

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 524.338-337

МОИСЕЕВА Анастасия Валерьевна

Фундаментальные параметры выборки СР звезд по результатам
спектроскопии на 6-м телескопе

(01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук

Научный руководитель: д. ф.-м. н., зав. лаб.

Романюк Иосиф Иванович

Нижний Архыз – 2019

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Магнитные химически пекулярные звезды	18
1.1 Общие сведения о магнитных полях	18
1.1.1 Эффект Зеемана	19
1.1.2 Эффект Зеемана в астрофизических условиях	21
1.2 Методы регистрации космических магнитных полей	22
1.2.1 Прямые методы регистрации магнитных полей	23
1.2.2 Косвенные оценки величины магнитных полей	30
1.3 Химически пекулярные звезды	32
1.3.1 Общие сведения и классификация	32
1.3.2 Общие сведения о магнитных полях химически пекулярных звезд	34
1.4 Функция распределения магнитных полей химически пекулярных звезд	38
1.5 Теории образования и эволюции магнитных полей Ap/Vp-звезд	39
1.5.1 Теория динамо	41
1.5.2 Реликтовая теория	42
1.6 Выводы	45
Глава 2. Приборы и методика наблюдений	47
2.1 Обзор основных спектрополяриметров, используемых для измерений магнитных полей звезд	48
2.1.1 MuSICOS	48
2.1.2 ESPaDOnS, NARVAL	49
2.1.3 HARPSpol	50

	Стр.
2.1.4 FORS1, FORS2	51
2.2 Основной звездный спектрограф	52
2.2.1 Технические характеристики	53
2.2.2 Анализатор круговой поляризации	54
2.3 Методика проведения наблюдений и обработки материала	55
2.4 Выводы	58
Глава 3. Магнитные поля выборки химически пекулярных звезд	60
3.1 Результаты определения эффективных продольных магнитных полей звезд поля	61
3.1.1 Химически пекулярные звезды с сильными депрессиями	63
3.1.2 Резюме	75
3.2 Химически пекулярные звезды ассоциации Орион OB1	76
3.2.1 Обзор литературных данных об ассоциации Орион OB1	77
3.2.2 Выбор объектов для исследования	80
3.2.3 Магнитные поля химически пекулярных звезд ассоциации	81
3.2.4 Результаты детального исследования магнитных химически пекулярных звезд в ассоциации	84
3.3 Выводы	117
Глава 4. Фундаментальные параметры магнитных химически пекулярных звезд	120
4.1 Методы определения фундаментальных параметров	120
4.1.1 Краткий литературный обзор	120
4.1.2 Эффективная температура и ускорение силы тяжести	125
4.1.3 Скорость и период вращения звезд	130
4.1.4 Светимость, масса, радиус, возраст	134
4.2 Результаты исследования фундаментальных параметров химически пекулярных звезд поля	137

	Стр.
4.3 Резюме	146
4.4 Результаты исследования фундаментальных параметров химически пекулярных звезд в ассоциации Орион OB1	147
4.4.1 Поведение фундаментальных параметров в подгруппах . . .	148
4.5 Резюме	157
4.6 Выводы	159
Заключение	162
Список литературы	166
Список рисунков	188
Список таблиц	195
Приложение А. Первичная редукция спектральных данных Основного звездного спектрографа	197
Приложение Б. Результаты измерений магнитных полей и фундаментальных параметров магнитных химически пекулярных звезд	203
Приложение В. Результаты оценки фундаментальных параметров химически пекулярных звезд в ассоциации Орион OB1	217

Введение

Актуальность проблемы

Надежно определенные фундаментальные параметры звезд необходимы для построения теории их образования и эволюции. Теоретические расчеты, например, построение эволюционных треков, которые по положению объекта на диаграмме Герцшпрунга-Рассела объясняют механизмы образования звезд и их дальнейшую эволюцию, невозможны без знания параметров исследуемых объектов.

Одной из важнейших проблем современной астрофизики является вопрос о влиянии магнитных полей на звездную эволюцию. Их проявления наблюдаются и изучаются в разнообразных объектах Галактики длительное время. Однако опыт исследований показывает, что наиболее точную и надежную информацию о взаимном влиянии поля и процессов, происходящих в звездных атмосферах, можно получить из исследований классических магнитных химически пекулярных звезд [Romanyuk, 2004]. Они составляют примерно около 10% от общего количества В и А-звезд Главной последовательности (ГП) [Romanyuk et al, 2008; Glagolevskij, 2018].

Фундаментальные параметры химически пекулярных звезд изучены недостаточно хорошо. В целом, химически пекулярные звезды имеют схожие параметры и положения на диаграмме ГП, что и нормальные звезды этих же температур. Однако, скорости вращения у них в целом в 3-4 раза ниже, чем у нормальных [Romanyuk, 2007]. Причина этого явления до сих пор неясна: либо магнитное поле затормозило звезду во время ее формирования из межзвездного облака, либо только у медленно вращающихся звезд возникли магнитные поля.

В настоящее время фундаментальные параметры (эффективная температура, ускорение силы тяжести, светимость, масса, радиус) определены примерно

для 150 магнитных химически пекулярных звезд [Kochukhov et al, 2006], что составляет около 20% от общего количества найденных такого типа объектов [Renson, Manfroid, 2009]. Однако, исследуя различные литературные источники, можно заметить, что данные разных авторов для одной и той же звезды различаются. Чаще всего авторы определяют фундаментальные параметры магнитных химически пекулярных звезд, используя данные фотометрии, которые не могут дать хорошую точность, так как континуум этих объектов аномален [North, Cramer, 1984]. Особенно плохо определяется возраст одиночных магнитных звезд - ошибки могут превышать 100%. Это основная причина большого рассеивания экспериментальных результатов, которые не позволяют найти реальные связи с возрастом и другими параметрами и оценить влияние магнитного поля на эволюцию звезд.

Для создания надежной наблюдательной базы, на которой могут основываться теории образования и эволюции магнитных полей химически пекулярных звезд, необходимо как можно точнее определить фундаментальные параметры этих объектов. Для решения этой проблемы необходимо использовать единую методику, которая подходит для анализа химически пекулярных звезд, и однородный спектральный материал, чтобы определить параметры большой выборки объектов. Для исследований эволюции звезд целесообразнее всего использовать объекты, у которых точно определен их возраст, а это возможно только при изучении звезд, входящих в состав рассеянных скоплений разного возраста. Такая задача может быть решена путем спектральных наблюдений магнитных химически пекулярных звезд на 6-м телескопе БТА [Romanyuk et al, 2013].

Цели и задачи

Целью данной работы является определение и изучение фундаментальных параметров и магнитных полей большой выборки магнитных химически пеку-

лярных звезд по однородным спектрам, полученных на 6-м телескопе, используя стандартные общепринятые методы обработки и анализа.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Обработать имеющийся наблюдательный материал (507 пар циркулярно-поляризованных спектров), для тех объектов, у которых его недостаточно, получить новый на Основном звездном спектрографе БГА.
2. Измерить эффективное продольное магнитное поле V_e большой выборки химически пекулярных звезд.
3. Найти фундаментальные параметры: T_{eff} , $\log g$, $\log \frac{L}{L_\odot}$, $\frac{M}{M_\odot}$, $\frac{R}{R_\odot}$, лучевые скорости V_R , проекции скоростей вращения $v_e \sin i$ для звезд выборки, уделяя особо внимание исследованиям параметров звезд ассоциации Орион OB1.
4. Провести анализ полученных данных.

Научная новизна

1. Обнаружены магнитные поля у 30 химически пекулярных звезд, из которых 21 объект – звезды поля с депрессиями (3%), и 9 – звезды в ассоциации Орион OB1; были использованы спектрополяриметрические данные, полученные на 6-м телескопе спектрографом ОЗСП.
2. Измерены *впервые* фундаментальные параметры, лучевые скорости и проекции скоростей вращения $v_e \sin i$ для 106 магнитных или потенциально магнитных объектов, и для 60 химически пекулярных звезд в ассоциации Орион OB1 по единой методике и с использованием однородных спектральных данных.

3. **Впервые** проведены детальные исследования магнитных полей и фундаментальных параметров двух звезд с сильными депрессиями (5%): HD 5601, HD 19712. Показано, что обе звезды имеют почти идентичные параметры, конфигурацию магнитного поля и интенсивности депрессий, но различный химический состав.
4. **Впервые** получены спектрополяриметрические данные для полной выборки 60 химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1. Найдено, что доля пекулярных звезд в ассоциации падает с возрастом относительно нормальных, и доля магнитных звезд относительно пекулярных также падает с возрастом в интервале $\log t = 6-7$.
5. **Впервые** получены фазовые кривые переменности эффективного продольного магнитного поля для 11 звезд ассоциации Орион OB1. Они указывают на преимущественно дипольную структуру поля. Меньше 10% звезд в ассоциации обладают полями недипольной конфигурацией.

Научная и практическая ценность

1. На основании измерений, выполненных автором по единой методике, создан и опубликован каталог [Moiseeva et al, 2019] фундаментальных параметров химически пекулярных звезд. Он насчитывает 106 объектов, большинство из которых составляют Ap-звезды. Каталог может быть использован при исследовании эволюции магнитных полей химически пекулярных звезд разной массы, эффективной температуры, светимости и скорости вращения.
2. Получено и обработано 507 спектров циркулярно-поляризованного излучения для 166 химически пекулярных звезд. У 30 объектов магнитные поля обнаружены впервые. Полученный наблюдательный материал мо-

жет быть в дальнейшем использован для длительного магнитного мониторинга звезд, с целью изучения сверхмедленных ротаторов.

3. Результаты комплексного исследования фундаментальных параметров и магнитных полей химически пекулярных звезд с сильными депрессиями HD 5601 и HD 19712 могут быть использованы при исследованиях эволюции магнитных химически пекулярных звезд.
4. Получены спектрополяриметрические наблюдения полной выборки химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1. Для каждой звезды проведено не менее 4-х наблюдений в разные фазы периода вращения. Материал может быть использован для изучения спектральной и магнитной переменности этих объектов и построения их магнитных моделей. Для быстрых ротаторов ($v_e \sin i > 50 \text{ км с}^{-1}$) можно выполнить магнитное картирование поверхности.
5. Для 60 химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1 определены физические параметры, которые могут быть использованы при изучении эволюции магнитных химически пекулярных звезд. Для 11 объектов ассоциации построены фазовые кривые продольной компоненты магнитного поля, которые могут использоваться при решении проблемы возникновения магнитных полей у химически пекулярных звезд.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты определения и исследования фундаментальных параметров, магнитных полей, содержания химических элементов, проведения магнитного моделирования для двух CP звезд с депрессиями континуума (5%): HD 5601 и HD 19712. Показано, что у этих звезд идентичные

значения параметров, но имеются различия в содержании некоторых химических элементов.

2. Результаты спектрополяриметрического анализа 166 CP звезд: 106 объектов поля и 60 членов ассоциации Орион OB1. Открыто 30 новых магнитных звезд: 21 - среди объектов поля и 9 - в ассоциации Орион OB1. Для 11 звезд ассоциации построены фазовые кривые переменности эффективного продольного магнитного поля. Показано, что в первом приближении 10 из них имеют дипольную структуру поля, а HD 36668 - более сложную; периоды вращения для 10 звезд короче 5 суток, а у HD 37058 - 14.6 суток.
3. Результаты определения фундаментальных параметров, лучевых скоростей и проекций скоростей вращения 106 CP звезд поля. Сформирован и опубликован однородный каталог фундаментальных параметров CP звезд. Большинство объектов в нем составляют Ar-звезды. Физические параметры примерно 70% CP звезд находятся в интервалах: $T_{eff} = 8700-11750$, $\log g = 3.55-3.91$, $\log L/L_{\odot} = 1.3-2.0$, $M/M_{\odot} = 1.9-2.9$, $R/R_{\odot} = 2.6-4.6$, $v_e \sin i = 30.9-60.3$ км с⁻¹.
4. Результаты определения и исследования фундаментальных параметров, лучевых скоростей и проекций скоростей вращения для 60 CP звезд ассоциации Орион OB1, из которых 59 – Vr-звезды. Проведено сравнение параметров звезд из подгрупп А, В, С, D, на которые принято делить ассоциацию. Систематических различий в зависимости от возраста не выявлено. Доля магнитных CP звезд относительно немагнитных в ассоциации падает с возрастом.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, заключения, списков литературы, рисунков и таблиц, а также приложений А, Б и В. Общий объем диссертации составляет 196 страниц текста, включая 24 таблицы и 69 рисунков. Список литературы насчитывает 171 наименование.

Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, указаны цели и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Представлены пункты, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора. Даны сведения об апробации результатов диссертационного исследования. Приведен список публикаций, содержащих основные результаты диссертации.

Первая глава посвящена обзору литературных данных о современном состоянии проблемы магнетизма в химически пекулярных звездах.

В *разделе 1.1* приводятся общие сведения о магнитных полях.

В *разделе 1.2* рассмотрены основные методы регистрации и оценки магнитных полей звезд.

В *разделе 1.3* приводится исторический обзор литературных данных по химически пекулярным звездам.

В *разделе 1.4* рассматривается функция распределения магнитных полей химически пекулярных звезд.

В *разделе 1.5* обсуждаются наиболее распространенные теории образования магнитных полей у химически пекулярных звезд.

Вторая глава посвящена описанию спектрополяметрических приборов.

В *разделе 2.1* приведен обзор спектрополяриметрических приборов, которые используются для измерений магнитных полей звезд.

В *разделе 2.2* подробно описан Основной звездный спектрограф, при помощи которого был получен весь исследуемый спектральный материал.

В *разделе 2.3* рассматривается методика проведения наблюдений на данном спектрографе и обработки полученного спектрального материала. Подробности процесса обработки были вынесены в Приложение А.

Третья глава посвящена исследованию магнитных свойств большой выборки химически пекулярных звезд, которая состоит из двух частей: химически пекулярные звезды с депрессиями континуума до 3%, и химически пекулярные звезды ассоциации Орион OB1.

В *разделе 3.1* представлены результаты анализа магнитных полей первой части выборки химически пекулярных звезд. Основной спектральный материал для данной работы был получен в 2009-2011 гг. За этот период была открыта 21 новая магнитная звезда. Также в этом разделе показаны результаты детального исследования двух объектов с сильными депрессиями континуума около 5%: HD 5601, HD 19712. Для каждой звезды был обработан весь имеющийся спектральный материал, измерено эффективное продольное магнитное поле, проведено магнитное моделирование, определены фундаментальные параметры и оценено химическое содержание элементов. Проведено сравнение полученных результатов с параметрами других изученных звезд с сильными депрессиями: HD 27404, HD 40711, HD 45583, HD 178892. Показано, что исследуемые звезды HD 5601 и HD 19712 имеют идентичные параметры, исключая химический состав. Однако при сравнении с другими объектами общих свойств, кроме наличия сильных депрессий и магнитных полей, обнаружено не было. Среди них встречаются как горячие представители (HD 45583), так и холодные (HD 178892); быстрые ротаторы (HD 45583), умеренные (HD 19712, HD 27404), медленные (HD 178892, HD 40711). Величины магнитного поля: HD 19712, HD 5601, HD 27404, HD 45583 имеют схожие значения, однако поле HD 178892 отличается. Периоды вращения в целом схожи, кроме звезды HD 178892. Химическое содержание элементов

различается: особо сильное отличие видно в содержании магния, кремния, титана, хрома и марганца. В целом же химический состав типичен для Ar/Br звезд. Исследуемые звезды были нанесены на диаграмму Герцшпрунга-Рассела с целью определить их возраст. Показано, что все исследуемые объекты принадлежат главной последовательности, но имеют различное положение – есть массивный горячий молодой объект HD 45583, звезды средних масс примерно одинакового возраста HD 19712, HD 5601, HD 27404, HD 40711, и маломассивный старый объект HD 178892.

В *разделе 3.2* показаны результаты исследования магнитных свойств химически пекулярных звезд из ассоциации Орион OB1. Приведена история изучения данной ассоциации, обоснован выбор объектов для исследования. Было открыто 9 новых магнитных звезд в дополнение к 20 уже ранее известным. Для 11 звезд в ассоциации впервые проведены детальные исследования магнитных полей и построены фазовые кривые эффективного продольного магнитного поля. Показано, что для 10 звезд в первом приближении поле представляет собой дипольную структуру. По фотометрическим данным HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007] совместно с поляриметрическими были определены периоды вращения для этих звезд: десять из них относятся к быстрым ротаторам.

