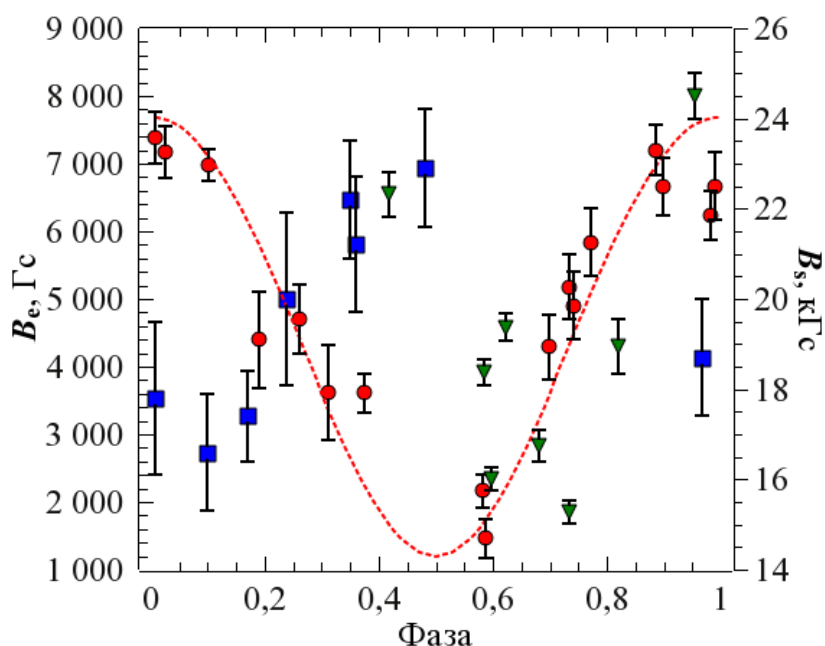


Рис. 5. График изменения продольного и поверхностного магнитного поля звезды HD 178892 по нашим наблюдениям.

Для объяснения наблюдаемых закономерностей изменения магнитного поля звезды была построена его модель в виде комбинации диполя и октуполя. О более сложном чем диполь строении магнитного поля HD 178892 свидетельствует тот факт, что изменения V_e и V_s происходят в противофазе. Итоговые параметры модели следующие: угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 36^\circ$, угол между осью диполя и осью вращения $\beta = 37^\circ$, напряженность поля на полюсе диполя $V_d = 25$ кГс, напряженность на полюсе октуполя $V_{oct} = 40$ кГс.

Анализ химического состава, выполненный нами, в целом подтвердил результаты Рябчиковой и др. [35] о сильном избытке РЗЭ (Nd, Pr, Sm, Eu, Tb), Ti, Si, Cr. Элементы группы железного пика показывают небольшой дефицит содержания. То есть, по своему химическому составу HD 178892 является типичной α Ar-звездой, однако ее поле является рекордно сильным для холодных магнитных звезд и сопоставимо со звездой HD 154708, у которой были найдены нерадиальные пульсации с предельно малыми амплитудами колебаний лучевых скоростей некоторых спектральных линий [19]. Мы исследовали химический состав в моменты времени, соответствующие максимуму и минимуму поверхностного магнитного поля и пришли к выводу о достаточно равномерном поверхностном распределении большинства химических элементов, за исключением Nd и Tb, для моделирования отдельных линий которых требуется модификация геометрии магнитного поля. Мы предложили возможное объяснение этому явлению в виде пятен концентрации ионизованных элементов. Предпринятая нами попытка найти колебания лучевых скоростей в спектрах HD 178892 по результатам наблюдений на Основном звездном спектрографе закончилась нулевым результатом, однако конфигурация оборудования и качество наблюдательных данных позволяют внести ограничения на возможный характер нерадиальных пульсаций звезды – период пульсаций должен быть в пределах от 5 до 11 минут, либо больше, но

тогда амплитуда колебаний – существенно меньше 1 км/с.

Другой объект наших исследований – маломассивная холодная звезда F0 HD 207561 была заподозрена индийскими астрономами в пульсационной активности с периодом около 6 мин., что характерно для γ Ар-звезд. Мы выполнили спектральный анализ звезды с целью проверить ее химический состав и принадлежность к магнитным звездам.

В итоге, три зеемановских спектра, полученных в разные моменты времени показали отсутствие продольного магнитного поля в пределах ошибки измерения 100 Гс. Анализ химического состава выявил небольшой дефицит Ca и Sc и умеренный избыток Fe, Cr, Mg и еще некоторых элементов (рис. 6).

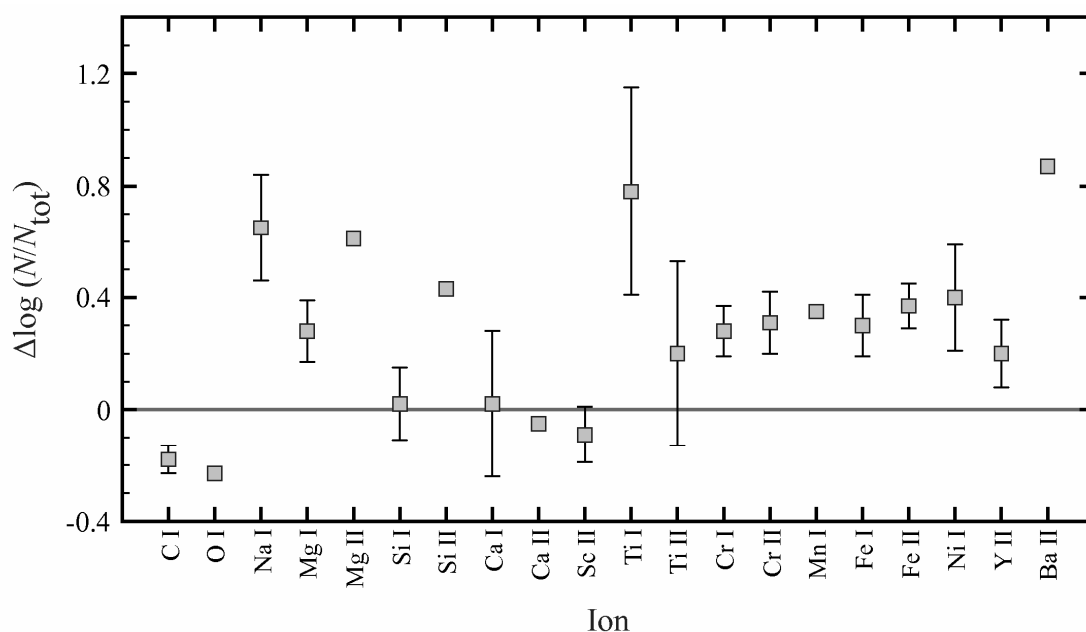


Рис. 6. Химический состав атмосферы HD 207561 по сравнению с Солнцем.