В последней **Четвертой главе** представлены результаты определения фундаментальных параметров для большой выборки химически пекулярных звезд.

В *разделе 4.1* рассматриваются использованные общепринятые методы определения параметров, которые применяют для химически пекулярных звезд.

В *разделе 4.2* показаны результаты измерения фундаментальных параметров объектов первой части выборки химически пекулярных звезд поля с депрессиями континуума около 3%. Всего исследовано 146 звезд, из которых 106 магнитные или потенциально магнитные объекты. Сформированный каталог фундаментальных параметров вынесен в Приложение В и опубликован в работе [Moiseeva et al, 2019]. Для изучения распределения параметров построены гистограммы. Для их статистического анализа использовался критерий Пирсона

(χ^2). Показано, что распределения всех параметров подчиняются лог-нормальному закону.

В *разделе 4.3* показаны результаты исследования фундаментальных параметров второй части выборки химически пекулярных звезд – объектов ассоциации Орион OB1. Всего проанализировано 60 химически пекулярных звезд. Значения фундаментальных параметров даны в Приложении В. Из работы [Brown et al, 1994] были взяты параметры нормальных звезд ассоциации. На этом основании проведено сравнение распределений фундаментальных параметров нормальных и химически пекулярных звезд в каждой подгруппе ассоциации Орион OB1 используя критерий Стьюдента (t-критерий). Построены гистограммы для изучения распределения параметров. При статистическом анализе использовался критерий Пирсона (χ^2). Показано, что распределения всех параметров также подчиняются лог-нормальному закону. Анализ показал, что в подгруппах ассоциации А, В, С, на которые принято делить ассоциацию, систематических различий фундаментальных параметров не найдено, а при сравнении с нормальными звездами были выявлены различия на уровне значимости меньше 5%. Доля магнитных звезд относительно немагнитных в ассоциации падает с возрастом.

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались на различных российских и международных конференциях:

1. Конкурс-конференция, Нижний Архыз, 05.02.2016 г. "Определение фундаментальных параметров СР-звезд по наблюдениям 2009 года".

2. Международная конференция "Stars: from collapse to collapse Нижний Архыз, 3-7.10.2016 г. "Determination of Fundamental Parameters of New mCP Stars".
3. Конкурс-конференция, Нижний Архыз, 08.02.2017 г. "Определение фундаментальных параметров CP-звезд по наблюдениям 2010 года".
4. Международная конференция Stellar Magnetism: Challenges, Connections, and Prospects. 14th Potsdam Thinkshop!, Telegrafenberg, Potsdam, DE, 12-16.06.2017 "Determination of Fundamental Parameters of mCP Stars in association Orion OB1".
5. Международная конференция "Звезды, планеты и их магнитные поля Санкт-Петербург, 17-21.09.2018 г., "Определение фундаментальных параметров звезд по наблюдениям на 6-м телескопе БТА".
6. Международная конференция "Physics of Magnetic Stars Нижний Архыз, 1-5.10.2018, "Determination of CP stars in association Orion OB1".

Публикации по теме диссертации

1. Joshi, S; Semenko, E; **Moiseeva, A**; Joshi, G.; Joshi, Y.; Sachkov, M. Photometric and Spectroscopic Analysis of CP Stars Under Indo-Russian Collaboration // Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars // ASP. -vol. 494. -p.210 (2015)
2. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Kudryavtsev, D. O.; **Moiseeva, A. V.** Results of magnetic field measurements performed with the 6-m telescope. IV. Observations in 2009 // Astrophysical Bulletin. -vol. 71. -issue 3. -pp.327-340 (2016)
3. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A.; Kudryavtsev, D. O.; **Moiseeva, A. V.**

- Magnetic field of CP stars in the Ori OB1 association. I. HD35456, HD35881, HD36313 A, HD36526 // *Astrophysical Bulletin*. -vol. 71. -issue. 4. -pp.436-446 (2016)
4. Romanyuk, I. I.; Kudryavtsev, D. O.; Semenko, E. A.; **Moiseeva, A. V.**
Magnetic stars with wide depressions in the continuum. 1. The Ap star with strong silicon lines HD5601 // *Astrophysical Bulletin*. -vol. 71. -issue. 4. -pp.447-452 (2016)
5. Joshi, S.; Semenko, E.; **Moiseeva, A.**; Sharma, K.; Joshi, Y.; Sachkov, M.; Singh, H.; Yerra, B.
High-resolution Spectroscopy and Spectropolarimetry of Selected δ -Sct Pulsating Variables // *MNRAS*. -vol. 467. -n. 1. -pp.633-645 (2017)
6. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Kudryavtsev, D. O.; **Moiseeva, A. V.**; Yakunin, I. A.
Results of magnetic field measurements performed with the 6-m telescope. IV. Observations in 2010 // *Astrophysical Bulletin*. -vol. 72. -issue 4. -pp.391-410 (2017)
7. **Moiseeva, A. V.**; Romanuyk, I. I.; Semenko, E. A.
Determination of Fundamental Parameters of New mCP Stars // *Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of Astronomical Society of the Pacific*. -pp.237 (2017)
8. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A.; Kudryavtsev, D. O.; **Moiseeva, A. V.**
Magnetic field of CP stars in the Ori OB1 association. II. HD36540, HD36668, HD36916, HD37058 // *Astrophysical Bulletin*. -vol. 72. -issue 2. -pp. 165-177 (2017)
9. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A.; Kudryavtsev, D. O.; **Moiseeva, A. V.**
Magnetic chemically peculiar stars in the Orion OB1 association // *Astronomische Nachrichten*. -vol. 338. -issue 8. -pp. 919-925 (2017)

10. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; **Moiseeva, A. V.**; Kudryavtsev, D. O.; Yakunin, I. A.
Results of Magnetic-Field Measurements with the 6-m Telescope. V. Observations in 2011 // Astrophysical Bulletin. -vol. 73. -issue 2. -pp.178-200 (2018)
11. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; **Moiseeva, A. V.**; Yakunin, I. A. Kudryavtsev, D. O.
Magnetic fields of CP-stars in association OB1. III. Stars of Orion OB1 subgroup (A) // Astrophysical Bulletin. -vol. 74. -issue 1. -pp. 55-61 (2019)
12. **Moiseeva, A. V.**; Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A. Kudryavtsev, D. O.
Results of fundamental parameters measurements for CP-stars, performed with the 6-m telescope. I. Observations in 2009-2011 // Astrophysical Bulletin. -vol. 74. -issue 1. -pp. 62-66 (2019)

Личный вклад автора

Участие в проведении наблюдений на 6-м телескопе БТА [1-12]. Первичная обработка спектров циркулярно-поляризованного излучения со спектрографа ОЗСП при помощи системы MIDAS в контексте ZEEMAN [1-12]. Измерение продольной компоненты магнитного поля B_e двумя способами: методом центра тяжести и регрессии [1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 12]. Проведение магнитного моделирования: оценка углов наклона оси вращения i оси диполя β , величины магнитного поля на полюсе диполя B_p [1, 3, 4, 5, 7, 8]. Определение фундаментальных параметров, лучевых скоростей V_R , проекций скоростей вращения $v_e \sin i$ [1- 2]. Участие в обсуждении выводов и формулировке результатов, в подготовке статей [1-12] наравне с соавторами.

Глава 1. Магнитные химически пекулярные звезды

1.1 Общие сведения о магнитных полях

Магнитное поле – один из видов материи, посредством которого осуществляется взаимодействие между движущимися зарядами: поле порождается этими зарядами, а затем действует на них, выстраивая их траектории по силовым магнитным линиям. Из квантовой электродинамики следует, что магнитное поле связано с наличием магнитных моментов у частиц – электронов, ионов, атомов. Основной характеристикой магнитного поля в вакууме является вектор напряженности магнитного поля \vec{H} , но в любой среде, отличной от вакуума, главной характеристикой поля является вектор магнитной индукции \vec{B} . Связь магнитной индукции с напряженностью можно представить формулой:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (1.1)$$

где μ – магнитная восприимчивость среды, μ_0 – магнитная постоянная. В космическом пространстве (атмосфера звезд, межзвездная среда) μ близка к единице в системе единиц СГС, и магнитная индукция будет практически численно равна и направлена как вектор напряженности магнитного поля. Единицы измерения в системе СГС – Гаусс или Гс, а в международной системе СИ – Тесла или Тл (1 Тл = 10000 Гс).

Магнитные поля наблюдаются в различных объектах Галактики и имеют разную величину:

- межзвездная среда – микрогауссы;
- плотные протозвездные облака – миллигауссы;
- общее магнитное поле звезд типа Солнца и солнечноподобных звезд – единицы гауссов;
- локальные поля в солнечных и звездных пятнах и общие поля химически пекулярных звезд – килогауссы;

– магнитные поля белых карликов, нейтронных звезд – мегагауссы.

Исследование механизмов образования и поддержания космических магнитных полей, а также их роль в эволюции звезд и галактик – одно из важнейших направлений в современной астрофизике.

1.1.1 Эффект Зеемана

Эффект расщепления и поляризации линий атомных спектров в магнитном поле был открыт в 1896 году Питером Зееманом.

Он обнаружил, что при наблюдении в направлении, перпендикулярном напряженности магнитного поля \vec{H} , спектральная линия расщепляется на три поляризованные компоненты. Несмещенная относительно положения исходной линии компонента поляризована в направлении \vec{H} (т.н. π -компонента), а две равно отстоящие от нее (по шкале частот) – перпендикулярно к нему (σ -компоненты). Наблюдаемая картина схематично представлена на рис. 1.1а.

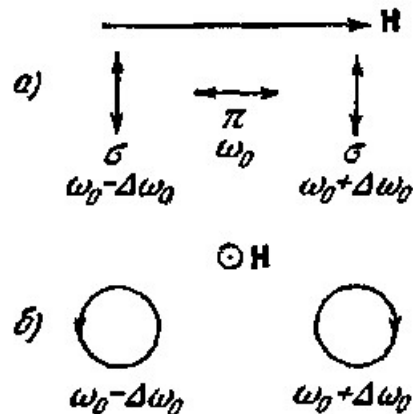


Рисунок 1.1 – Простой эффект Зеемана. Поперечный (а) и продольный (б) эффект

При наличии магнитного поля \vec{B} в уравнение движения электрона вида $m_e \frac{d\vec{v}}{dt} + m_e \omega_0^2 \vec{r} = 0$, где m_e – масса электрона, ω_0 – его собственная частота, а \vec{v} – скорость вращения электрона вокруг ядра, добавляется член $e\vec{v} \times B$, обусловленный силой Лоренца: $\frac{d\vec{v}}{dt} + m_e \omega_0^2 \vec{r} = e\vec{v} \times B$. Классическая теория сводится к

решению этого уравнения. Введя ларморовскую частоту $\Omega_L = \frac{eB}{2m_e}$, описывающую прецессию магнитного момента атома вокруг вектора внешнего магнитного поля, и решив уравнение движения, получаем, что резонансная частота дипольного момента в присутствии магнитного поля расщепляется на три частоты ω_0 , $\omega_0 + \Omega_L$ и $\omega_0 - \Omega_L$, называемых лоренцевским или простым зеемановский триплетом (см. рис. 1.1). При наблюдении вдоль поля остаются видимыми лишь σ -компоненты, линейная поляризация сменяется круговой (рис. 1.1б). Более подробное описание можно найти в [Сивухин, т.4, стр.564, 2002].

Всего различают четыре типа проявления эффекта Зеемана:

- простой эффект: поперечный и продольный эффект Зеемана рис. 1.1;
- аномальный (сложный) эффект;
- эффект Пашена-Бака;
- квадратичный эффект.

Теория Лоренца объяснила только первый тип — простой эффект Зеемана, который дают так называемые синглетные линии. Большинство же атомных линий являются мультиплетами и картина их расщепления сложна. Кроме того, ее меняет и присутствие сильного магнитного поля. Описать эффект Зеемана в общем случае удастся с помощью квантовой механики.

В квантовом представлении энергия атома задается гамильтонианом H_0 . В магнитном поле к полному, невозмущенному гамильтониану H_0 добавляется возмущение $V_M = -\vec{\mu}\vec{B}$, которое создается полем ($\vec{\mu}$ — магнитный момент атома). Магнитный момент атома определяется электронным и ядерным моментом. Так как ядерный магнитный момент намного меньше электронного, то им можно пренебречь. Тогда $\vec{\mu} = \frac{-\mu_B g \vec{J}}{\hbar}$, где μ_B — магнетон Бора, \vec{J} — полный электронный магнитный момент, g — эффективный фактор Ланде, который показывает степень влияния магнитного поля на атом. Полный электронный момент является суммой орбитального \vec{L} и спинового \vec{S} угловых моментов. При L-S связи для расчета полного магнитного момента суммируются все электроны [Елья-

шевич, 1999]. В рамках такого подхода можно объяснить все типы проявления эффекта Зеемана.

Простой эффект Зеемана: если возмущение магнитного поля мало, то есть $V_M \ll |E_i - E_k|$. Эффект возникает при переходах между синглетными уровнями: когда $S = 0, J = L$. Спектральная линия расщепляется на три компоненты: π, σ^+, σ^- .

Аномальный эффект Зеемана: мультиплетные линии, то есть $S \neq 0$ расщепляются на $2J + 1$ подуровня, соответствующих различным магнитным квантовым числам m , которые принимают значения $m = J, J - 1, \dots, -J$. Спектральная линия расщепляется на несколько десятков π -компонент, и σ^+ - σ^- -компонент. Количество компонент определяется количеством переходов различной частоты между расщепленными уровнями и правилом отбора $\delta m = 0, \pm 1$.

Аномальный (сложный) эффект Зеемана наблюдается в 80% звездных спектрах, а нормальный (простой) эффект только в 20% звезд.

Эффект Пашена-Бака ($B_s \geq 10^4$ Гс) и квадратичный эффект ($B_s \geq 10^6 - 10^8$ Гс) проявляются в сильных полях. Основная причина появления этих эффектов – это разрыв L-S связи.

1.1.2 Эффект Зеемана в астрофизических условиях

В подавляющем большинстве случаев в астрофизических условиях эффект Пашена-Бака и квадратичный эффект Зеемана не наблюдаются. При типичных магнитных полях химически пекулярных звезд наблюдается только линейный (простой или сложный) эффект Зеемана. В этом случае эффект Зеемана характеризуется некоторыми свойствами, которые выполняются для всех типов звезд:

- зеемановские картины при любых переходах являются симметричными относительно центра линии;

- π -компоненты симметричны относительно центра линии;
- в первом приближении магнитное поле может быть представлено произведением фактора Ланде линии на сдвиг центров тяжести σ -компонент.

Эти свойства позволяют измерять величины магнитных полей звезд непосредственно из наблюдений их поляризованного потока. Однако, звезд с большими магнитными полями и узкими спектральными линиями, для которых можно наблюдать зеемановское расщепление линий без использования поляризационной техники, мало. В большинстве случаев полное расщепление не наблюдается из-за того, что зеемановское уширение линий намного меньше, чем другие эффекты, как Доплеровское уширение из-за вращения звезды, инструментальное уширение и др. На практике оказалось, что в слабых полях взаимный сдвиг линий ортогонально поляризованных по кругу компонент в продольном эффекте Зеемана измеряется с точностью на порядок большей, чем разница в ширинах линейно поляризованных компонент в поперечном эффекте [Romanyuk, 1997]. Поэтому более чем в 90% случаев измеряется только продольное магнитное поле B_e .

1.2 Методы регистрации космических магнитных полей

К прямым методам относят определение искомого значения физической величины с помощью непосредственных измерений данной величины прибором. При косвенных методах искомое значение физической величины определяют расчетом по результатам измерений других величин. Удаленность космических объектов от наблюдателя исключает возможность непосредственного контакта с ними научных приборов, и в этом смысле применяемые методы исследования будут косвенными. Однако справедливость действия в космических условиях многих открытых на Земле законов и эффектов (закона всемирного тяготения, законов Кеплера, эффектов Доплера и Зеемана и др.) не вызывает сомнения.

Используя эффект Доплера, например, можно найти скорость приближения или удаления космического объекта, при этом результат практически не зависит от применяемой модели. Использование эффекта Зеемана также напрямую приводит к количественному определению магнитного поля, и результат также мало зависит от применяемых моделей. И можно считать, что измерения различных величин с использованием проявлений эффекта Зеемана проводятся прямым методом. А к косвенным относятся те методы, которые не позволяют непосредственно получать абсолютные величины измеряемых параметров, но оценивают наличие и величину магнитного поля на основании эффектов звездной активности, аномалий химического состава, фотометрической и спектральной переменности. В отличие от измерений поля по эффекту Зеемана, косвенные методы в значительной степени модельно зависимы, поэтому результаты, полученные с их использованием, носят оценочный характер.