Подобный состав атмосферы в сочетании с быстрым вращением ($v \sin i = 80$ км/с) свидетельствует в пользу того, что HD 207561 является либо нормальной А-звездой, либо представляет из себя умеренную звезду Am. По своей температуре, $T_{\text{eff}} = 7300$ К была определена нами, звезда может быть и пульсирующей типа δ Щита, но тогда период ее пульсаций

будет заведомо больше 6 мин., как это было найдено Джоши и др. [11]. Таким образом, обнаруженные пульсации, по всей видимости, носят инструментальный характер.

Изучение молодых А-звезд средней массы (около $2-3M_{\odot}$) представляет интерес в связи с процессами, которые происходят в недрах звезд только что вышедших на Главную последовательность. Особое значение такие объекты имеют и для прояснения происхождения звездных магнитных полей. После завершения процесса формирования, звезда, как правило, некоторое время остается в окружении газо-пылевого облака. Типичные признаки молодых звезд – избыток излучения в ИК-диапазоне и быстрое вращение. Нас же интересует еще химический состав и магнитное поле.

В качестве объектов исследования мы выбрали три звезды, поле которых впервые было измерено на 6-м телескопе САО. Первые измерения продольного поля HD 201174 были сделаны Д.О. Кудрявцевым на спектрографе ОЗСП. Получив новые спектры, в том числе и высокого разрешения, мы оценили магнитное поле звезды. Его продольная составляющая меняется от -1000 до 2500 Гс с периодом около 1.6 суток (рис. 7). О поверхностной компоненте поля судить сложнее. Проекция скорости вращения звезды на луч зрения ($v \sin i = 16$ км/с), определенная по линии Fe II 4508.28Å не чувствительной к магнитному полю, не позволяет оценить степень магнитного уширения. Отсутствие расщепленных линий в спектре свидетельствует в пользу того, что модуль поверхностного магнитного поля должен быть меньше 6 кГс. В то же время, почти постоянное присутствие эффекта кроссовер в циркулярно поляризованных спектрах, дает основания полагать, что звезда ориентирована к нам со стороны одного из полюсов вращения ($i = 10-30^{\circ}$), а угол β между осью вращения и осью диполя близок к 90° . Тогда скорость вращения звезды на экваторе может быть достаточно большой. Таким образом, наша оценка геометрии магнитного поля находится в

хорошем согласии с выводами Ландстрита и Матиса [21] о том, что у звезд-быстрых ротаторов углы β всегда большие и близки к 90° . Пространственная ориентация звезды дает нам основания предположить, что значительной должна быть поперечная компонента магнитного поля звезды, ведь она обладая сильным полем, она практически все время видна со стороны магнитного экватора. Мы предприняли попытку обнаружить сигнал линейной поляризации от звезды, но это ничего не дало, в итоговом спектре хорошо прослеживался сигнал, образующийся вследствие перекачки круговой в линейную поляризацию.

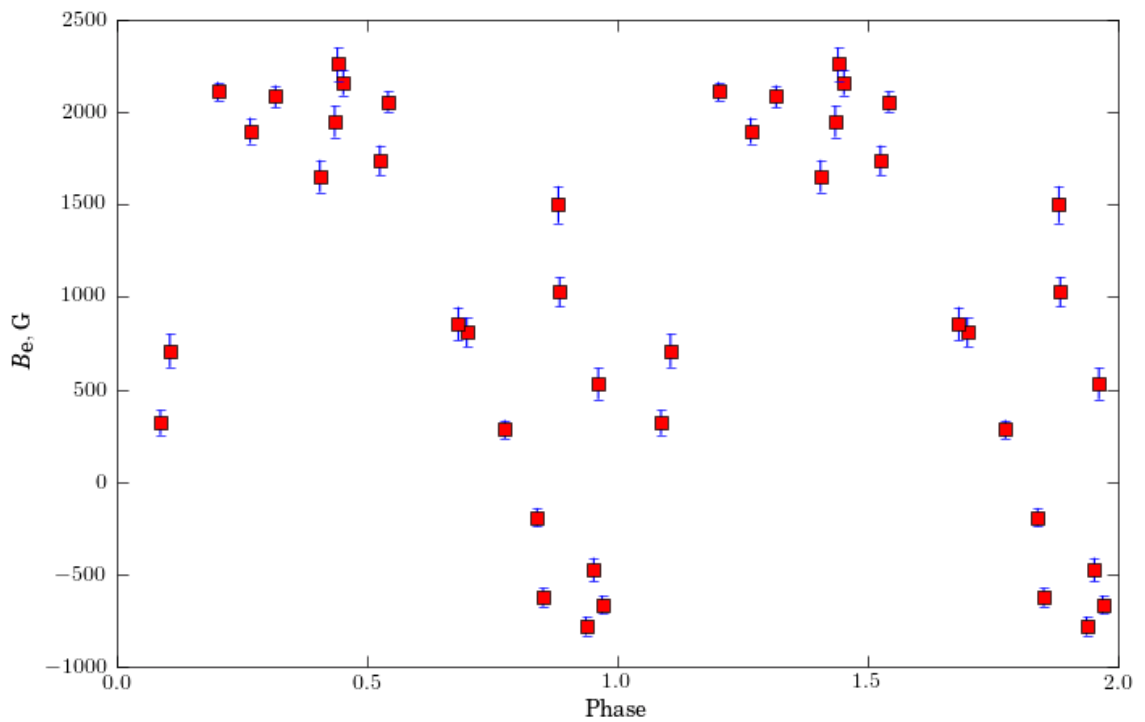


Рис. 7. График переменности продольной компоненты магнитного поля звезды HD 201174 в предположении, что период вращения звезды равен 1.5997 сут.