1.2.1 Прямые методы регистрации магнитных полей

Впервые магнитное поле у звезды 78 Vir, имеющей аномалии химического состава нашел Горацио Бэбкок в 1947 г. [Babcock, 1947]. Он сконструировал специальный дифференциальный анализатор круговой поляризации, позволяющий регистрировать одновременно спектры с левой и правой циркулярной поляризацией (подробнее в Главе 2). В качестве светоприемника использовалась фотопластинка. Суть измерений заключалась в измерениях относительных сдвигов спектральных линий в спектрах с противоположной круговой поляризацией. Метод работает эффективно только при поисках глобальных общих магнитных полей, имеющих простую, лучше всего - дипольную, структуру. Поля более сложной топологии не могли быть проанализированы Бэбкоком, так как используемые им фотопластинки могли обеспечивать отношения сигнал/шум ~ 20 .

Бэбкок измерял только общий взаимный сдвиг всех измеренных линий в разных поляризациях.

Методы регистрации в астрономии развивались: сначала появились фотоэлектрические магнитометры [Severny, 1969], а затем стали применяться современные многоканальные цифровые детекторы – ПЗС-матрицы. Это позволило реализовать новые подходы в измерениях магнитных полей звезд.

А. Интегральный метод измерения магнитного поля

На практике чаще всего реализуется измерение продольного эффекта Зеемана, тогда в спектре присутствуют только лево- и правоциркулярно поляризованные компоненты σ^+ и σ^- . Расстояние между ними можно найти по формуле [Romanyuk, 1997]:

$$\delta\lambda = \pm 9.34 \times 10^{-13} g \lambda_0^2 B_e, \quad (1.2)$$

где λ_0 – центральная, несмещенная длина волны, B_e – продольная компонента вектора магнитной индукции, g – фактор Ланде. Поскольку в первом приближении факторы Ланде большинства линий различаются не очень сильно, то при использовании достаточно узкого спектрального интервала (500 Å) можно принять, что проявление эффекта Зеемана для всех линий одинаково [Romanyuk, 1984]. Это упрощение позволяет использовать накопительный эффект от каждой линии. Сигнал поляризации накапливается пропорционально количеству линий, а шум – пропорционально квадратному корню от этой величины. Таким образом, можно с большей эффективностью выделять сигнал из шумов.

Метод, в котором величина продольного магнитного поля определяется по сдвигу центров тяжести противоположно поляризованных σ -компонент, называется интегральным [Vorra, 1973]. К основным недостаткам этого метода можно отнести зависимость получаемых результатов от сложности профилей измеряемых линий, в частности, от степени блендирования профиля, неравномерности

распределения элементов по поверхности звезды, наличия крупных пятен на поверхности звезд. В случае горячих быстрых ротаторов с малым количеством широких линий в спектре получить высокоточные измерения магнитного поля практически невозможно. Тем не менее, измерения сдвигов центров тяжести противоположно поляризованных σ -компонент дают наиболее правильные, не нуждающиеся в дополнительных калибровках результаты.

Б. Дифференциальный метод измерения магнитного поля

В дифференциальном методе используется второе свойство эффекта Зеемана - поляризация спектральных линий. Поляризованное излучение, приходящее от звезды, можно описать с помощью параметров Стокса. Параметры Стокса - это вектор, который состоит из четырех компонент: I характеризует общую интенсивность луча, Q и U характеризуют интенсивность света, линейно поляризованного в различных плоскостях, V описывает интенсивность циркулярно поляризованной компоненты. Комбинируя эти параметры, можно описать абсолютно любой тип поляризованного излучения. В таблице 1 приведены наиболее распространенные комбинации параметров для описания наблюдаемой поляризации.

Таблица 1 — Наиболее распространенные комбинации для параметров Стокса

Поляризация	I	Q	U	V
Линейная	I	$I \cos 2\omega$	$I \sin 2\omega$	0
Правоциркулярная	I	0	0	I
Левовциркулярная	I	0	0	-I

Впервые дифференциальный метод применили в Крымской обсерватории [Severny, 1969] и в Канаде [Kemp et al, 1970] при наблюдениях магнитных полей на фотоэлектрических магнитометрах. Это были одноканальные приборы для измерения круговой поляризации в крыльях спектральных линий. Особенно

успешным был бальмеровский магнитометр Ландстрита [Vorra et al, 1979; Vorra et al, 1980], с помощью которого были открыты магнитные поля белых карликов и звезд с аномальными линиями гелия [Kemp et al, 1970; Vorra et al, 1979]. С развитием техники наблюдений и внедрением цифровых многоканальных светоприемников стало возможным более широкое использование поляризационных методов.

Авторы работы [Vagnulo et al, 2002] разработали дифференциальный метод или метод регрессии, в котором измеряется поляризация в крыльях линий, определяется крутизна профиля $\frac{dI}{d\lambda}$ и на основании этого вычисляется величина продольной компоненты магнитного поля по формуле:

$$\frac{V}{I} = -g_{eff} C_z \lambda^2 \frac{1}{I} \frac{dI}{d\lambda} \langle B_z \rangle, \quad (1.3)$$

где $C_z = \frac{e}{4\pi m_e c^2} = 4.67 \cdot 10^{-13} \text{ \AA}^{-1}$ – постоянная величина. Эта зависимость имеет линейный вид. Угол наклона прямой характеризует магнитное поле: чем больше угол, тем больше поле.

У этого метода также есть недостатки. Он действует только, если зеемановское расщепление линий мало по сравнению с другими источниками уширения линий. Для звезд с малыми скоростями вращения, в спектрах которых наблюдаются узкие и сильные линии, его следует использовать при измерениях слабых магнитных полей, так как при больших магнитных полях будет видно большое зеемановское расщепление, при котором этот метод неэффективен. В случае быстрых ротаторов (если $v_e \sin i > 30 \text{ км с}^{-1}$) зеемановское уширение будет всегда меньше доплеровского, поэтому метод может применяться без ограничений. Его применение очень важно при измерении магнитных полей быстровращающихся химически пекулярных звезд. Получаемые точности измерений значительно выше, чем у интегрального метода. Вторым недостатком – вклад сильных линий в общий спектр поляризации больше, что может несколько исказить результат. В целом искажения невелики и величина поля, полученная методом регрессии, оказывается несколько меньше, чем классическим интегральным методом [Romanyuk et al, 2016b], [Romanyuk et al, 2017], [Romanyuk

et al, 2018]. В случае звезд с узкими и сильными линиями оба метода приводят к одинаковым результатам.

В. Метод LSD (Least-Squares-Deconvolution)

Факторы Ланде, которые определяют чувствительность каждой спектральной линии к магнитному полю, отличаются несущественно для небольшого участка спектра. Многие астрономы искали разные способы, чтобы эффективно использовать это обстоятельство. Наиболее успешными в решении этого вопроса были французские астрономы [Donati, 1997], которые разработали и внедрили метод Least-Squares-Deconvolution (LSD). Суть метода заключается в сложении полезного сигнала от многих линий, которые ведут себя похожим образом в магнитном поле. Идея метода такова, что весь спектр представляет собой конволюцию некоего среднего профиля и матрицы факторов сдвига и масштаба, то есть маски линий. Таким образом, каждая спектральная линия представлена средним профилем, умноженным на конкретный масштабный фактор и сдвинутым на определенную длину волны. Перекрывающиеся линии складываются линейно. Задача состоит в том, чтобы восстановить средний профиль спектра - LSD-профиль, используя как можно больше спектральных линий. Продольное магнитное поле получается из анализа набора I и V параметров Стокса по формуле:

$$B_e = -2.14 \times 10^{11} \frac{\int (V_R - V_0) V(V_R) dV_R}{\lambda g c \int (1 - I(V_R)) dV_R}, \quad (1.4)$$

где c - скорость света, g - средний фактор Ланде для используемого набора линий, λ - центральная длина волны анализируемого участка спектра, V_R - лучевая скорость, $V(V_R)$ и $I(V_R)$ - V и I параметры Стокса. Точность определения магнитного поля зависит от количества линий, от скорости вращения звезды и отношения сигнал/шум исходного спектра. В частности, последний параметр при LSD-методе достигает нескольких тысяч. Поэтому для звезд с малой скоро-

стью вращения этим способом можно достичь рекордных значений в несколько Гс, для быстрых ротаторов - 200-500 Гс.

Методом LSD были обнаружены слабые магнитные поля величиной порядка 1 Гс у Веги и ряда других ярких звезд. Метод полезен для поисковых работ, однако при детальном исследовании конкретных звезд с сильными полями могут возникать искажения, связанные с зависимостью вклада разных спектральных линий от их интенсивности, с применением среднего фактора Ланде и другими факторами. Использование разных наборов математических масок позволяет решить некоторые перечисленные проблемы, однако, даже упрощенный вариант этого метода очень сложен в реализации.

LSD-метод позволяет работать не только с V -параметром Стокса, но и с Q - и U - параметрами, которые отвечают за линейную поляризацию. Ранее детектировать сигнал линейной поляризации для магнитных химически пекулярных звезд было невозможно из-за его слабости. Так как распределение линейной поляризации в профилях спектральных линий имеет более сложную форму, чем распределение круговой, для ее обнаружения нужны спектрополяриметры высокого разрешения. У нескольких магнитных звезд слабая линейная поляризация была обнаружена [Wade, 1998].

Г. Методы магнитного картирования

При вращении химически пекулярной звезды по профилям спектральных линий можно обнаружить детали, которые связаны с запятненностью поверхности. Автором [Khokhlova, 1976] был разработан метод доплеровского картирования химически пекулярных звезд. Метод можно реализовать для быстрых ротаторов, когда ширина линий в спектре существенно превышает разрешение спектрографа. Она предложила восстанавливать карту распределения

химических элементов по поверхности, используя высокоточные профили интенсивности линий разных элементов, решая обратную задачу.

Пискунов вместе с Хохловой развили метод, включив в решение обратной задачи профили круговой и линейной поляризации [Piskunov et al, 1983; Piskunov et al, 1984]. Программа INVERS10 [Piskunov, 1985] позволяет вычислять одновременно карты распределения химических элементов по поверхности и определять величину и конфигурацию поля путем сравнения наблюдаемых и вычисленных профилей интенсивности и поляризации спектральных линий.

Метод успешно реализован. Благодаря анализу топологии магнитного поля для некоторых звезд: 53 Cam [Kochukhov et al, 2004]; α^2 CVn [Glagolevskij et al, 1985; Kochukhov et al, 2002], были обнаружены достаточно мелкие локальные структуры поля, которые не могут быть описаны в виде мультиполей низких порядков.

Метод магнитного картирования можно отнести к прямым, однако результат зависит от качества полученного наблюдательного материала (отношения сигнал/шум, спектрального разрешения и хорошего покрытия по фазе периода вращения звезды – не менее 10 наблюдений). В наблюдательном процессе – это трудно выполнимая задача. Поэтому качественное магнитное картирование выполнено для малого количества объектов.

С развитием техники и с увеличением отношения сигнал/шум получаемых поляризованных спектров, методы магнитного картирования начали применять не только анализа топологии относительно простых полей химически пекулярных звезд, но и для изучения топологии холодных активных звезд, запятненных звезд разных типов, звезд Ae/Be Хербига, Т Тау, К-гигантов и других, обладающих полями сложной конфигурации.

1.2.2 Косвенные оценки величины магнитных полей

Прямые измерения магнитного поля астрофизических объектов в большинстве случаев выполнить невозможно. Поэтому исследователи вынуждены применять разные косвенные улики, указывающие на присутствие магнитного поля в том или ином объекте. Это вспышечная активность, переменность блеска и спектра, аномальный химический состав, поляризация континуума и другие признаки. При их наличии можно заподозрить присутствие магнитного поля, однако определить его величину крайне затруднительно. Одним из таких признаков для химически пекулярных звезд является наличие депрессий в континууме их спектров и их зависимость от величины поверхностного магнитного поля.

А. Оценка величины магнитного поля по данным среднеполосной фотометрии

В непрерывных спектрах химически пекулярных звезд наблюдаются широкие или мелкие депрессии. Они впервые были обнаружены в работе [Glagolevskii, 1966]. Эти аномалии очень слабые и при использовании фотографических спектров были не видны. И только с использованием новых фотоэлектрических светоприемников появилась возможность их обнаружить. Самая сильная депрессия находится на длине волны около 5200 \AA , ее глубина не превышает нескольких процентов, а ширина достигает $\sim 200\text{-}300 \text{ \AA}$.

Специально для поисков магнитных химически пекулярных звезд фотоэлектрическим методом были разработаны две фотометрические системы: Δa - Венская фотометрическая система [Maitzen, 1976] и Z - Женевская фотометрическая система [North, Cramer, 1984]. Авторы работы [North, Cramer, 1984] нашли корреляцию между интенсивностью депрессии и величиной поверхностного магнитного поля. Эта корреляция мала, но является первым доказательством за-

висимости величины магнитного поля от других параметров звезд [Kudryavtsev et al, 2008].

Причины появления депрессий неясны: возможно, на поверхности звезды возникает сгущение магнитных линий, что приводит к увеличению поглощения в линиях, поэтому в этом месте появляется депрессия в континууме звезды. На практике депрессии наблюдаются только у химически пекулярных звезд, находящихся в интервале эффективных температур от 8000 К до 14000 К [Kudryavtsev et al, 2008]. Если поверхностное поле звезды больше чем 5 кГс, то достигается эффект насыщения, и параметр Δa и индекс Z , которые характеризуют величину депрессии, перестают зависеть от величины поля [Cramer, Maeder, 1980].

Фотометрические исследования проводить проще спектрополяриметрических: наблюдения можно выполнять на малых телескопах с простой аппаратурой. Поэтому интенсивности депрессий измерены для нескольких тысяч звезд [North, Cramer, 1985]. Благодаря найденной корреляции были предприняты попытки заменить спектральные наблюдения эффекта Зеемана на фотометрические исследования. На основании оценок полей, вычисленных с использованием фотометрических индексов, был сделан вывод о быстром распаде поля химически пекулярных звезд с возрастом [North, Cramer, 1985; Kudryavtsev et al, 2008]. В дальнейшем спектрополяриметрические измерения опровергли этот вывод [Glagolevskij, 2013].

В CAO РАН на 6-м телескопе был выполнен большой магнитный обзор химически пекулярных звезд с большими депрессиями, в результате которого было обнаружено более 150 новых магнитных звезд, что составляет более 30% от всех известных в настоящее время [Kudryavtsev et al, 2006; Romanyuk et al, 2016b; Romanyuk et al, 2017; Romanyuk et al, 2018]. Было найдено, что более 75% звезд с большими депрессиями имеют сильное магнитное поле. Таким образом, использование данных среднеполосной фотометрии является эффективным методом для поисков новых магнитных звезд. Однако использовать эти фотометрические оценки для измерения магнитного поля вместо спектрополяриметрических измерений не следует во избежание ошибочных выводов.

Таким образом, можно заключить, что разработаны разнообразные методы определения магнитных полей. Значительное улучшение техники наблюдений и методов их анализа позволило проводить поиски и анализ полей очень сложной топологии, достигнуты рекордные точности порядка 1 Гс регистрации полей ярких звезд. Однако прогресс в развитии методов продолжается и позволяет надеяться, что в ближайшем будущем можно будет определять и анализировать магнитные поля звезд любых типов и появится возможность получить полную картину проявлений магнитного поля в Галактике.

1.3 Химически пекулярные звезды

В настоящее время магнитные поля обнаружены у звезд разных типов. Но по-прежнему, наибольшее внимание привлекают химически пекулярные звезды – первые, у которых магнитное поле было найдено. За несколько десятилетий получено много наблюдательных данных о них, что позволило получить некоторые представления об их происхождении и эволюции. Однако надежной теории не построено до настоящего времени и одна из основных причин - недостаточные знания о фундаментальных параметрах этих объектов.

1.3.1 Общие сведения и классификация

При составлении каталога Генри Дреппера HD, в Гарвардской обсерватории в конце XIX века под руководством Пикеринга была выполнена спектральная классификация более 200 тысяч звезд. Антония Маури обнаружила на фотопластинке, что спектр звезды α^2 Гончих Псов (α^2 CVn) имеет необычные (аномальные) линии в спектре по сравнению с другими звездами того же спектрального класса. Позже были обнаружены и другие A-звезды с подобны-

ми аномалиями. Эти звезды получили название звезды типа α^2 CVn или просто Ap (peculiar A-stars).

В 1913 году астроном Пулковской обсерватории Аристарх Белопольский, изучая звезду α^2 CVn, обнаружил, что спектральные линии европия у этой звезды обладают переменностью, которая является строго периодической. Подобные изменения были обнаружены и для других элементов: хрома, стронция, кремния, редкоземельных элементов.

Значительно позже такие же аномалии были найдены и у некоторых звезд спектрального класса В. Тогда решили расширить название этой группы до Ap/Bp- звезды (peculiar A-stars and B-stars).

В 1970-е годы пришло понимание, что эти аномалии переменности никак не связаны с физическими условиями, так как у этих звезд те же значения фундаментальных параметров, что и у обычных, а являются следствием неоднородности химического состава среды.

В 1974 году Престон дал название всей этой группе как химически пекулярные звезды. Введенная им классификация является общепринятой на сегодняшний день:

- CP1 – наиболее холодные Am/Fm звезды (metal A- and F- stars). В их спектрах имеются аномально усиленные линии металлов, ослабленные линии кальция и скандия и отсутствует спектральная переменность. Эффективная температура этих звезд варьируется от 7000 до 10000 К [Любимков, 1995]. Глобальными магнитными полями не обладают. Современные работы по исследованию магнитных полей у этих звезд показывают величину в единицы-десятки Гаусс [Auriere et al, 2007].
- CP2 – Ap/Bp-звезды. В их спектрах присутствуют сильные линии хрома, кремния и наблюдаются сильные линии редкоземельных элементов. Звезды обладают спектральной и фотометрической переменностью. Эффективные температуры варьируются от 7000 до 16000 К [Любимков, 1995]. В последние годы в эту подгруппу включают и более горячие

- звезды с аномалиями гелия, которые по классификации Престона составляют подгруппу CP4. Обладают сильными магнитными полями.
- CP3 – звезды с аномальными линиями ртути и марганца – Hg/Mn звезды. Спектральная переменность у этих звезд не обнаружена. Эффективная температура варьируется от 10000 до 16000 К [Любимков, 1995]. Магнитные поля у них не зарегистрированы. По-видимому, они являются продолжением подгруппы CP1 в сторону высоких температур.
 - CP4 – продолжение Ap/Vp-звезд в сторону эффективных температур 12000 до 30000 К. Делятся на две подгруппы: He-weak – более холодные звезды с ослабленными линиями гелия, а He-strong – более горячие звезды с усиленными линиями гелия. Наблюдается спектральная переменность и сильные магнитные поля.

На данный момент наиболее полный список химически пекулярных звезд приведен в каталоге [Renson, Manfroid, 2009]. В нем представлены сведения о более чем 8200 объектах, из них около 4000 – это потенциально магнитные Ap/Vp-звезды (CP2, CP4). Именно этому типу звезд будет уделено особое внимание в данной работе.

1.3.2 Общие сведения о магнитных полях химически пекулярных звезд

Началом изучения проявлений магнитных полей в космическом пространстве служит открытие, сделанное в работе [Hale, 1908]. Джордж Хэл обнаружил магнитное поле порядка 2 кГс в солнечных пятнах. В областях вне пятен поле верную величину поля (порядка 1 Гс) впервые определил [Babcock, 1953], построив для этого первый фотоэлектрический солнечный магнитограф.

Долгое время поиски магнитных полей у других звезд не приводили к положительным результатам. Лишь Бэбкок в 1947 году [Babcock, 1947] смог зарегистрировать магнитное поле у Ap-звезды 78 Vir. Используя сконструированный им магнитограф, он обнаружил сильное магнитное поле у звезды 78 Vir.

рованный дифференциальный анализатор круговой поляризации (четвертьволновая пластинка + кристалл исландского шпата), ему удалось одновременно зарегистрировать лево- и право- поляризованные циркулярные спектры. Эта принципиальная схема анализатора круговой поляризации сохраняется до настоящего времени.

За время, прошедшее с первых наблюдений Бэбкока, произошли революционные изменения в методах регистрации спектров, в частности внедрение ПЗС-матриц. Их использование привело к резкому увеличению отношения сигнал/шум полученных спектров и выборки химически пекулярных звезд среди слабых звезд.

Впоследствии были развиты новые методы анализа данных (в частности, магнитное картирование химически неоднородной поверхности звезд), что позволило анализировать более тонкие эффекты магнитной структуры химически пекулярных звезд. Повысился предел звездных величин при наблюдениях магнитных полей: от $8-9^m$ стали доступными звезды $11-12^m$. Стали возможными массовые измерения магнитных полей звезд в скоплениях разного возраста. Получен богатый материал для анализа эволюции звездных магнитных полей.

Химически пекулярные звезды являются подходящими объектами для исследований космического магнетизма. Сильные постоянные поля у этих звезд позволяют выявлять взаимосвязи в сложном взаимодействии поля с веществом, исследовать возможности работы новых физических механизмов, которые не могут быть изучены в физической лаборатории на Земле (например, механизм магнитной диффузии атомов).

Автор работы [Babcock, 1960] обнаружил, что у большей части исследованных им звезд продольное магнитное поле периодически меняется. По ряду признаков он предположил, что переменность вызвана вращением. Пример подобного явления показан на рис. 1.2.

Для объяснения наблюдаемых вариаций магнитного поля автором работы [Stibbs, 1950] была предложена модель наклонного ротатора (рис. 1.3).

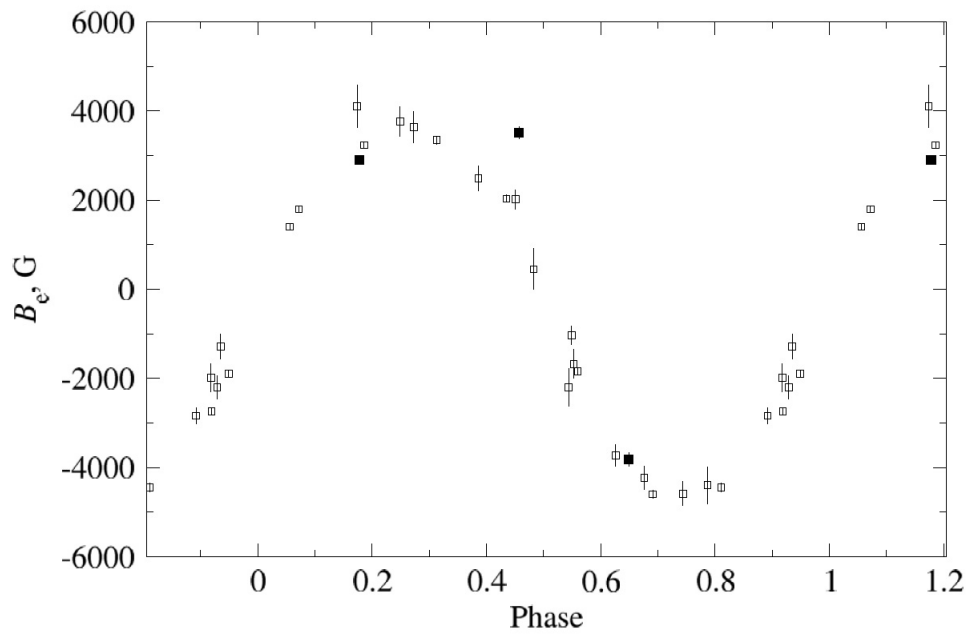


Рисунок 1.2 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля B_e для химически пекулярной звезды 53 Cam [Romanyuk et al, 2014a].

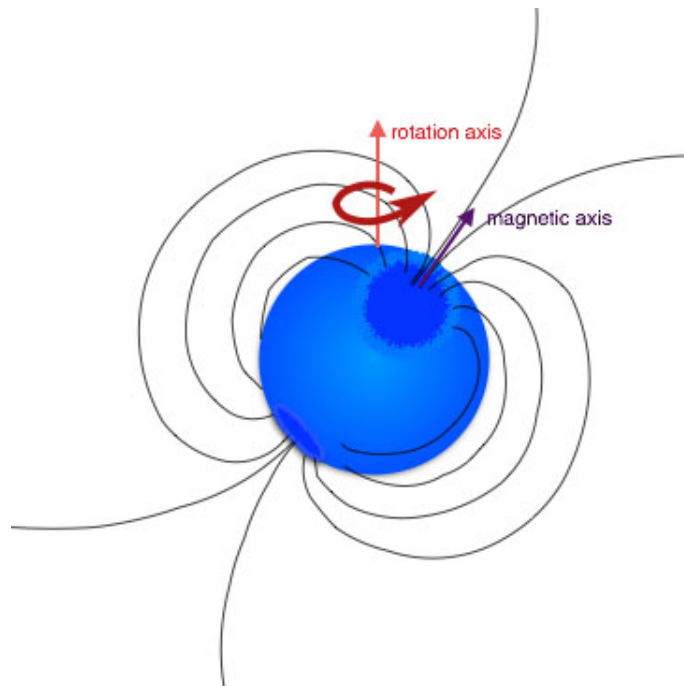


Рисунок 1.3 — Модель наклонного ротатора.

Эта модель стала общепринятой, когда была найдена хорошая обратная зависимость между периодом и скоростью вращения магнитных звезд в конце 1970-х. Данная зависимость легко моделируется, например, в программе FLDCURV [Landstreet, 1970]. Модель позволяет по кривой переменности эффективного продольного магнитного поля оценить величину поля на полюсе

звезды V_p , поверхностное магнитное поле V_s , угол наклона между осью вращения звезды и направлением наблюдения i и угол наклона оси магнитного диполя к наблюдателю β .

Эта модель хорошо описывает простые дипольные структуры поля. Когда магнитное поле имеет сложную конфигурацию, то описание поля одним диполем недостаточно, надо привлекать два или более диполя (мультипольная структура магнитного поля). Разработанные методы магнитного картирования позволяют по суперпозиции нескольких диполей описать сложную топологию магнитного поля. Но данная процедура выполнена только для ограниченного набора звезд. Это связано с тем, что при использовании методов картирования необходимо получать наблюдения с очень высоким спектральным разрешением и отношением сигнал/шум. Кроме того, надо получить серию спектров с равномерным распределением по фазе периода вращения звезды, что технически трудно сделать. Стандартные массовые наблюдения магнитных химически пекулярных звезд показывают, что в подавляющем большинстве случаев дипольная компонента поля является преобладающей.

Несмотря на значительный технический прогресс, измерения магнитных полей звезд является достаточно трудоемкой процедурой. За 70 лет выполнены наблюдения около 1000 химически пекулярных звезд. В настоящее время известно около 450-500 магнитных химически пекулярных звезд, из них примерно 150 было обнаружено на 6-м телескопе (35%) [Romanyuk et al, 2019].

Обзорные спектральные работы выполнены для всех объектов ярче 10 звездной величины. Так как аномалии хорошо видны даже на спектрах с низким разрешением, применявшихся при обзорных работах, можно с уверенностью утверждать, что доля химически пекулярных звезд относительно нормальных тех же спектральных классов, в целом, составляет 10-15% [Glagolevskij, 2018]. Какую долю составляют магнитные химически пекулярные звезды оценить пока что не предоставляется возможным, так как получено мало спектрополяриметрических данных.

1.4 Функция распределения магнитных полей химически пекулярных звезд

Возможно, что все химически пекулярные звезды обладают магнитными полями, но в настоящее время проблема не решена: не хватает высокоточных спектрополяриметрических наблюдений звезд со слабыми полями. Более подробно этот вопрос был рассмотрен на международной конференции "Физика магнитных звезд" в 2018 году [Kholtygin et al, 2019; Medvedev, 2019].

Нижняя граница определения поля напрямую зависит от точности измерений. Со временем она значительно выросла и по сей день не ясно, существует ли непрерывный переход между магнитными и нормальными Ap и Vp-звездами. Группа французских астрономов [Auriere et al, 2007] опубликовала статью, в которой утверждается, что существует некая граница $B_p \sim 300$ Гс, ниже которой магнитных звезд нет. Этот предел поля соответствует продольному полю $B_e \sim 100$ Гс, что находится на минимальном уровне детектирования магнитных полей. В настоящее время накоплено недостаточное количество наблюдений, чтобы судить о наличии "магнитной пустыни" в интервале полей от единиц Гс до 300 Гс.

По имеющимся данным была построена и промоделирована функция распределения магнитных полей OBA-звезд [Medvedev et al, 2017; Medvedev et al, 2018]. Результаты этих работ показывают, что магнитные поля звезд распределены по лог-нормальному закону с максимальным количеством звезд с полем порядка 1-2 кГс. Со стороны сильных полей функция реалистично отражает полученные в наблюдениях результаты. Однако со стороны полей меньше 1 кГс закон падения определить труднее. Авторы [Medvedev et al, 2017; Medvedev et al, 2017], промоделировав полученное распределение магнитных OBA звезд, считают, что "магнитной пустыни" не существует.

Что касается верхней границы, то тут тоже все не однозначно. Бэбкок в 1960 году [Babcock, 1960] обнаружил звезду HD 215441 с расщепленными зеемановскими компонентами, указывающими на существование дипольного поля

величиной 34 кГс на поверхности звезды. На данный момент эта звезда является рекордсменом по величине общего глобального поля среди звезд Главной последовательности.

Позже, авторы работы [Vogt et al, 1979] обнаружили звезду HD 37776 с аномально сильным полем сложной конфигурации. Дальнейшее исследование [Thompson et al., 1985] показало, что звезда обладает сильнейшим полем, в основном квадрупольной структуры и доходит до 60 кГс на некоторых местах поверхности. Однако дипольный компонент не превышает 2 кГс. Звезда является быстрым ротатором ($v_e \sin i = 80 \text{ км с}^{-1}$), поэтому прямые наблюдения расщепленных зеемановских компонент, как для звезды HD 215441, невозможны. Авторы работы [Koruylova, Romanuk, 1992] обнаружили, что в некоторых линиях видны расщепленные компоненты, которые указывают на поверхностное поле величиной 70-80 кГс. Дальнейшие исследования проводились методами магнитного картирования поверхности звезды. В работах [Хохлова и др., 2000; Kochukhov et al, 2011] было показано, что звезда обладает полем еще более сложной конфигурации, которую невозможно описать набором диполей низкого порядка, и величина поля в отдельных местах на поверхности превышает 50 кГс.

Наиболее сложные и сильные поля характерны для горячих массивных Вр-звезд с аномалиями в содержании кремния и гелия. Однако есть и холодные звезды с сильными магнитными полями. В частности, это Ар-звезды с аномальными содержанием стронция, хрома и европия. Примером таких звезд может быть звезда HD 154708 с поверхностным магнитным полем в 24.5 кГс [Hubrig et al, 2005] или HD 178892 с полем в 17.5 кГс [Kudryavtsev et al, 2006].

1.5 Теории образования и эволюции магнитных полей Ар/Вр-звезд

Наблюдения показали, что магнитные поля Ар/Вр-звезд значительно отличаются по своей структуре от поля в солнечных пятнах, в которых четко видно

как поля зарождаются, живут на временах дни-недели, а далее диссипируют тем или иным способом. В случае магнитных Ap/Bp-звезд наблюдается совсем иная картина: не было замечено изменений конфигурации поля на протяжении десятков лет наблюдений. Это доказывает то, что у Ap/Bp-звезд не локальные атмосферные поля, а глобальные, охватывающие всю звезду.

Теория, объясняющая магнетизм Ap/Bp-звезд, в настоящее время разработана недостаточно. Нет никаких возможностей наблюдать процесс образования поля, происходящий в недрах звезды. В наблюдениях можно проверить только следствие работы тех или иных механизмов, которые по-разному будут зависеть от фундаментальных параметров звезды.

Для Солнца были проведены детальные исследования магнитного поля в разных спектральных диапазонах с высоким пространственным разрешением. В случае солнечной атмосферы перенос энергии осуществляется путем конвекции. Так как силовые линии поля вморожены в плазму, то они вращаются совместно со звездой и закручиваются на поверхности звезды. В местах пересечения линий образуются петли, в которых возникает неоднородность магнитного поля. В этих местах магнитное поле блокирует передачу энергии вышележащему участку, из-за чего вещество остывает и начинает подниматься в более холодные слои атмосферы. Если этот участок выходит на поверхность, то в том месте образуется темное, более холодное пятно. Из-за дифференциального вращения Солнца пятна концентрируются преимущественно в экваториальной области. Магнитные поля в пятнах имеют разные полярности: пятна с полями противоположной полярности притягиваются друг к другу, образуя группы пятен.