О молодом возрасте звезды HD 201174, как и двух других из нашей работы – HD 50341 и HD 63347, мы сделали вывод на основе их положения на теоретической диаграмме Герцшпрунга-Рессела (рис. 8).

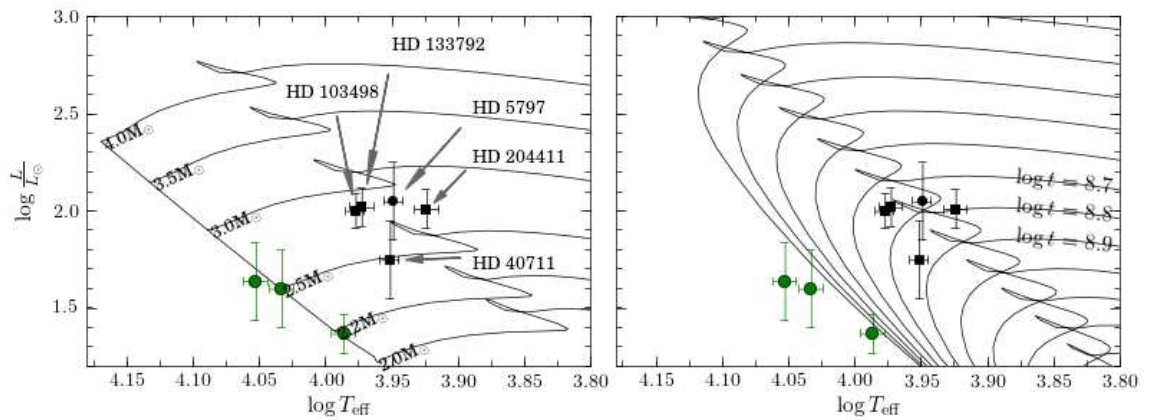


Рис. 8. Молодые звезды HD 50341, HD 63347 и HD 201174 (неподписанные кружки) на теоретической диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Для сравнения приведена группа проэволюционировавшая группа магнитных Ар-звезд.

Из анализа наблюдаемых спектров и литературных данных нами были определены физические параметры молодых звезд и их магнитного поля (табл. 4).

Таблица 4. Основные физические параметры молодых звезд, определенные в ходе исследований.

| | HD 50341 | HD 63347 | HD 201174 |
|----------------------|--------------|--------------|------------------------|
| T_{eff} , К | 10800 | 11300 | 9700 |
| $\lg L/L_{\odot}$ | 1.60 | 1.64 | 1.37 |
| $v \sin i$, км/с | 41 | 39 | 16 |
| B_d , Гс | 2160 | 5960 | ≈ 7000 |
| i | 64° | 35° | $10\text{-}30^{\circ}$ |
| β | 73° | 86° | $\leq 90^{\circ}$ |

В таблице 4 обращает на себя внимание тот факт, что магнитное поле на полюсе диполя во всех случаях не большое, зато вращаются все звезды достаточно быстро, и угол β во всех случаях достаточно велик. В то же время, большинство звезд средней массы, обладающих наибольшими полями, относятся к классу медленных ротаторов.

Отражает ли наш результат последствия влияния вращения звезд на структуру и величину магнитного поля – вопрос, который требует более глубокого изучения.

Интерес к изучению проэволюционировавших звезд возник относительно недавно, хотя сама группа звезд на стадии завершения горения водорода в ядре была выделена еще в 70-е годы 20 века. Основные признаки таких звезд – это слабые магнитные поля, медленное вращение (периоды вращения – десятки суток), ослабленные или вообще отсутствующие линии РЗЭ при значительных избытках железа и хрома. В результате выполнения поисковых задач на 6-м телескопе, нам удалось расширить выборку проэволюционировавших звезд, подтвердив отношение к ним звезд HD 5797 и HD 40711. После детального анализа свойств этих звезд [36] нами были выработаны критерии для будущих поисков. В итоге, еще одним объектом наших исследований стала новая магнитная звезда HD 96003. Вместе с тем, был начат новый анализ свойств известной слабомагнитной звезды HD 8441, которая по ряду характеристик подходит под определение звезд, уходящих с ГП. В отличие от молодых звезд HD 50341, HD 63347 и HD 201174, в атмосферах которых наблюдаются избытки РЗЭ (на 3-4 порядка), Cr, Fe, наш анализ содержания основных элементов выявил умеренное превышение РЗЭ (1.5-2.0 порядка). Эта группа элементов представлена немногочисленными слабыми линиями Pr III, Nd III, Eu II, Gd II и Dy III.

Зеемановские измерения поляризованных спектров звезды HD 96003 (табл. 2.1 отчета по этапу №3) ясно свидетельствуют о присутствии слабого и переменного магнитного поля величиной от -150 до -280 Гс. Точное определение температуры HD 96003 – более сложная задача, поскольку применением калибровок к различным фотометрическим индексам системы Стремгрена дает расхождение в оценке T_{eff} более 1000 К (8760 К и 9730 К по индексам $[u-b]$ и $[c1]$). Величина 8760 К делает HD 96003 ближе к другим проэволюционировавшим звездам. В

пользу этого свидетельствует большой период переменности (наиболее вероятное значение – несколько десятков дней) и медленное вращение (полуширина спектральных линий соответствует инструментальному профилю спектрографа, 19 км/с). Другое же значение температуры – 9730 К не соответствует тем аномалиям, которые наблюдаются в спектре. Объяснить такое сильное различие в оценках температуры можно только слишком большими отклонениями в распределении энергии в спектре звезды. Либо ее двойственностью. Известно, что HD 96003 представляет собой двойную систему с разделением 2 уг. сек. Блеск обоих компонентов одинаковый – 7.7^m . Химический состав звезды пока не изучен по причине трудности ее наблюдений. При неудовлетворительных условиях наблюдений оба компонента сливаются и разделить их спектры невозможно.

HD 8441 также относится к старым звездам, как и HD 5797, HD 40711 и ряд других звезд. Этот вывод подтверждается нашими исследованиями (разд. 2.1 настоящего отчета). Подобно HD 96003 и HD 40711 эта звезда также является двойной. Вопрос такой высокой частоты встречаемости двойных среди старых слабомагнитных звезд требует очень внимательного рассмотрения и для надежных выводов требуется расширение выборки известных звезд с заданными свойствами, а потому – это предмет будущих исследований. Касательно химического состава HD 8441, то он достаточно типичен – магний и кремний представлены в небольшом дефиците, сильный избыток железа и хрома (до 2 порядков) и незначительное превышение содержания РЗЭ (1.5-2 порядка). Положение звезды на теоретической ГП однозначно указывает на принадлежность звезды к проэволюционировавшей группе. Обнаруженные нами расхождения в содержании некоторых элементов, полученные по нейтральным и один раз ионизированным элементам, являются свидетельством неоднородного распределения элементов с глубиной. Стратификационный анализ (разд. 2.1.4 настоящего отчета)

показал, что, например, Cr и Si распределены в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями. В то же время, надо отметить, что анализ химического состава HD 40711 не выявил никаких предпосылок к неоднородностям в распределении элементов.

В целом, сравнивая молодые и старые магнитные звезды промежуточной массы, можно заключить, что основное различие между ними – содержание РЗЭ и медленное вращение. Наши исследования показывают, что молодые звезды также могут обладать слабыми полями (по сравнению с большинством магнитных Ap-звезд на всех стадиях эволюции). Таким образом, менее понятным становится влияние магнитного поля на скорость и направление протекания процесса атомной диффузии. В любом случае видно, что с возрастом концентрация РЗЭ в наблюдаемых слоях звездной атмосферы уменьшается, как уменьшается и ее магнитное поле. Предполагая магнитный поток звезды постоянным, можно ожидать, что с увеличением размеров звезды, поверхностное магнитное поле также будет уменьшаться. В это же время, РЗЭ согласно предсказаниям теории диффузии должны выветриваться из атмосферы звезды. Но тогда становится непонятным факт, почему у старых, но более массивных Vp-звезд атмосферы все еще богаты этими элементами. Возможное объяснение, выдвинутое нами, заключается в том, что для выветривания РЗЭ требуется достаточное время, тогда как более массивные звезды эволюционируют быстрее.

Из массивных звезд нашего исследования можно особо отметить HD 35298 и HD 184927. Такие объекты, как правило, имеют аномалии содержания гелия в атмосфере, а их спектры выделяются необычно усиленными (He-strong) или ослабленными (He-weak) гелиевыми линиями. Изучая магнитные свойства HD 35298, мы обнаружили значительный кроссовер-эффект в поляризованных спектрах. Его присутствие однозначно определяет пространственную ориентацию звезды, но также приводит и к большому рассеянию отдельных

измерений продольного магнитного поля. Основываясь на списках атомных линий из базы данных VALD, нами был рассчитан спектр звезды с эффективной температурой 15200 К. По этому спектру были отождествлены отдельные линии в спектре звезды HD 35298 и выяснилось, что значение продольного магнитного поля, измеренное по линиям разных элементов, в один и тот же момент времени может различаться на сотни гаусс. Таким образом, мы получаем подтверждение того, что поверхность звезды имеет сильно неоднородный химический состав, а поле – сложное строение. Величина продольного магнитного поля значительна, она меняется от -4 до 6 кГс, т.е. довольно много даже для горячих звезд. Звезда принадлежит ассоциации Ori OB1, а значит возраст можно определить очень точно ($\lg t = 7.3$). Умеренно быстрое вращение ($v \sin i = 57$ км/с, $P = 1.85336$ сут.) делает HD 35298 хорошим кандидатом для доплер-зеemanовского картирования поверхности.

Метод картирования был использован нами при изучении другой массивной Вр-звезды – HD 184927. Эта звезда еще более горячая – ее эффективная температура 22000 К, а светимость $\lg L/L_{\odot} = 3.60$. Благодаря медленному вращению, магнитное поле звезды изучено хорошо. Однако продольная компонента, измеренная по линиям водорода, оказывается заметно выше той, которая следует из измерения линий металлов. Выявленные различия в измерениях могут свидетельствовать о сложной геометрии магнитного поля, либо же об изменении величины B_e с высотой в атмосфере звезды. Проверая первое предположение, и было решено построить карты поверхностного распределения магнитного поля и кислорода (линии O III которого в хорошем качестве присутствовали во всех спектрах). По итогам работы выяснилось, что различия между найденным распределением поля и теоретическим дипольным полем – незначительны, хотя и имеются (рис. 9-10).

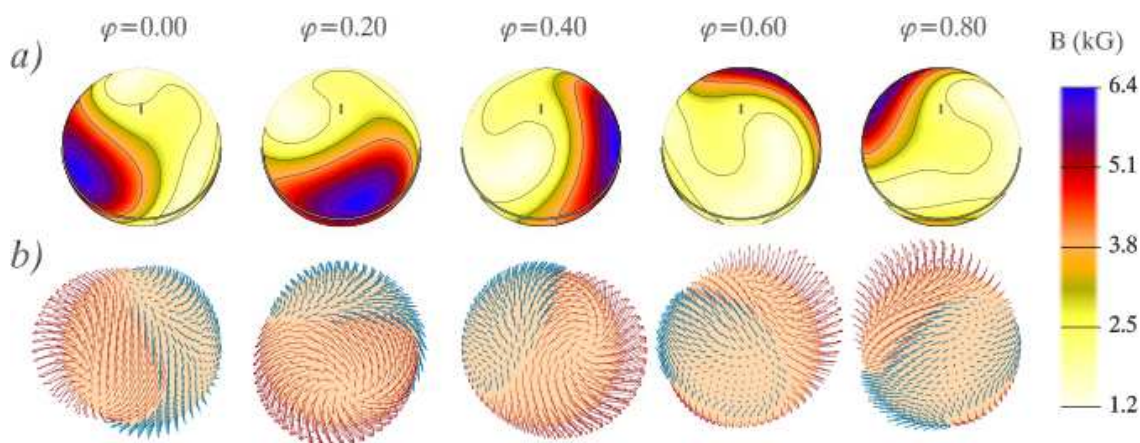


Рис. 9. Распределение магнитного поля по поверхности звезды HD 184927 по итогам доплер-зеemanовского картирования.