1.5.1 Теория динамо

Теория солнечного динамо не подходит для описания магнитного поля более горячих Ар/Вр-звезд. Поэтому были разработаны другие альтернативные механизмы. Наиболее популярными являются теория динамо и реликтовая.

Теория динамо основана на том, что, так как для химически пекулярных звезд основным источником переноса энергии является лучистое давление, а в ядре располагается конвективная зона, то именно в нем происходит генерация магнитного поля звезды [Dobler, 2005]. С эволюцией звезды постепенно, за многие миллионы лет, поле выносится на поверхность и становится наблюдаемым. Эту теорию долгие годы разрабатывала Потсдамская группа астрономов во главе с Краузе и Редлером [Krause, 1984]. Согласно теории, генерация поля происходит постоянно, в том числе и во время жизни звезды на главной последовательности. Впоследствии поле должно расти с возрастом и прямо пропорционально зависеть от скорости вращения звезды. Доказательства достоверности этой теории приведены в работе [Hubrig, 2006]. Однако наблюдения в целом не подтверждают выводы теории динамо. Во-первых, нет зависимости величины поля от скорости вращения звезд [Glagolevskij et al, 1987], [диссертационная работа: Якунин, 2014]. Во-вторых, имеются очень медленно вращающиеся магнитные звезды, периоды вращения которых составляют десятки лет: HD 965, период вращения $P \sim 20$ лет [Romanyuk et al, 2015c]; γ Equ, $P \sim 100$ лет [Buchkov et al, 2016]; HD 50169, $P \sim 30$ лет [Mathys et al, 2019]. У данных звезд наблюдаются магнитные поля величины больше 1кГс. Механизм динамо сгенерировать подобные магнитные поля не в состоянии. Также среди горячих Вр-звезд не было найдено медленных ротаторов.

1.5.2 Реликтовая теория

Наибольшее распространение получила теория реликтового происхождения поля [Mestel, 2001; Moss, 2001]. Основная суть теории заключается в том, что магнитное поле образуется вместе со звездой при сжатии молекулярного облака. Каждая частица вещества в облаке имеет свой магнитный момент. При рождении звезды плотность вещества растет и магнитные моменты начинают "складываться" друг с другом. В итоге, магнитное поле звезды полностью характеризуется суммарным полем всех частиц, что участвовали при ее образовании.

Основные наблюдательные тесты для проверки этой теории следующие:

1. Магнитное поле должно наблюдаться у протозвезд.
2. Магнитное поле должно падать с возрастом, так как во время жизни звезды на Главной последовательности генерации нет.
3. Не должно быть зависимости величины магнитного поля от скорости вращения звезд.
4. Может наблюдаться некоторое уменьшение магнитного поля с уменьшением массы и температуры химически peculiарных звезд.

А. Магнитные поля протозвезд

Эволюционными предшественниками A_p/V_p -звезд являются объекты типа A_e/V_e Хербига. Если справедлива реликтовая теория, то 10% из них должны обладать магнитными полями. Однако спектры этих объектов очень сложные: наблюдаются очень слабые линии, принадлежащие фотосфере звезды и сильные эмиссионные линии оболочки. В настоящее время достоверно обнаружено магнитное поле у нескольких звезд типа A_e/V_e Хербига [Hubrig et al, 2018; Pogodin et al, 2017].

Магнитные поля этих объектов, в целом, оказались на порядок слабее, чем у Ар/Вр-звезд. Исходя из реликтовой теории, можно было ожидать обратной картины. Скорее всего, это связано с тем, что методика измерений эффекта Зеемана такова, что при анализе используется только усредненный по всей видимой поверхности продольный компонент поля (эффективное продольное магнитное поле), и если поле звезд Ae/Be Хербига имеет сложную топологию, то эффективное продольное магнитное поле может оказаться слабым. Поэтому в настоящее время, сложно доказать противоречия реликтовой теории касательно этого типа звезд.

Б. Уменьшение магнитного поля с возрастом

Слабое уменьшение величины магнитного поля с возрастом фиксировалось неоднократно [Glagolevskij et al, 1987; Kochukhov et al, 2006; Romanyuk, 2007; Fossati, 2007]. Однако количественно сравнивать экспериментальное уменьшение с теоретическим практически невозможно. Во-первых, в вычислениях используются некоторое количество не наблюдаемых параметров, что приводит к неопределенностям. Во-вторых, возраст одиночных звезд, которые не входят в состав скоплений (звезд поля), определяется с большой ошибкой, которая может достигать 100% [Bagnulo et al, 2006b]. Поэтому для исследования падения величины магнитного поля с возрастом целесообразно исследовать магнитные поля членов скоплений разного возраста [Romanyuk et al, 2015d]. В САО РАН была создана большая программа исследований магнитных полей звезд разного возраста в ассоциации Орион OB1 [Romanyuk et al, 2013]. Некоторые итоги этой обширной работы будут представлены в настоящей диссертационной работе.

В. Зависимость магнитного поля от скорости вращения, массы и температуры

Данный вопрос подробно рассмотрен в работе [Romanyuk, 2007]. За более чем 10 лет не произошло кардинальных изменений. Нет четких зависимостей величины магнитного поля от различных фундаментальных параметров. В работе [Kochukhov et al, 2006] были предприняты попытки построения подобных зависимостей: фундаментальные параметры химически пекулярных звезд определялись массово по фотометрическим данным, величины магнитных полей оценивались по спектрам низкого разрешения со спектрографа FORS1. В статье [Bagnulo et al, 2006b] было найдено слабое указание на то, что самые горячие и массивные звезды имеют более сильное магнитное поле, чем холодные. Но так как горячие звезды являются и более быстрыми ротаторами, то не ясно, от какого параметра возникла зависимость: от скорости вращения, массы или температуры. В работах [Glagolevskij et al, 1987], [диссертационная работа: Якунин, 2014] была предпринята попытка поиска зависимости величины магнитного поля от скорости вращения. В результате ее найдено не было.

Из реликтовой теории также следует, что самые сложные конфигурации поля должны наблюдаться у молодых звезд. С возрастом мелкие структуры диссипируют быстрее и у старых звезд остается только дипольный компонент. Этот вывод подтверждается в наблюдениях. В настоящее время найдено шесть магнитных химически пекулярных звезд с полями недипольной структуры [Romanyuk et al, 2012]. Все они являются молодыми массивными V_p -звездами.

Реликтовая теория не может объяснить многие результаты наблюдений:

1. почему в рассеянных скоплениях одни звезды обладают магнитными полями, а другие нет, хотя формируются из одного молекулярного облака;
2. существует много спектрально-двойных звезд, из которых магнитной является только одна звезда.

1.6 Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что магнитные поля широко распространены в космосе, а магнитные химически пекулярные звезды составляют примерно 10-15% от всех А и В-звезд главной последовательности. С момента открытия магнитных полей этих объектов Бэбкоком, прошло уже более 70-ти лет. Многие проблемы удалось прояснить.

В частности, было найдено, что за исключением вращения, фундаментальные параметры химически пекулярных звезд соответствуют нормальным звездам тех же спектральных классов. Их поверхность химически неоднородна, имеются пятна повышенного или пониженного содержания отдельных химических элементов: наблюдается увеличение на несколько порядков содержания редкоземельных элементов.

Благодаря введению ПЗС-матриц были развиты методы магнитного картирования, которые позволили построить карты магнитного поля и распределения пятен разных элементов по поверхности. Результаты этих наблюдений дают доказательства теории вмороженности магнитного поля в атмосферах звезд, в которых под действием механизма магнитной диффузии на протяжении миллионов лет в атмосфере могут возникнуть пятна химических элементов.

Тем не менее, многие результаты наблюдений не получили объяснений. Не решен вопрос о более медленном вращении Ар/Вр-звезд: является ли это результатом торможения в магнитном поле на этапе рождения звезды или поле является следствием медленного вращения.

Хотя большинство исследователей склоняется к выводу о реликтовой природе генерации магнитного поля химически пекулярных звезд, но решающих наблюдательных доказательств пока не получено. До настоящего времени не найдено каких-либо корреляций между величиной магнитного поля звезд и другими фундаментальными параметрами. Это не позволяет понять: есть ли

реальные связи между ними, и почему сильные глобальные магнитные поля имеются только у части звезд.

Проводимое масштабное исследование фундаментальных параметров Ар/Вр-звезд в данной работе позволит приблизиться к решению этой проблемы.

Глава 2. Приборы и методика наблюдений

Настоящая работа выполнена на материале, полученном при помощи Основного звездного спектрографа (ОЗСП) [Panchuk et al, 2014] 6-м телескопа с анализатором круговой поляризации [Chountonov, 2004]. Спектральное разрешение $R=15000$ позволяет использовать спектры циркулярно-поляризованного излучения не только для измерений магнитных полей, но и для определения лучевых скоростей V_R , проекций скоростей вращения $v_e \sin i$, эффективной температуры T_{eff} и других фундаментальных параметров звезд.

На 6-м телескопе имеется также и эшелельный спектрограф НЭС [Panchuk et al, 2017], на котором эпизодически выполнялись наблюдения магнитных полей. Но в представляемой диссертации спектральные материалы, которые были получены на этом приборе, не использовались.

Прежде чем перейти к описанию ОЗСП, методике получения и анализа наблюдательных данных, необходимо сделать краткий обзор основных спектрополяриметров мира. Спектрополяриметры высокого разрешения базируются на эшелельных спектрографах телескопов умеренного размера с диаметром зеркала 2-4 метра. С их помощью получают наблюдательный материал, который, в первую очередь, предназначен для построения магнитных карт. Данная работа требует большого количества наблюдений в разные фазы периода вращения звезды. На больших телескопах (6-м БТА, 8-м VLT) используются спектрополяриметры умеренного и низкого разрешения, которые могут принести новые результаты на основании разовых наблюдений или небольших серий, например, обнаружение новых магнитных звезд.

2.1 Обзор основных спектрополяриметров, используемых для измерений магнитных полей звезд

2.1.1 MuSICOS

Краткий обзор начнем с первого спектрополяриметра MuSICOS¹ (Multi Site COntinuous Spectroscopy) [Baudrand et al, 1992]. Он был изготовлен и установлен в фокус Кассегрена на двухметровом телескопе "Bernard Lyot" в обсерватории Pic du Midi. Это кросс-дисперсионный оптоволоконный спектрограф высокого разрешения, $R = 35000$. На нем проводили измерения линейной и круговой поляризации в профилях спектральных линий.

Прибор широко использовался в наблюдениях. Более подробный обзор проводимых исследований можно найти в работах [Romanyuk, 2015b; Romanyuk, 2010]. Из наиболее значимых можно выделить:

- наблюдения круговой поляризации у 74 звезд для поиска слабого магнитного поля [Shorlin et al, 2002];
- наблюдения 21 Ap-звезды для поиска нижней границы магнитного поля с очень высокой точностью (у 19 из 21 были найдены слабые магнитные поля не более $B_e = 100$ Гс) [Auriere et al, 2007];
- проведение первых исследований линейной поляризации (была обнаружена у 10 химически пекулярных звезд) [Wade et al, 2000].

На основании измерений магнитных полей выборки звезд авторы [Auriere et al, 2007] делают вывод о существовании "магнитной пустыни в которой нет пекулярных звезд с продольными полями менее 100 Гс (Глава 1).

В настоящее время MuSICOS уже не эксплуатируется, предпочтение было отдано более эффективным приборам.

¹<http://www.ast.obs-mip.fr/projets/espados/spectromus.html>

2.1.2 ESPaDOnS, NARVAL

Идеи, которые были применены при создании спектрографа MuSICOS легли в основу при создании новых оптоволоконные приборов ESPaDOnS² и NARVAL³.

ESPaDOnS (an Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars at Canada-France-Hawaii Telescope) – это новое поколение кросс-дисперсионного спектрополяриметра, который установлен на 3.6-метровом Canada-France-Hawaii телескопе в 2003 году. Максимальное разрешение спектрографа $R = 70000$ в оптическом диапазоне (370-1000 нм).

NARVAL - это двойник спектрографа ESPaDOnS, который в 2006 году установлен на том же телескопе, что и MuSICOS. Наличие двух одинаковых спектрополяриметров, расположенных в восточном и западном полушариях, позволяет эффективно выполнять наблюдения магнитных полей химически peculiarных звезд с фазой периода вращения. Более подробный обзор проводимых исследований можно найти в работах [Romanyuk, 2015b; Romanyuk, 2010].

Основные значимые результаты, которые были получены благодаря этим спектрографам, следующие:

- было доказано, что все Ap-звезды магнитные, разница лишь в величине магнитного поля;
- магнитные поля не найдены у Am- и HgMn-звезд, несмотря на точность в пределах 1-2 Гс;
- на основании спектрополяриметрических наблюдений с высоким разрешением, построены магнитные карты солнечноподобных звезд, найден дрейф пятен на временах несколько лет;

²<http://www.ast.obs-mip.fr/projets/espadons/espadons.html>

³<http://www.ast.obs-mip.fr/projets/narval/v1/>

- проводятся систематические измерения магнитных полей красных гигантов и А-сверхгигантов. Типичная величина продольного поля у них - около 10 Гс.

2.1.3 HARPSpol

HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) - оптоволоконный эшелюный спектрограф высокого разрешения, который установлен в Европейской Южной Обсерватории (ESO) на телескопе La Silla (3.6-м). Для этого спектрографа была разработана поляриметрическая мода, которая более подробно описана в работе [Piskunov et al, 2011]. Среднее спектральное разрешение прибора $R = 106000$, рабочая область спектрального диапазона 3780-6910 Å. Точность измерения магнитных полей звезд - на уровне единиц Гаусс. Более подробный обзор проводимых исследований можно найти в работах [Romanyuk, 2015b; Romanyuk, 2010], но можно выделить основные результаты, полученные благодаря этому спектрографу:

- получение спектрополяриметрического материала для проекта MiMeS, цель которого исследование О- и В-звезд в различных скоплениях и ассоциациях с задачей поиска новых магнитных звезд [Wade, the MiMes Collab., 2015];
- поиск магнитных полей у молодых звезд типа Ae/Be-Хербига [Hubrig et al, 2014];
- магнитное картирование химически пекулярных звезд (например [Kochukhov et al, 2015; Johns-Krull et al, 2013]).

Спектрографы MuSICOS, ESPaDOnS, NARVAL и HARPSpol служат для наблюдений всех четырех параметров Стокса с высоким спектральным разрешением. В настоящее время они дают основной материал, необходимый для выполнения магнитного картирования.

2.1.4 FORS1, FORS2

Исследование механизмов образования и эволюции магнитных полей – одна из важнейших задач современной астрофизики (см. Главу 1). Было показано, что наилучший способ решения этой задачи – наблюдения магнитных химически пекулярных звезд в скоплениях разного возраста. Сравнение магнитных полей молодых и старых звезд позволит выбрать механизм их образования и эволюции. Поэтому 8-м телескопы VLT было решено оснастить спектрополяриметром низкого разрешения для поиска магнитных полей у неярких слабых звезд, что позволило бы увеличить количество скоплений, в которых потенциально могут находиться магнитные звезды примерно до сотни [Bagnulo et al, 2002]. Именно для этой цели был сконструирован и изготовлен спектрополяриметр низкого разрешения FORS1⁴ - Focal Reducer and low dispersion Spectrograph. В 2009 году FORS1 был модернизирован. Версия FORS2 имеет примерно те же параметры: максимальное разрешение $R = 2000$ в оптической области (350-580 нм). Установлен этот прибор в фокусе Кассегрена на 8.2-м телескопе ANTU VLT.

На FORS1, FORS2 было выполнено очень много наблюдательных программ, более подробную информацию, о которых можно найти в работах [Romanyuk, 2015b; Romanyuk, 2010]. Основные значимые результаты следующие:

- проведены наблюдения для 97 горячих химически пекулярных звезд, из которых 37 оказались магнитными [Bagnulo et al, 2006a];
- были найдены две молодые магнитные звезды с большими полями [Bagnulo et al, 2003], [Bagnulo et al, 2004];
- исследование roAr -звезд: было открыто и проанализированы магнитные поля для 14 звезд [Hubrig et al, 2004].

⁴<http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/fors.html>

На телескопе UT2 VLT в фокусе Нэсмита стоит спектрограф UVES⁵ - Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph. Это эшелле-спектрограф высокого разрешения. Он способен разделять поток звезды на два луча - ультрафиолетовый и видимый. Разрешение может быть $R = 40000 - 110000$. Этот спектрограф не оснащен поляриметрическим оборудованием, его основная цель – исследование расщепления линий вследствие эффекта Зеемана. Благодаря этому, можно оценивать не продольную компоненту магнитного поля B_e , а поверхностное поле B_s . В сочетании со спектрографом FORS2 этот прибор является сильным способом изучения магнитных полей звезд, что продемонстрировано в работе [Kochukhov et al, 2013].