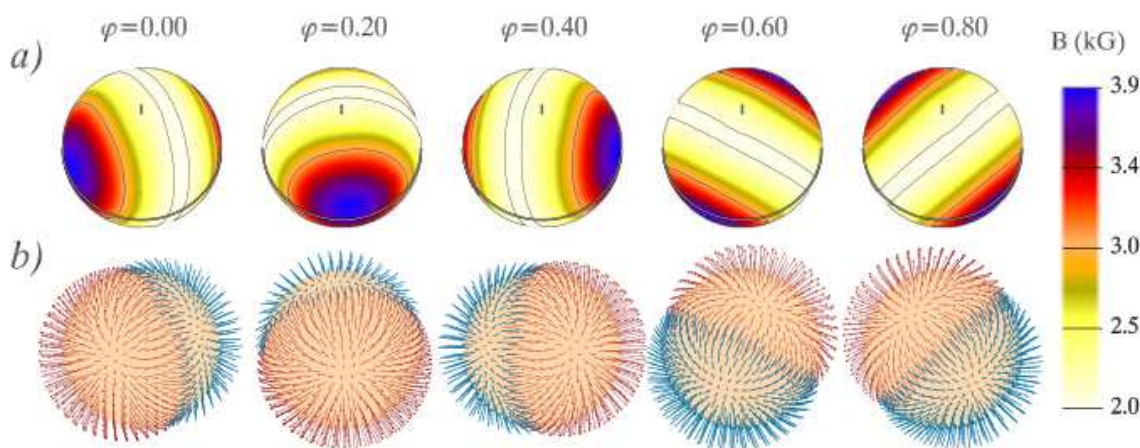


Рис. 10. Распределение магнитного поля по поверхности звезды HD 184927 в дипольном приближении.

Таким образом, мы видим, что общее строение магнитного поля звезды HD 184927 достаточно хорошо описывается диполем без привлечения громоздкого аппарата доплер-зеemanовского картирования. Подводя итог, возможно стоит обратить внимание на то, что эта звезда – медленный ротатор, ее скорость вращения в проекции на луч зрения всего лишь 7.5 км/с. Большая масса, высокая поверхностная температура и медленное вращения – все факторы вместе могут способствовать тому, что магнитное поле звезды имеет более простую конфигурацию, чем это наблюдается у быстрых ротаторов примерно той же температуры. Для достоверных выводов требуется больше подобных результатов для

разных типов ротаторов.

Картирование поверхностного содержания кислорода не показало какой-либо зависимости от геометрии поля. Однако, следует отметить, что кислород плохо подходит для аналогичных задач, поскольку его содержание у горячих звезд обедненное по сравнению с Солнцем, а неоднородности распределения менее выражены. Важным критерием проверки предположения о связи между геометрией поля и распределением отдельных химических элементов могли бы стать результаты доплер-зеemanовского картирования, полученные по железу или кремнию. Эта работа также требует продолжения.

Подытоживая результаты, полученные за три года, можно сказать, что новые сведения о свойствах изученных звезд позволяют лучше понять процессы, происходящие в атмосферах пекулярных звезд средней массы. Из-за малочисленности выборок, итоги изучения маломассивных Ар-звезд и самых массивных представителей СР-звезд оказались менее значимыми. За отчетный период из печати вышло 9 публикаций со ссылкой на программу «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и накоплен материал для подготовки еще 3 статей.

4 Публикации результатов НИР

На 6 этапе программы из печати вышла одна статья, содержащая результаты, полученные в ходе выполнения НИР.

1. Титаренко А.Р., Семенко Е.А., Рябчикова Т.А. «**Химический состав и стратификация химических элементов в атмосфере Ар-звезды HD 8441**», Письма в *Астрономический журнал*, т. 38, вып. 11, с. 805-815 (2012).

Аннотация. В данной работе представлены результаты изучения химического состава атмосферы химически-пекулярной Ар-звезды HD 8441. Высокое содержание элементов железного пика (Fe, Cr, Ti) и редкоземельных элементов (Pr, Nd, Eu), вместе с сильными магнитными полями величиной в несколько килогаусс на поверхности – характерная черта звезд этого типа. HD 8441 выделяется из общего числа тем, что в ее спектре линии редкоземельных элементов слабы, а продольная составляющая магнитного поля составляет лишь несколько сотен гаусс. Наши оценки эволюционного статуса HD 8441 подтвердили ее принадлежность к группе других Ар-звезд, уходящих с Главной последовательности, также со слабыми линиями редкоземельных элементов в спектре. Стратификационный анализ атмосферы HD 8441 в предположении ступенчатого распределения элементов по глубине показал наличие в атмосфере неоднородного распределения Si, Cr, Fe с преимущественной концентрацией элементов в более глубоких слоях. Полученное распределение качественно согласуется с предсказаниями теории диффузионного разделения элементов под совокупным действием сил радиационного давления и гравитации.

Сравнение химического состава и эволюционного статуса HD 8441 со звездами HD 66318 и HD 144897, обладающими сильными магнитными полями показало, что их атмосферы различаются, в основном,

содержанием редкоземельных элементов, тогда как элементы железного пика имеют большие избытки независимо от величины магнитного поля.

Заключение

Программа исследований по теме «Изучение свойств химических элементов в атмосферах магнитных химически пекулярных звезд» в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы была начата в 2010 г. За отчетный период нами было выполнено две работы технического характера: 1) адаптирована и внедрена в постоянные наблюдения новая крупноформатная ПЗС-система на основе чипа E2V CCD 42-90; 2) разработка макета поляриметрической приставки спектрографа ОЗСП для режима линейной спектрополяриметрии. Еще две работы носили методическое направление: 1) на встроенном командном языке CL системы обработки астрономических данных IRAF был реализован полуавтоматический режим обработки эшелле-спектров; 2) был разработан и реализован алгоритм поиска и выделения отдельных линий в циркулярно-поляризованных спектрах.

Наибольшее количество задач имело астрофизическую направленность. Часть объектов (HD 178892, HD 207561) в наших исследованиях – это представители наименее массивных А- и F-звезд. Изучению холодной, пекулярной с чрезвычайно сильным магнитным полем звезды HD 178892 было посвящено две работы, в ходе которых была построена модель магнитного поля звезды (диполь в сочетании с октуполем), изучен химический состав (сильный избыток РЗЭ, типичные для α Ar-звезд аномалии). Анализ переменности магнитного поля звезды и моделирование отдельных спектральных линий дало основания считать, что поверхность звезды не однородна по химическому составу. HD 178892, по нашему заключению, – типичный представитель быстропульсирующих звезд, хотя пульсации у нее ни в спектрах, ни фотометрически пока не обнаружены. Возможная причина кроется в сильном магнитном поле ($B_s = 23$ кГс), которое сильно подавляет амплитуду колебаний, как это было у звезды HD 154708. Результаты опубликованы в виде статей в двух журналах из списка ВАК.

В противоположность HD 178892, звезда HD 207561 не обладает магнитным полем, как это было показано нами в ходе исследований. По своему химическому составу HD 207561 относится скорее к умеренным Am-звездам или нормальным A-звездам, т.е. содержание элементов в ее атмосфере близко к солнечному. Выполнив спектрополяриметрические и спектральные наблюдения на 6-м телескопе САО, после анализа данных мы показали, что обнаруженные ранее пульсации с периодом около 6 мин. [11] у этой звезды носят, по видимому, инструментальный характер. Были рассчитана модель атмосферы звезды, определены ее физические параметры и эволюционный статус.

Группа молодых Ar-звезд с массой $2-3M_{\odot}$ была представлена тремя объектами, у двух из которых – HD 50341 и HD 63347 – магнитное поле было найдено впервые в нашей работе. Третья звезда – HD 201174 – также была открыта как магнитная в САО в 2006 г. Все три объекта – умеренные ротаторы. HD 63447 и HD 50341 имеют близкую температуру и массу, но разное содержание химических элементов. Сильная спектральная переменность этих звезд указывает на неравномерное распределение элементов по поверхности. Благодаря умеренному уширению линий вращением ($v \sin i$ около 40 км/с) звезды в будущем интересно было бы изучить методами доплер-зеemanовского картирования. По своему положению на Главной последовательности звезда HD 201174 также относится к молодым объектам, как и два предыдущие. Несмотря на малую проекцию скорости вращения на луч зрения (16 км/с), HD 201174 относится к быстрым ротаторам с коротким периодом (около 1.6 сут.) и относительно слабым полем. Пространственная ориентация звезды позволяет провести тщательный анализ строения магнитного поля, поскольку она все время обращена к наблюдателю со стороны магнитного экватора. Можно ожидать сильный сигнал линейной поляризации. В силу свойств использованной аппаратуры и погодных условий, нам не удалось измерить поперечное магнитное поле звезды. Для всех молодых звезд были определены

физические параметры и построены модели строения магнитного поля. Наши результаты подтверждают вывод Ландстрита и Матиса [21] о больших углах между осью магнитного диполя и осью вращения звезд с быстрым вращением. Результаты этих исследований опубликованы в одной статье в журнале из списка ВАК и несколько раз представлялись на конференциях.

Изучение магнитных свойств и химического состава старых звезд (HD 96003, HD 8441) показало, что как и все ранее известные проэволюционировавшие магнитные звезды средних масс, они также имеют слабые магнитные поля (B_e порядка нескольких сотен гаусс), а в спектрах линии редкоземельных элементов представлены крайне слабо. Последнее явление предсказывается теорией атомной диффузии, но все детали этого процесса до конца не понятны. Как непонятна и роль двойственности на состоянии старых Ар-звезд. Мы первыми обратили внимание на то, что практически все объекты среди известных проэволюционировавших магнитных звезд имеют близкие компоненты, многие из которые подтвержденно являются физическими двойными (HD 40711, HD 8441, HD 96003, HD 103498), у других – HD 5797 – недавно были найдены тесные компоненты [36]. Хорошее качество наблюдательных данных позволило провести анализ вертикального распределения некоторых химических элементов с глубиной в атмосфере HD 8441 (разд. 2.1 настоящего отчета). Наши результаты качественно подтверждают теоретические расчеты распределения элементов [22]. Результаты опубликованы в виде статьи в журнале «Письма в Астрономический журнал» в 2012 году. Еще одна статья по звезде HD 96003 находится в стадии подготовки.

Наиболее массивные звезды представляют особый интерес за счет быстрой эволюции. Среди наиболее горячих Вр-звезд (T_{eff} порядка 20000-25000 К) сильные магнитные поля встречаются редко. Это подтверждается результатами изучения звезды HD 184927, картирование поверхности которой показало преобладание дипольной компоненты магнитного поля. Были определены основные физические параметры звезды, а возраст

позволяет точно оценить ее членство в ассоциации Ori OB1. Была предпринята попытка доплер-зеemanовского картирования звезды по линиям триплета O III. Результаты картирования не выявили какой-либо связи между геометрией поля и распределением кислорода. В будущем было бы интересно с этой целью выполнить картирование по линиям Fe или Si. Итоги работы готовятся к публикации в зарубежном издании.

На протяжении всего времени, кроме перечисленных задач, уделялось большое внимание вопросам подготовки кадров. Так, в 2011 г. в Казанском (Приволжском) федеральном университете Кичигиной Л.А. была защищена дипломная работа «Магнитные свойства и химический состав холодных mSP-звезд», выполненная в Специальной астрофизической обсерватории РАН. Ранее, результаты изучения звезды HD 178892 были представлены Кичигиной Л.А. на Российской студенческой конференции «Физика космоса», проходившей зимой 2011 года на базе Уральского государственного университета, где ее работа «Химический состав и магнитные свойства химически пекулярной звезды HD 178892» была отмечена поощрительной премией.

За время с 2010 г. в Лаборатории звездного магнетизма САО несколько студентов проходили практику, среди которых Титаренко А.Р. (Московский государственный университет) и Глухова А.В. (Казанский государственный университет) активно привлекались к работам в рамках программы. По итогам этих работ в 2012 г. из печати вышла статья «Химический состав и стратификация химических элементов в атмосфере Ap-звезды HD 8441» в журнале «Письма в Астрономический журнал» из списка ВАК (авторы: Титаренко А.Р., Семенко Е.А., Рябчикова Т.А.), а студентка Глухова А.В. будет делать в следующем году дипломную работу, посвященную холодным пульсирующим A/F-звездам.