2.2 Основной звездный спектрограф

Настоящая работа выполнена на материале, полученном при помощи Основного звездного спектрографа (ОЗСП) [Panchuk et al, 2014] 6-м телескопа с анализатором круговой поляризации [Chountonov, 2004] (рис. 2.1).

ОЗСП – спектрограф с длинной щелью, установленный стационарно в стойке фокуса Нэсмит-2. Конструирование прибора и изготовление деталей проводилась одновременно с производством самого телескопа, поэтому этот прибор можно считать единственным, который работает со времени его установки.

Основной звездный спектрограф неоднократно подвергался модернизации (подробнее см. [Panchuk et al, 2014; Chountonov, 2004]). Это позволило существенно увеличить эффективность спектрографа по сравнению с первоначальным вариантом. В настоящее время ОЗСП используется в режиме поляриметрии, благодаря анализатору круговой поляризации [Chountonov, 2004]. В этом режиме возможны наблюдения звезд до 12 звездной величины. ПЗС-матрица на основе чипа *E2VCCD42* – 90 размером 2048×4600 элементов (размер

⁵<http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/uves.html>

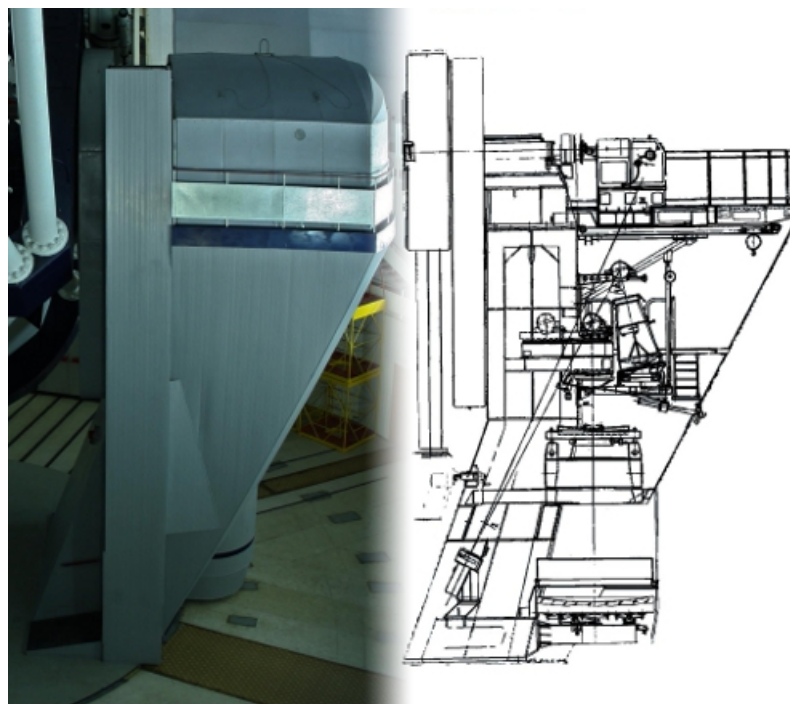


Рисунок 2.1 — Общий вид стойки Нэсмит-2

элемента 13.5 микрон) позволяет регистрировать диапазон спектра в 500 \AA . Разрешение полученного материала $R = 15000$, что достаточно для регистрации магнитных полей звезд точностью 100-300 Гс, и для оценки и анализа фундаментальных параметров изучаемых звезд.

2.2.1 Технические характеристики

Технические характеристики ОЗСП приведены на сайте САО РАН⁶. Всю конструкцию прибора можно условно разбить на четыре группы: предщелевой и щелевой блоки, коллиматор, камера.

Основной поляриметрический блок располагается в предщелевой части спектрографа и состоит из анализатора круговой поляризации [Chountonov, 2004], поворотной фазовой пластинки и йодной ячейки. В качестве порядко-разделительных фильтров используется цветное просветленное стекло для работы в синей (СЗС-21) и красной (ЖС-18) области. Щель конструкции Чунтонова

⁶<https://www.sao.ru/hq/lizm/mss/ru/index.html>

[Chountonov, 2004] совмещена с двулучепреломляющим кристаллом и резателем изображения. Фиксированная ширина щели составляет $0.5''$ в проекции на небесную сферу. В качестве диспергирующего элемента используется дифракционная решетка с углом блеска 24.7° . У нее есть два рабочих порядка для того, чтобы регистрировать разные участки длин волн: $4000-4900 \text{ \AA}$ и $5600-9000 \text{ \AA}$. Камера спектрографа имеет оптическую схему Шмидта с кварцевой коррекционной пластиной. С помощью плоского зеркала пучок света выводится из камеры под углом 90° и регистрируется на ПЗС-приемнике.

2.2.2 Анализатор круговой поляризации

Рассмотрим подробнее конструкцию анализатора круговой поляризации. Его схема представлена на рис. 2.2.

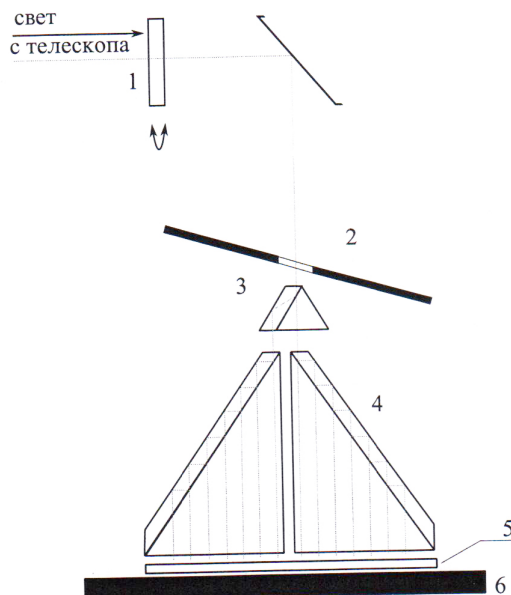


Рисунок 2.2 — Схема анализатора круговой поляризации: 1 - поворотная ахроматическая $\lambda/4$ пластинка, 2 - диафрагма, 3 - синтетический кристалл со свойствами двулучепреломления, 4 - двойной резатель изображения, 5 - щель спектрографа, 6 - основа конструкции блока.

Анализатор состоит из поворотной ахроматической пластинки $\lambda/4$ (1), которая может занимать два положения 0° и 45° , входной диафрагмы размером 5'' (2), дихроичного поляризатора (3) и резателя изображений (4) со щелью спектрографа (5).

Дихроичный поляризатор (3) выполняет важную функцию: разделяет входящее излучение на два луча и позволяет регистрировать обе лево- и правоциркулярные поляризации на одном снимке. Входной поток для дихроичного поляризатора должен иметь линейную поляризацию. Для этого перед ним устанавливается ахроматическая фазовая пластинка $\lambda/4$ (1). После нее круговая поляризация преобразуется в линейную и компоненты $\sigma+$ и $\sigma-$ располагаются перпендикулярно друг другу. Этот свет падает на дихроичный поляризатор (3), который разделяет входящее излучение на два пучка и направляет на резатель изображения (4), который делит пучок на 7 частей и располагает их вдоль щели спектрографа. Таким образом, на выходе мы получаем по 7 спектров каждой циркулярной поляризации. Если после этого повернуть фазовую пластинку (1) так, чтобы эти пучки поменялись местами, то можно учесть инструментальную поляризацию.

2.3 Методика проведения наблюдений и обработки материала

Проведение наблюдений на ОЗСП, как и на любом другом приборе, имеет свои особенности. Одна из них изложена в предыдущей части и касается получения самого материала звезды. Приемная аппаратура (ПЗС-матрица) не является постоянной частью спектрографа. Перед каждым сетом наблюдений ее необходимо устанавливать, что вносит определенные трудности. Во-первых, необходимо каждый раз проводить юстировку прибора и выравнивать матрицу. Выравнивание прибора заключается в том, что необходимо поворачивать матрицу таким образом, чтобы строки матрицы стали параллельны направлению

дисперсии. Идеально эту процедуру провести сложно и каждый раз матрица становится по-разному. Юстировка выравнивает матрицу по оси направления света, чтобы свет падал на чип перпендикулярно, что позволяет равномерно заполнять элементы матрицы. Во-вторых, перед каждым сетом наблюдений необходимо проводить фокусировку камеры спектрографа.

Из-за того, что сам прибор занимает всю стойку Нэсмит-2, он подвержен температурным нестабильностям, которые оказывают большое влияние на качество получаемых изображений, особенно на точность получения лучевых скоростей по этим данным [Klochko et al, 2008]. Чтобы учесть это, каждые полтора или два часа снимаются спектры калибровочной лампы (ThAr спектры). Для анализа лучевых скоростей звезд нужно выбирать ThAr-спектры так, чтобы они были получены сравнительно близко к спектрам исследуемой звезды.

Для проверки точности и знака получаемых значений магнитных полей, дополнительно снимаются спектры звезд-стандартов. Эти стандарты делятся на два типа. Первый - это стандарты магнитного поля. Чаще всего используются звезды, у которых хорошо известны кривые переменности магнитных полей и периоды вращения - 53 Cam, γ Equ, α^2 CVn и т.д. Также некоторые звезды, которые, либо относятся к медленным ротаторам, например, γ Equ, либо повернуты к нам только одним магнитным полюсом, например, 52 Her. Они помогают определить знак магнитного поля. Второй тип стандартов - это звезды с нулевым магнитным полем. Обычно это нормальные яркие объекты спектрального класса F, G (*o* Uma, HD 169161). Они используются для того, чтобы оценивать получаемую величину и ошибку магнитного поля. У этих звезд прибором ОЗСП должно детектироваться нулевое магнитное поле в пределах ошибок.

Телескоп, спектрограф ОЗСП и поляризационная аппаратура готовятся к наблюдениям стандартным образом (проводится проверка всех настроек и фокусировки, снимаются калибровочные кадры на ПЗС-матрице). Рекомендуется открывать забрало купола не менее чем за 1 час до начала наблюдений, для выравнивания температур воздуха подкупольного пространства.

Первичная обработка спектрального материала более подробно описана в Приложении А. Здесь перечислены основные этапы:

- вычитание темнового тока со всех кадров (bias);
- учет рассеянного света;
- привязка к длинам волн;
- экстракция спектров;
- учет гелиоцентрической поправки;
- проведение континуума.

После выполнения всех этих действий будут получено по два нормированных спектра, по одному для каждого компонента круговой поляризации $\sigma+$ и $\sigma-$. Первичная редукция проводится в среде ESO MIDAS с использованием контекста long, написанным Кудрявцевым [Kudryavtsev, 2000].

На ОЗСП выполняются практически все программы наблюдений по изучению магнитных полей звезд разных типов. Наблюдения на этом приборе составляют примерно 15% всего наблюдательного времени.⁷ Одна из самых важных и продолжительных программ - это поиск новых магнитных звезд [Kudryavtsev et al, 2004; Kudryavtsev et al, 2006; Romanyuk et al, 2014a; Romanyuk et al, 2015b; Romanyuk et al, 2016b; Romanyuk et al, 2017; Romanyuk et al, 2018]. В последние годы программа магнитных наблюдений лаборатории "Исследований звездного магнетизма" сместилась в область поисков магнитных полей массивных звезд - членов скоплений разного возраста. В основном, наблюдались звезды в ассоциации Орион OB1 [Romanyuk et al, 2012; Romanyuk et al, 2013; Romanyuk et al, 2014; Romanyuk et al, 2015a; Romanyuk et al, 2015d; Romanyuk et al, 2016a; Romanyuk et al, 2017; Romanyuk et al, 2017; Romanyuk et al, 2019].

Результаты этих наблюдательных программ будут более подробно описаны в следующих Главах 3 и 4.

⁷Процент был высчитан за последние годы с 2014 по 2018 гг. используя данные ежегодных отчетов САО РАН (<https://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/bta/reports/>)

2.4 Выводы

В данной Главе были кратко рассмотрены различные спектрополяриметры, установленные на разных телескопах, продемонстрированы основные результаты, полученные при их помощи. Дополнительную информацию о технических характеристиках, параметрах, эффективности описанных оптоволоконных эшелле-спектрографов можно найти в работе [Panchuk et al, 2011]. Кроме описанных выше, спектрополяриметры имеются и на других телескопах России (2.6-м ЗТШ, на 1-м САО РАН и др.).

Так как весь наблюдательный материал был получен на Основном звездном спектрографе БТА, то методика проведения наблюдений и обработки спектрального материала рассмотрены более подробно. Однородность и стабильность системы магнитных наблюдений САО РАН на протяжении 40 лет и ее соответствие международному уровню позволяет, в частности, выполнять магнитный мониторинг очень медленно вращающихся магнитных звезд (с периодами вращения в десятки лет). На ОЗСП наиболее эффективно выполнять работы по поиску новых магнитных звезд: измерению их лучевых скоростей и фундаментальных параметров. На спектрополяриметрах высокого разрешения достигается точность измерений магнитного поля порядка 10 Гс, а в случае ОЗСП - на порядок хуже (в среднем около 100 Гс). Но этого достаточно, чтобы успешно выполнять программы по поиску новых Ар- и Вр-звезд с сильными магнитными полями.

У ОЗСП есть преимущество перед FORS1 и FORS2, так как он имеет почти на порядок более высокое спектральное разрешение. По материалам FORS можно определить только продольный компонент поля, но никак не фундаментальные параметры магнитных звезд. Конечно, на FORS можно наблюдать звезды на 2 величины более слабые, чем на ОЗСП, что позволяет изучать магнитные звезды в большом количестве в рассеянных скоплениях разного возраста.

Таким образом, используемый наблюдательный материал имеет качество, соответствующее мировому уровню, разработанные и используемые нами методы обработки позволяют проводить высококачественный анализ данных, результаты наблюдений публикуются в ведущих мировых и российских журналах. Это позволяет утверждать, что результаты, получаемые группой исследователей звездного магнетизма САО РАН, по-прежнему находятся в числе важнейшие в актуальном научном направлении.

Глава 3. Магнитные поля выборки химически пекулярных звезд

Магнитные поля играют важную роль в процессах, происходящих во время формирования звезд и при их дальнейшей эволюции. Сейчас достоверно установлено, что около 10-15% звезд спектральных классов А и В обладают сильными глобальными магнитными полями [Romanyuk, 2007; Glagolevskij, 2018]. Магнитные поля Ap/Bp звезд сильнее и стабильнее, а их структура может быть описана в виде комбинаций мультиполей низкого порядка, а в большинстве случаев поле просто принимается дипольным. Поэтому они являются удобными объектами для исследования глобального магнитного поля и его структуры.

В САО РАН исследование магнитных полей звезд ведется с 1977 года. За это время было получено и архивировано более чем 10 тысяч спектров циркулярно-поляризованного излучения для разных типов объектов, но основу составляют химически пекулярные звезды.

Первая работа по результатам анализа магнитных полей большой выборки звезд [Kudryavtsev et al, 2006] вышла в 2006 году. В этой работе представлены результаты анализа 96 кандидатов в магнитные звезды, из которых у 72 впервые были зафиксированы магнитные поля. Также в работе было показано, что используемая методика поиска магнитных звезд в САО РАН является эффективной. После 2006 года основные публикации касались исследований отдельных химически пекулярных звезд. В это же время продолжались длительные магнитные мониторинги интересных объектов и поиск новых магнитных звезд. С одной стороны эти работы не являются завершенными исследованиями. Однако с другой стороны, их результатами могут воспользоваться другие астрономы, которые проводят аналогичные исследования. Поэтому было принято публиковать ежегодные результаты измерений магнитных полей на 6-м телескопе, начиная с данных 2007 года [Romanyuk et al, 2014a]. К настоящему времени вышли из печати результаты измерений магнитных полей химически пекулярных звезд по данным архивных материалов с ОЗСП с 2007 по 2011 гг. [Romanyuk

et al, 2014a; Romanyuk et al, 2015b; Romanyuk et al, 2016b; Romanyuk et al, 2017; Romanyuk et al, 2018].

Спектральный материал, использованный в данной работе, был получен во время основных наблюдательных программ:

1. Магнитные поля массивных звезд - И.И. Романюк.
2. Новые магнитные звезды - Д.О. Кудрявцев.
3. Геометрия магнитных полей звезд - G.A. Wade.
4. Избранные магнитные звезды - Е.А. Семенко.