Плодотворно развивается международное сотрудничество. Вместе с учеными Института астрономии Словацкой академии наук (г. Татранска Ломница, Словакия) развиваются работы по изучению холодных магнитных

звезд. Эти исследования направлены на изучение физических свойств магнитных звезд, состоящих в двойных системах. В 2012 г. получил поддержку Российского фонда фундаментальных исследований совместный российско-индийский проект по изучению пульсирующих A/F-звезд, начало которому было положено в наших работах по изучению звезды HD 207561.

В целом, на основе данных, накопленных за 6 последовательных этапов выполнения программы исследований, удалось собрать достаточно большое количество сведений, эффективно дополняющих уже известные факты эволюции и происхождения магнитных полей и аномалий химического состава CP-звезд.

Список литературы

1. **Адельман, С.Дж.** A study of twenty-one sharp-lined cool peculiar A stars [Текст] / S.J. Adelman // *Astrophysical Journal*. – 1973. – v. 183. – P. 95-120.
2. **Асплунд, М. и др.** The Solar Chemical Composition [Текст] / M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval // *Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis in honor of David L. Lambert: proceed. of a symposium*. – 2005. – p. 25.
3. **Бабель, Ж.** Detection of calcium abundance stratification in AP stars [Текст] / J. Babel // *Astronomy and Astrophysics*. – 1994. – v.283. – P.189-201.
4. **Баньюло, С. и др.** Discovery of a 14.5 kG magnetic field in the NGC 2516 star HD 66318 [Текст] / S. Bagnulo, J.D. Landstreet, G. Lo Curto, et al. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2006. – v. 403. – P. 645-651.
5. **Бычков, В.Д. и др.** A catalog of stellar magnetic rotational phase curves [Текст] / V.D. Bychkov, L.V. Bychkova, J. Madej // *Astronomy and Astrophysics*. – 2005. – v. 430. – P. 1143-1154.
6. **Бэбкок, Г.В.** A Catalog of Magnetic Stars [Текст] / H.W. Babcock // *Astrophysical Journal Supplement*. – 1958. – v. 3. – P. 141-189.
7. **Ван Леювен, Ф.** Validation of the new Hipparcos reduction [Текст] / F. Van Leeuwen // *Astronomy and Astrophysics*. – 2007. – v.474. – P.653-664.
8. **Вольфф, С.Ц.; Моррисон, Н.Д.** A Search for AP Stars with Very Long Periods [Текст] / S.C. Wolff, N.D. Morrison // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 1973. – v. 85. – P. 141-149.
9. **Гарманец П.** Stellar masses and radii based on modern binary data [Текст] / P. Harmanec // *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin*. – 1988. – v.39. – P.329-345.

10. **Джирарди, Л. и др.** Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: From 0.15 to 7 M_{sun} , and from $Z=0.0004$ to 0.03 [Текст] / L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, et al. // Astronomy and Astrophysics Supplement. – 2000. – v.141. – P.371-383.
11. **Джоши, С. и др.** The Nainital-Cape Survey. II. Report for pulsation in five chemically peculiar A-type stars and presentation of 140 null results [Текст] / S. Joshi, D. L. Mary, P. Martinez, D. W. Kurtz, et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2006. – v. 455. – p. 303-313.
12. **Джоши, С. и др.** The Nainital-Cape Survey. III. A search for pulsational variability in chemically peculiar stars [Текст] / S. Joshi, D. L. Mary, N. K. Chakradhari, S. K. Tiwari, et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2009. – v.507. – P.1763-1784.
13. **Дубат, П. и др.** Random forest automated supervised classification of Hipparcos periodic variable stars [Текст] / P. Dubath, L. Rimoldini, M. Süveges, J. Blomme, et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2011. – v.414. – P.2602-2617.
14. **Карье, Ф. и др.** Multiplicity among chemically peculiar stars. II. Cool magnetic Ap stars [Текст] / F. Carrier, P. North, S. Udry, et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2002. – v.394. – P.151-169.
15. **Каули, Ч.Р.; Генри, Р.** Numerical taxonomy of AP and AM stars [Текст] / C.R. Cowley, R. Henry // Astrophysical Journal. – 1979. – v.233. – P. 633-643.
16. **Кочухов, О. и др.** Chemical stratification in the atmosphere of Ap star HD 133792. Regularized solution of the vertical inversion problem [Текст] / О. Kochukhov, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, V. Makaganyuk, et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2006. – v.460. – P.831-842.
17. **Кочухов, О.** Spectrum synthesis for magnetic, chemically stratified stellar atmospheres [Текст] / О. P. Kochukhov // Physics of Magnetic Stars: proceed. of intern. conference. – Nizhny Arkhyz, 2007. – P.109-118.

18. **Кудрявцев, Д. и др.** New magnetic chemically peculiar stars [Текст] / D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, E. Paunzen // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2006. – v.372. – P.1804-1828.
19. **Куртц, Д.В. и др.** The discovery of 8.0-min radial velocity variations in the strongly magnetic cool Ap star HD154708, a new roAp star [Текст] / D.W. Kurtz, V.G. Elkin, M.S. Cunha, et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2006. – v.372. – P. 286-292.
20. **Кюнзли, М. и др.** A calibration of Geneva photometry for B to G stars in terms of T_{eff} , $\log g$, and $[M/H]$ [Текст] / M. Küznli, P. North, R. L. Kurucz, B. Nicolet // Astronomy and Astrophysics Supplement. – 1997. – v.122. – P.51-77.
21. **Ландстрит, Дж.; Матис, Г.** Magnetic models of slowly rotating magnetic Ap stars: aligned magnetic and rotation axes [Текст] / J. D. Landstreet, G. Mathys // Astronomy and Astrophysics. – 2000. – v.359. – P. 213-226.
22. **Леблан, Ф.; Монин, Д.** Modelling of stratified atmospheres of CP-stars [Текст] / F. Leblanc, D. Monin // The A-Star Puzzle: proced. Of IAU Symp. No. 224. – Cambridge, 2004. – P. 193-200.
23. **Мишо, Ж.** Diffusion Processes in Peculiar a Stars [Текст] / G. Michaud // Astrophysical Journal. – 1970. – v.160. – P. 641.
24. **Мун, Т. Т.; Дворецки, М. М.** Grids for the determination of effective temperature and surface gravity of B, A and F stars using uvby-beta photometry [Текст] / T. T. Moon, M. M. Dworetzky // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. – 1985. – v. 217. – p. 305-315.
25. **Мунари, У.; Цвиттер, Т.** Equivalent width of NA I and K I lines and reddening [Текст] / U. Munari, T. Zwitter // Astronomy and Astrophysics. – 1997. – v. 318. – P. 269-274.
26. **Напивотцки, Р. и др.** On the determination of effective temperature and surface gravity of B, A, and F stars using Stromgren UVBY beta