В диссертации представлены результаты исследования магнитных полей (Глава 3, Приложение Б) и фундаментальных параметров (Глава 4, Приложение Б) большой выборки химически пекулярных звезд по наблюдениям, которые были получены в течение 2009-2011 гг. [Romanyuk et al, 2016b; Romanyuk et al, 2017; Romanyuk et al, 2018]. В частности, в этой Главе будут рассмотрены магнитные поля звезд из выборок двух типов:

1. Химически пекулярные звезды с депрессиями в континууме, которые не входят в состав скоплений (звезды поля).
2. Химически пекулярные звезды из ассоциации Орион OB1.

3.1 Результаты определения эффективных продольных магнитных полей звезд поля

Основной прибор, методика наблюдений и анализа спектрального материала описаны в Главе 2. Подробная редукция данных описана в Приложении А. Магнитные поля измерялись двумя методами: интегральным и дифференциальным, которые более подробно описаны в Главе 1. Для некоторых звезд производилась оценка величины магнитного поля по спектральной линии H_{β} ($B_e(h)$), методика описана в работе [Kudryavtsev et al, 2012]. Для контроля качества получаемых данных магнитные поля оценивались и для звезд стандартов,

которые более подробно описаны в Главе 2. Результаты измерений магнитных полей для всех звезд представлены в Приложении Б. В колонках таблицы указаны: юлианская дата наблюдений JD; отношение сигнал/шум спектров, значения эффективных продольных магнитных полей V_e , полученные разными методами (z – интегральный метод, r – дифференциальный), звездочками * отмечены новые магнитные звезды, которые были открыты в ходе данной работы, символом ⊗ отмечены магнитные или потенциально магнитные объекты, которые были выбраны для дальнейшего анализа (106 звезд).

Наиболее интересные объекты из выборки химически пекулярных звезд (Приложение Б) изучались систематически, в течение ряда лет, с целью построения кривой переменности эффективного продольного магнитного поля V_e с фазой периода вращения.

Так как на данный момент конструкция спектрографа ОЗСП позволяет регистрировать только усредненное по поверхности продольную компоненту магнитного поля V_e , которая меняется с вращением звезды, то необходимо выполнить не менее 2-3-х измерений, чтобы убедиться в его наличии. Чтобы построить кривую переменности эффективного продольного поля с периодом вращения и попытаться провести магнитное моделирование, необходимо не менее 6-10 измерений, которые равномерно распределены по фазе периода. Период следует искать из независимых источников. Чаще всего в настоящее время используются результаты фотометрии с различных спутников (HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007]) или наземных телескопов (ASAS [Pojmanski, 1997]). Поэтому магнитные кривые построены менее чем для 20% всех известных магнитных химически пекулярных звезд [Buchkov et al, 2003].

3.1.1 Химически пекулярные звезды с сильными депрессиями

В Главе 1 было показано, что существует корреляция между величинами магнитного поля и индексами Δa и Z Женевской и Венской фотометрии [Cramer, Maeder, 1980; North, Cramer, 1984]. В работе [Kudryavtsev et al, 2006] было найдено, что все химически пекулярные звезды, у которых индексы превышают 0.035 (3%) звездной величины, имеют магнитное поле. При этом показано, что четкой корреляции между величинами поля и депрессиями не наблюдается. Поэтому заменять прямые спектральные измерения на результаты анализа депрессий не следует. Этот метод хорошо себя зарекомендовал: было открыто около 150 магнитных звезд. В результате этой масштабной работы было выделено новое направление исследования – изучение магнитных звезд с большими депрессиями в континууме [Kudryavtsev et al, 2008].

В настоящей диссертации детально рассматриваются две химически пекулярные звезды с сильными депрессиями (5%) HD 5601 и HD 19712. Оценки магнитного поля обеих звезд были впервые опубликованы в работе [Kudryavtsev et al, 2006].

HD 5601

HD 5601 – Ар-звезда с усиленными линиями кремния. Величина депрессии следующая: $\Delta a = 0.049$, $Z = -0.052$ [Kudryavtsev et al, 2006]. Исходя из корреляции, значение поверхностного магнитного поля $B_s \sim 3$ кГс.

Звезда достаточно близкая – $\pi = 3.58$ mas [Gaia Collaboration, 2016], располагается высоко над плоскостью диска Галактики ($b = -73^\circ$), что позволяет пренебречь инфракрасным избытком. Авторы работы [Hensberge et al, 1981] нашли фотометрический период вращения звезды $P = 1.110$ суток. Глаголев-

ский [Glagolevskij, 2008] определил ее эффективную температуру $T_{eff} = 9850$ К. В каталоге [Renson, Manfroid, 2009] она обозначается как A0 Si.

При помощи спектрографа ОЗСП было получено восемь спектров циркулярно-поляризованного излучения звезды. Результаты измерений продольной компоненты магнитного поля приведены в Таблице 2. В ее колонках: HJD – гелиоцентрическая юлианская дата, $B_e(z)$ – измерения методом центра тяжести (интегральный метод), $B_e(r)$ – методом регрессии (дифференциальный метод), V_R – лучевая скорость звезды. Результаты первых трех ночей наблюдений опубликованы в работе [Kudryavtsev et al, 2006].

Таблица 2 – Результаты измерения магнитного поля B_e и лучевой скорости V_R для HD 5601.

HJD (2450000+)	$B_e \pm \sigma$, Гс	S/N	V_R , км с ⁻¹
3274.371	-340 ± 100 (z)	220	+12.3 ± 2.3
3275.375	-380 ± 100 (z)	220	+11.5 ± 3.4
3278.429	-2000 ± 100 (z)	260	+9.8 ± 4.0
6172.454	-1680 ± 70 (z)	180	+17.0 ± 2.3
	-1340 ± 60 (r)		
6500.542	-1750 ± 60 (z)	200	+18.4 ± 1.9
	-1560 ± 40 (r)		
7288.454	-460 ± 60 (z)	200	+16.1 ± 1.3
	-380 ± 40 (r)		
7289.431	-1050 ± 70 (z)	200	+17.1 ± 2.1
	-800 ± 40 (r)		
7355.227	-580 ± 60 (z)	210	+15.7 ± 2.1
	-630 ± 30 (r)		

Период $P = 1.11$ суток не подходит для описания магнитной переменности звезды. Поэтому для его оценки использовались фотометрические данные со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007]. По построенным периодограммам наиболее подходящий период $P = 1.756$ суток хорошо описывает как фотометрическую переменность, так и изменения продольной компоненты магнитного поля (см. рис. 3.1, 3.2).

Лучевые скорости, полученные в период с 2013 г. по 2015 г., отличаются от тех, что были опубликованы в 2004 году. Литературных данных по лучевым скоростям не найдено. На основе измерений из таблицы 2 и из работы [Kudryavtsev

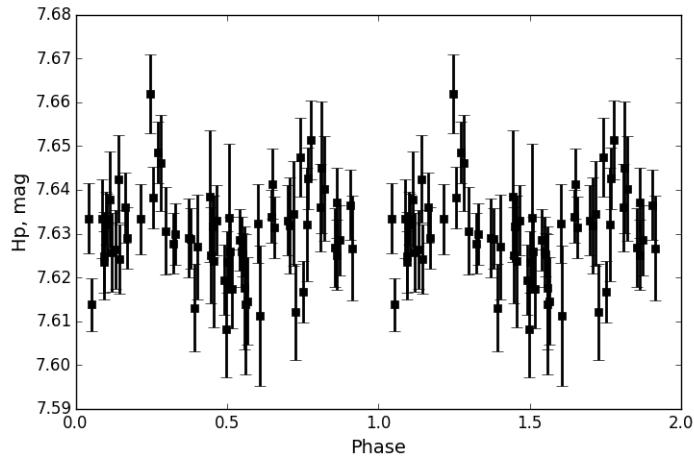


Рисунок 3.1 — Кривая блеска видимой звездной величины H_r для звезды HD 5601, построенная с периодом $P = 1.756$ суток.

et al, 2006] можно сделать вывод, что звезда относится к двойной системе с орбитальным периодом в несколько десятков лет, что характерно для двойных систем, в состав которых входят магнитные звезды [Semenko et al, 2011].

Для данной звезды была предпринята попытка магнитного моделирования звезды. Для этого путем подбора параметров i , β и V_p была построена сетка расчетных кривых V_e , из которых методом наименьших квадратов была выбрана нужная с параметрами $i = 20^\circ$, $\beta = 116^\circ$ и $V_p = 10$ кГц. Так как угол i мал, то в геометрии звезды преимущественно наблюдается один из магнитных полюсов.

Сравнение рис. 3.1, 3.2 показывает, что максимумы блеска фотометрической переменности совпадают с экстремумами кривой изменения магнитного поля. Это говорит о том, что магнитные полюса разогреты по сравнению с экваториальными областями.

Для данной звезды были найдены фундаментальные параметры. Процедура поиска параметров подробно описана в следующей Главе 4. С помощью методов определения эффективной температуры и ускорения силы тяжести были получены значения $T_{eff} = 10300 \pm 350$ К, $\log g = 3.7 \pm 0.3$. Остальные параметры следующие: $\log (L/L_\odot) = 1.8 \pm 0.3$, $M/M_\odot = 2.3 \pm 0.6$, $R/R_\odot = 2.7 \pm 0.4$. Благодаря использованию эволюционных треков [Girardi et al, 2000] было найдено значение возраста: $\log t = 8.6$ (см. рис. 3.6).

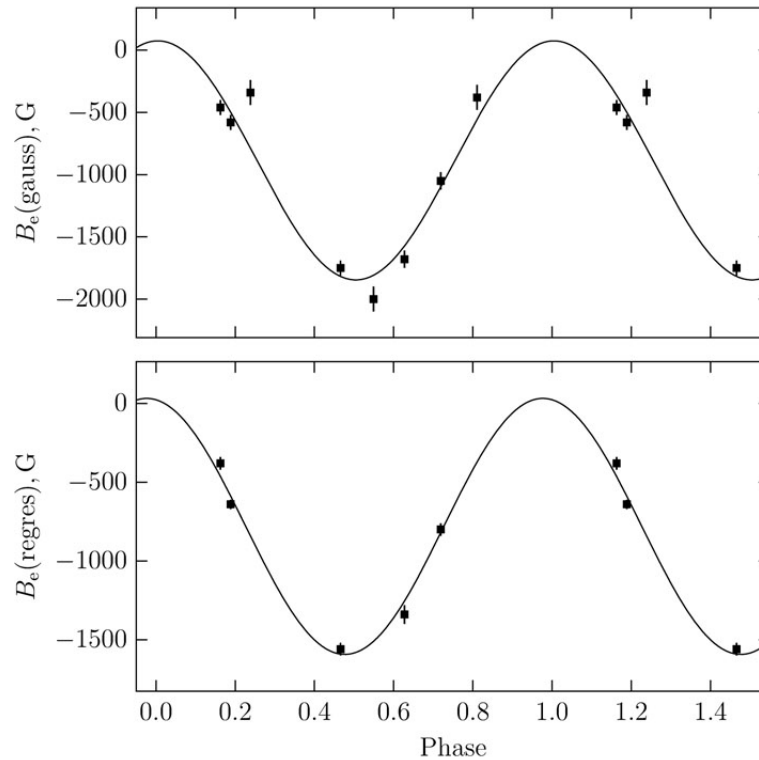


Рисунок 3.2 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 5601, построенная с периодом $P = 1.756$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).

По спектрам звезды была оценена проекция скорости вращения $v_e \sin i = 21$ км с⁻¹. Низкая скорость вращения позволяет получить высокую точность измерения магнитного поля. Найденная величина скорости вращения находится на пределе разрешения спектров, полученных на ОЗСП. Поэтому, реальная величина может быть меньше полученной. По формуле (4.3) было рассчитано значение экваториальной скорости звезды: $v_e = 77$ км с⁻¹.

С использованием метода моделей атмосфер была проведена оценка химического содержания элементов (таблица 3). Но эта она лишь предварительная, для более точного определения надо использовать спектры с высоким разрешением.

Таблица 3 — Содержание химических элементов в атмосфере звезды HD 5601.

Элемент	$\log \frac{N}{N_{total}} : (\sigma)$	$\log \left(\frac{N}{N_{total}} \right)_{\odot}$	n
He	-1.80:	-1.11	1
C	-3.32 (0.24)	-3.52	5
O	-3.63 (0.33)	-3.21	4
Mg	-4.41 (0.33)	-4.46	4
Si	-2.85 (0.25)	-4.49	7
Ti	-6.50 (0.28)	-7.02	21
Cr	-4.66 (0.23)	-6.37	31
Mn	-4.83 (0.23)	-6.65	17
Fe	-3.47 (0.18)	-4.54	68
Co	-4.57 (0.33)	-7.12	3
Ni	-4.20 (0.24)	-5.79	4
Pr	-7.21 (0.31)	-11.33	5
Nd	-8.15 (0.33)	-10.54	10
Sm	-7.10 (0.41)	-11.03	6

HD 19712

HD 19712 – звезда спектрального класса A0 CrEu [Renson, Manfroid, 2009]. Величина депрессии следующая: $\Delta a = 0.043$, $Z = -0.050$ [Kudryavtsev et al, 2006].

В 1994 году в работе [Martinez et al, 1994] указано, что данная звезда имеет пульсации с периодом $\Delta t = 1.05^h$. В работе [Joshi et al, 2009] период был уточнен $\Delta t = 1.58^h$, и звезда была отнесена к типу δ Sct.

Впервые магнитное поле звезды было зафиксировано на БТА в 2004 г. [Kudryavtsev et al, 2004]. Всего было получено 16 спектров циркулярно-поляризованного излучения. Профили спектральных линий уширены вращением звезды $v_e \sin i = 44.7 \pm 3.0$ км с⁻¹ и сильно блендированы, что повлияло на результаты измерения магнитного поля, которые приведены в таблице 4. В колонках таблицы: HJD – гелиоцентрическая юлианская дата, S/N – отношение сигнал/шум спектров, $V_e(z)$ – измерения методом центра тяжести (интегральный метод), $V_e(r)$ – методом регрессии (дифференциальный метод), V_R – лучевая скорость звезды.

Таблица 4 — Результаты измерений магнитного поля B_e и лучевой скорости V_R для HD 19712.

HJD (2450000+)	S/N	$B_e(r) \pm \sigma$, Гс	$B_e(z) \pm \sigma$, Гс	$V_R \pm \sigma$, км с ⁻¹
3273.410	300	2109 ± 120	1766 ± 182	18.9 ± 3.6
3274.396	300	-1951 ± 122	-1709 ± 186	19.2 ± 3.2
3275.393	220	1638 ± 131	2494 ± 397	18.7 ± 3.9
3362.277	170	-703 ± 77	-691 ± 143	16.7 ± 3.0
3363.254	220	-1124 ± 70	-1438 ± 181	21.2 ± 3.3
3364.264	220	64 ± 19	90 ± 50	—
3365.192	300	-1313 ± 41	-1174 ± 104	18.1 ± 2.6
3395.241	300	206 ± 84	189 ± 222	21.4 ± 3.3
4015.512	200	1570 ± 169	1433 ± 187	23.3 ± 4.1
5075.559	200	-1386 ± 83	-1261 ± 111	18.3 ± 3.2
6644.362	230	890 ± 32	886 ± 84	22.2 ± 3.3
6645.320	210	1070 ± 70	864 ± 135	21.9 ± 2.5
6970.330	200	471 ± 93	528 ± 147	22.2 ± 3.1
6970.357	230	467 ± 101	544 ± 168	22.4 ± 3.9
6973.315	210	1079 ± 82	886 ± 118	21.3 ± 3.5
7415.128	200	390 ± 82	603 ± 211	21.8 ± 2.6

Результаты определения фундаментальных параметров звезды представлены в Приложении Б: $T_{eff} = 10200 \pm 350$ К, $\log g = 4.0 \pm 0.4$, $\log (L/L_\odot) = 1.4 \pm 0.4$, $M/M_\odot = 2.5 \pm 0.6$, $R/R_\odot = 2.6 \pm 0.7$. Используя эволюционные треки из работы [Girardi et al, 2000], было найдено значение возраста: $\log t = 8.3$ (рис. 3.6).

Как видно из таблицы 4, лучевая скорость переменна: максимальный разброс $\Delta V_R = 6.6$ км с⁻¹, что в два раза превышает ошибку определения. Подобный результат получили и авторы работы [Kudryavtsev et al, 2006]. Они считают, что данная звезда входит в состав двойной системы с большим орбитальным периодом порядка нескольких лет или десятилетий.