- photometry [Текст] / R. Napiwotzki, D. Schönberner, V. Wenske // Astronomy and Astrophysics. – 1993. – v. 268. – p. 653-666.
27. **Норт, П. и др.** Multiplicity among peculiar A stars. I. The AP stars HD 8441 and HD 137909, and the AM stars HD 43478 and HD 96391 [Текст] / P. North, J.-M. Carquillat, N. Ginestet, F. Carrier, et al. // Astronomy and Astrophysics Supplement. – 1998. – v. 130. – P. 223-232.
28. **Орьер, М. и др.** Weak magnetic fields in Ap/Bp stars. Evidence for a dipole field lower limit and a tentative interpretation of the magnetic dichotomy [Текст] / M. Aurière, G. A. Wade, J. Silvester, F. Lignières, et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2007. – v.475. – P. 1053-1065.
29. **Пискунов, Н.; Валенти, Дж.** New algorithms for reducing cross-dispersed echelle spectra [Текст] / N. E. Piskunov, J. A. Valenti // Astronomy and Astrophysics. – 2002. – v.385. – P.1095-1106.
30. **Райт, К.Т. и др.** A photometric study of chemically peculiar stars with the STEREO satellites - I. Magnetic chemically peculiar stars. [Текст] / K.T. Wraight, L. Fossati, M. Netopil, E. Paunzen, et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2012. – v. 420. – P.757-772.
31. **Ракосш, К.Д.; Фидлер, В.** Photoelectric observations of 14 Ap stars [Текст] / K.D. Rakosch, W. Fiedler // Astronomy and Astrophysics Supplement. – 1978. – v. 31. – P. 83-98.
32. **Руфенер, Ф.** Second catalogue of stars measured in the Geneva Observatory photometric system [Текст] / F. Rufener // Astronomy and Astrophysics Supplement. – 1976. – v. 26. – P. 275-351.
33. **Рябчикова, Т. и др.** Abundances and chemical stratification analysis in the atmosphere of Cr-type Ap star HD 204411 [Текст] / T. Ryabchikova, F. Leone, O. Kochukhov // Astronomy and Astrophysics. – 2005. – v. 438. – P. 973-985.

34. **Рябчикова, Т. и др.** Rare-earth elements in the atmosphere of the magnetic chemically peculiar star HD 144897. New classification of the Nd III spectrum [Текст] / Т. Ryabchikova, А. Ryabtsev, О. Kochukhov, et al. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2006. – v.456. – P. 329-338.
35. **Рябчикова, Т. и др.** HD 178892 - a cool Ap star with extremely strong magnetic field [Текст] / Т. Ryabchikova, О. Kochukhov, D. Kudryavtsev, I. Romanyuk, et al. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2006. – v.445. – P.L47-L50.
36. **Семенко, Е. А. и др.** Комплексное исследование магнитных звезд HD 5797 и HD 40711 с сильным избытком хрома и железа [Текст] / Е. А. Семенко, И. А. Якунин, Е. Ю. Кучаева // *Письма в астрономический журнал*. – 2011. – т.37. – с.23-33.
37. **Соуза, С. Ж. и др.** A new code for automatic determination of equivalent widths: Automatic Routine for line Equivalent widths in stellar Spectra (ARES) [Текст] / S. G. Sousa, N. C. Santos, G. Israelian, et al. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2007. – v.469. – P.783-791.
38. **Стетсон, П.Б.; Панчино, Е.** DAOSPEC: An Automatic Code for Measuring Equivalent Widths in High-Resolution Stellar Spectra [Текст] / P.B. Stetson, E. Pancino // *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 2008. – v.120. – P.1332-1354.
39. **Тетцлафф, Н. и др.** A catalogue of young runaway Hipparcos stars within 3 kpc from the Sun [Текст] / N. Tetzlaff, R. Neuhäuser, M.M. Hohlé // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2011. – v.410. – P.190-200.
40. **Флауэр, Ф.Дж.** Transformations from Theoretical Hertzsprung-Russell Diagrams to Color-Magnitude Diagrams: Effective Temperatures, B-V Colors, and Bolometric Corrections [Текст] / Ph. J. Flower // *Astrophysical Journal*. – 1996. – v.469. – P.355-365.

41. **Хаук, Б.; Мермиллиод, М.** Uvbybeta photoelectric photometric catalogue [Текст] / В. Hauck, М. Mermilliod // Astronomy and Astrophysics Supplement. – 1998. – v. 129. – P. 431-433.
42. **Хубриг, С. и др.** Detection of an extraordinarily large magnetic field in the unique ultra-cool Ap star HD 154708 [Текст] / S. Hubrig, N. Nesvacil, M. Shöller, et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2005. – v.440. – P.L37-L40.
43. **Цымбал, В.** STARSP: A Software System For the Analysis of the Spectra of Normal Stars [Текст] / V. Tsymbal // ASP Conference Series. – 1996. – v. 108. – P. 198-199.
44. **Чунтонов, Г. А.** New equipment for measuring stellar magnetic fields at the 6m telescope [Текст] / G. A. Chountonov // Magnetic Stars: proceed. of intern. conference. – Nizhny Arkhyz, 2004. – P.286-291.
45. **Штейниц, Р.** The Period of the Magnetic Variable HD 8441 [Текст] / R. Steinitz // Information Bulletin on Variable Stars. – 1965. – v. 101. – P. 1.