Для определения периода вращения использовались фотометрические данные со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007]. По построенным периодограммам был найден наиболее подходящий период $P = 2.2042$ суток. Фазовая кривая видимой звездной величины и магнитных измерений с этим периодом представлена на рис.3.3, 3.4.

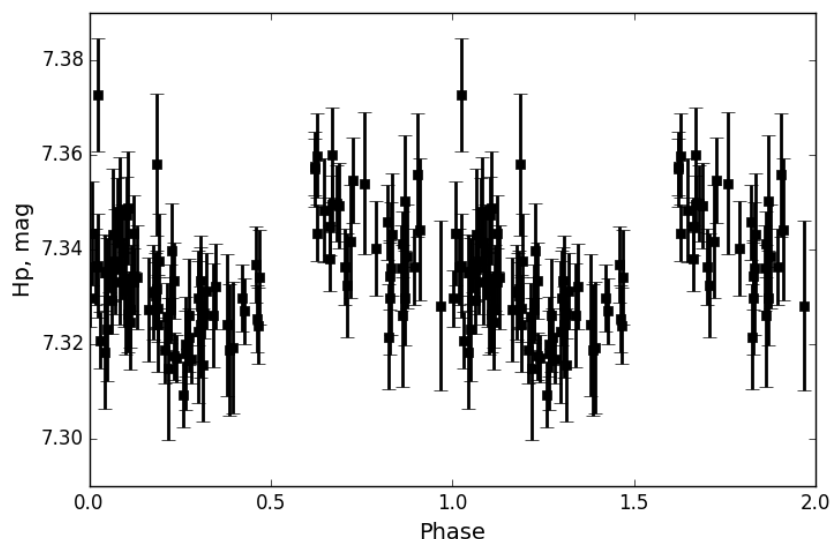


Рисунок 3.3 — Кривая блеска видимой звездной величины H_p для звезды HD 19712, построенная с периодом $P = 2.2042$ суток.

На рис. 3.3, 3.4 можно заметить, что максимум блеска видимой звездной величины совпадает с отрицательным экстремумом магнитного поля.

Зная период вращения звезды и радиус, по формуле (4.3) можно определить угол наклона оси вращения звезды i и экваториальную скорость вращения: $i = 55^\circ$, $v_e = 60 \text{ км с}^{-1}$. По результатам магнитного моделирования наилучшее соответствие между наблюдаемой и теоретическими кривыми переменности магнитного поля достигается при значении параметров $i = 55^\circ$, $\beta = 75^\circ$. Структура магнитного поля представлена центральным диполем со значением поля на полюсе звезды $B_p = 12000 \text{ Гс}$.

Так как линии звезды сильно блендированы, то оценка химического состава представляет собой сложную задачу. В общем можно сказать, что содержание элементов типично для Ap-звезд (см. таблица 5).

Исходя из фундаментальных параметров и анализа магнитного поля звезды, можно сделать вывод, что она не является пульсирующей типа $\delta \text{ Sct}$, а является типичным представителем холодной химически пекулярной Ap-звездой.

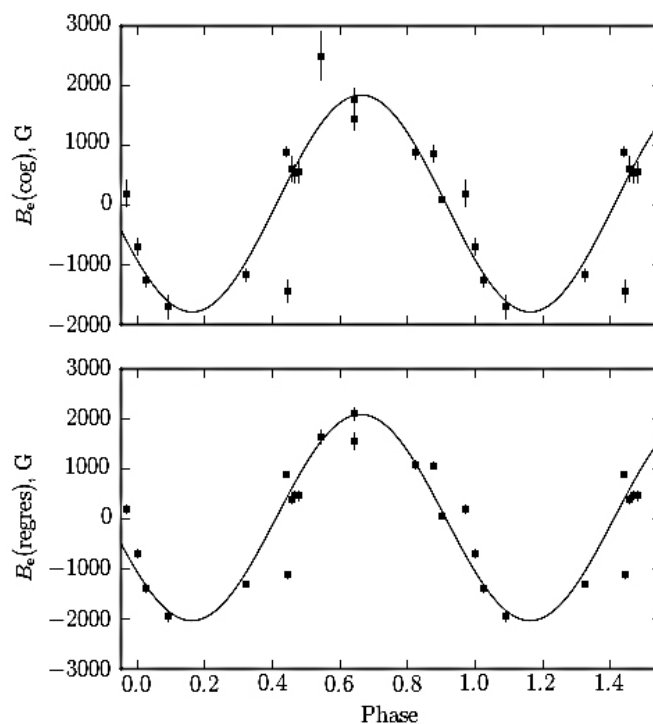


Рисунок 3.4 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 19712, построенная с периодом $P = 2.2042$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).

Сравнение параметров звезд с сильными депрессиями

С 2006 г. по 2018 г. для двух звезд с сильными депрессиями HD 5601 и HD 19712 было накоплено достаточное количество спектрального материала для проведения детального анализа: изучения магнитных свойств, определения фундаментальных параметров, проекций скоростей вращения и лучевых скоростей, первичной оценки химического содержания элементов. К настоящему времени известны параметры и магнитные свойства четырех подобных звезд. Полученные физические параметры и спектральный материал для звезд HD 5601 и HD 19712 дополняют этот список.

Таблица 5 — Содержание химических элементов в атмосфере звезды HD 19712.

Элемент	$\log \frac{N}{N_{total}} : (\sigma)$	$\log(\frac{N}{N_{total}})_{\odot}$	n
He	-1.60:	-1.11	2
C	-3.41 (0.14)	-3.52	8
O	-3.36 (0.38)	-3.21	6
Mg	-4.71 (0.28)	-4.46	12
Si	-4.60 (0.25)	-4.49	12
Ti	-5.37 (0.38)	-7.02	27
Cr	-4.15 (0.24)	-6.37	41
Mn	-4.64 (0.27)	-6.65	21
Fe	-3.38 (0.18)	-4.54	147
Ni	-4.45 (0.30)	-5.79	19
Y	-7.65 (0.32)	-9.80	9
Pr	-7.33 (0.27)	-11.33	8
Nd	-7.78 (0.45)	-10.54	11
Sm	-7.40 (0.47)	-11.03	11

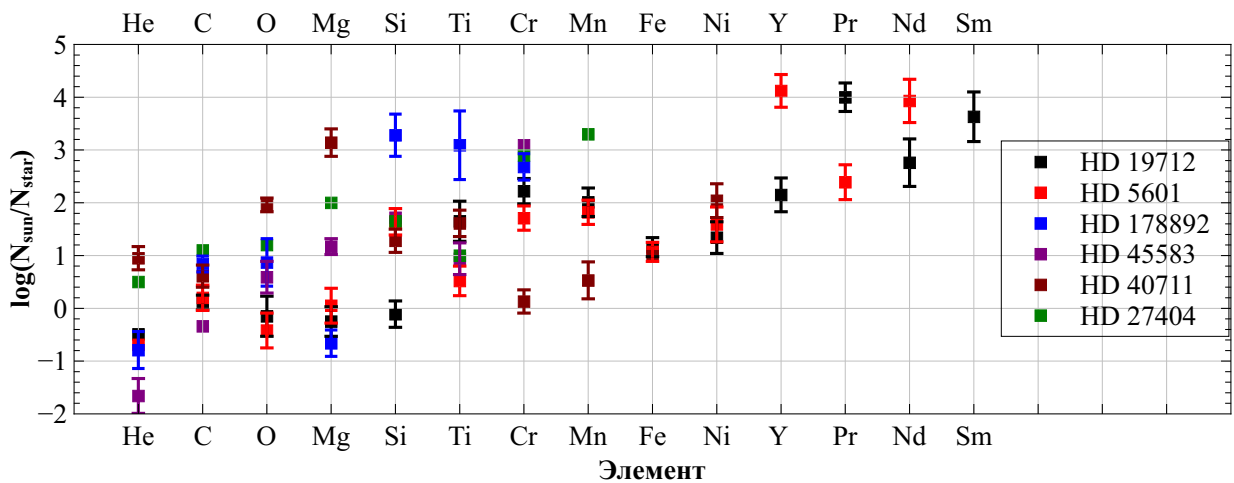


Рисунок 3.5 — Химическое содержание элементов относительно солнечного для звезд сравнения и исследуемых звезд HD 5601, HD 19712.

Таблица 6 — Фундаментальные параметры звезд с сильными депрессиями.

Параметр	HD 40711	HD 45583	HD 178892	HD 27404	HD 5601	HD 19712
$\Delta a / Z$	0.043/-0.043	0.067/-0.059	-/-	-/-0.052	0.049/-0.052	0.043/-0.050
$B_e(\text{max}) / B_e(\text{min}), \text{Гс}$	-650/+330	-2200/+3500	+2000/+7700	-2400/+1300	0/-1700	+2000/-2000
$B_p, \text{кГс}$	—	—	23	7.5	10	12
π, mas	2.66 ± 0.95	3.06	4.02	5.99	3.58	6.08
$T_{eff}, \text{К}$	8900 ± 150	13000	7700	11300	10300 ± 350	10200 ± 350
$\log g$	3.4 ± 0.1	4.0	4.0 ± 0.2	3.9	3.7 ± 0.3	4.0 ± 0.4
$v_e \sin i, \text{км с}^{-1}$	7	70	9	37	<20	44.7 ± 3.0
$\log (L/L_\odot)$	1.75 ± 0.20	2.38	1.5	1.9	1.8 ± 0.3	1.4 ± 0.4
M, M_\odot	2.5	2.9	2.3	2.8	2.3 ± 0.6	2.5 ± 0.6
R, R_\odot	—	5.0	2.2	3.1	2.7 ± 0.4	2.6 ± 0.7
Период P, дни	—	1.177	8.2478	2.779	1.756	2.2042
$\log t$	8.8	8.2	9.0	8.3	8.6	8.3

Сведения о параметрах и о химическом содержании элементов у рассматриваемых звезд приведены в таблицах 6, 7. На рис. 3.5 представлено графическое сравнение химического состава относительно солнечного для исследуемых звезд и звезд сравнения. Литературные данные для: HD 27404 [Semenko et al, 2017], HD 40711 [Semenko et al, 2008], HD 45583 [Semenko et al, 2008], HD 178892 [Ryabchikova et al, 2006].

Таблица 7 — Содержание химических элементов в атмосферах звезд с сильными депрессиями. Содержание дано в единицах $\log \frac{N}{N_{total}}$.

Элемент	Sun	HD 40711	HD 45583	HD 178892	HD 27404
He	-1.11	–	-2.77 (0.33)	–	–
C	-3.52	–	–	–	–
O	-3.21	–	–	–	–
Mg	-4.46	-5.25 (0.35)	-4.80:	-3.51 (0.22)	-3.96:
Si	-4.49	-3.65 (0.15)	-3.90 (0.30)	-3.88 (0.21)	-3.39:
Ti	-7.02	–	-5.85(0.15)	-5.06 (0.13)	-5.82:
Cr	-6.37	-5.50 (0.45)	-4.65:	-3.23 (0.26)	-4.37:
Mn	-6.65	–	–	-5.37 (0.22)	-5.00:
Fe	-4.54	-5.20 (0.25)	-3.60 (0.30)	-2.93 (0.25)	-3.54:
Ni	-5.79	–	–	-5.66 (0.22)	–
Y	-9.80	–	–	-9.27 (0.35)	–
Pr	-11.33	-8.05 (0.40)	–	-10.34:	-8.43:
Nd	-10.54	-7.45 (0.65)	-7.45:	-8.50 (0.32)	-7.24:
Sm	-11.03	-8.35 (0.25)	–	–	–

Для определения возраста были использованы эволюционные треки из работы [Girardi et al, 2000]. Зная параметры T_{eff} , $\log(L/L_{\odot})$ звезды, можно указать их положение на диаграмме Герцшпрунга-Рассела (рис. 3.6) Бары ошибок соответствуют точности определения параметров эффективной температуры и светимости (см. Глава 4).

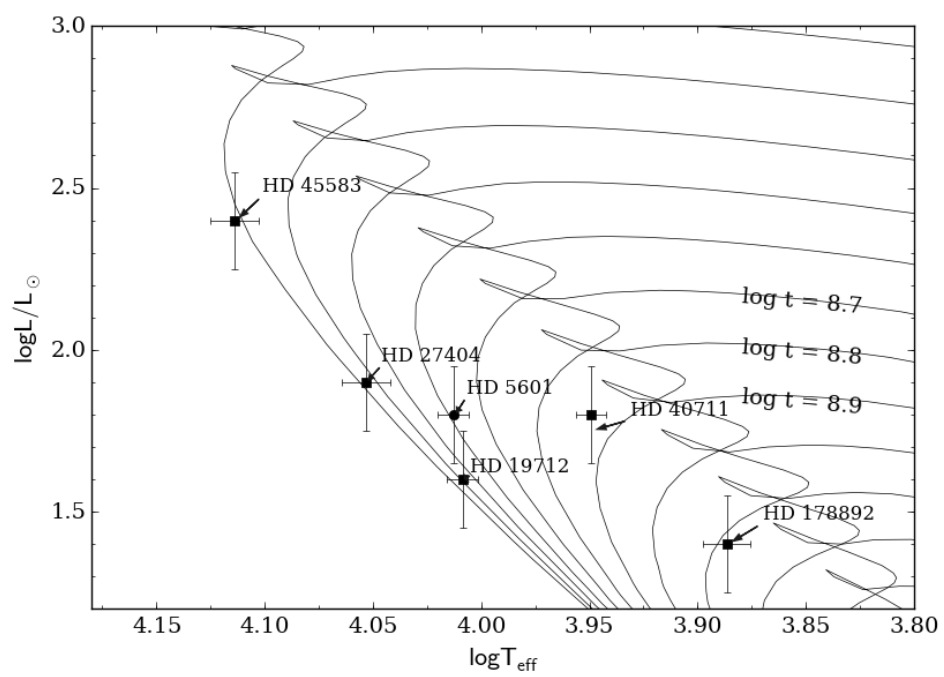


Рисунок 3.6 — Диаграмма Герцшпрунга-Рассела для звезд с сильными депрессиями.

3.1.2 Резюме

Таким образом, был выполнен детальный анализ двух химически пекулярных звезд с большими депрессиями в континууме (5%). С использованием фотометрических данных спутника HIPPARCOS и магнитных измерений с ОЗСП, были найдены периоды вращения звезд. Построены магнитные модели для обеих звезд. Поля на полюсах диполей B_p составляют 10 кГс у HD 5601 и 12 кГс у HD 19712. Поля имеют дипольную структуру, но угол наклона оси диполя к оси вращения у них отличается мало: $\beta = 116^\circ$ ($180^\circ - 116^\circ = 64^\circ$) у HD 5601; $\beta = 75^\circ$ у HD 19712, а угол наклона оси вращения: $i = 20^\circ$ у HD 5601; $i = 55^\circ$ у HD 19712. Экваториальная скорость двух звезд практически одинакова: $v_e = 77 \text{ км с}^{-1}$ у HD 5601; $v_e = 60 \text{ км с}^{-1}$ у HD 19712. Также звезды имеют одинаковые фундаментальные параметры и возраст.

Единственное существенное отличие – это химический состав. У звезды HD 5601 наблюдается дефицит гелия на порядок; углерод, кислород, магний имеют солнечное содержание; титан, железо, никель усилены на порядок; кремний, хром, марганец усилены на 2 порядка; кобальт и редкоземельные элементы усилены на три порядка. У звезды HD 19712 гелий занижен на пол порядка; углерод, кислород, магний, кремний имеют солнечное содержание; хром и марганец усилены в 1.5 раза; железо и никель усилен на порядок; редкоземельные элементы усилены на 2-4 порядка.

Таким образом, можно сделать вывод, что, несмотря на практически одинаковые физические параметры звезд, наблюдается совершенно разные аномалии химического состава этих звезд. Нельзя исключать, что на химические аномалии может влиять и пространственное положение звезд: HD5601 (галактические координаты: $l = 128^\circ$, $b = -73^\circ$, расстояние $d = 270 \text{ пк}$); HD 19712 (галактические координаты: $l = 181^\circ$, $b = -48^\circ$, расстояние $d = 160 \text{ пк}$).

При сравнении исследуемых звезд с другими изученными объектами с сильными депрессиями не было выявлено зависимостей. Анализируя таблицы

6, 7, можно сделать вывод, что параметры звезд с сильными депрессиями в целом различны: среди них встречаются как горячие представители (HD 45583), так и холодные (HD 178892); быстрые ротаторы (HD 45583), умеренные (HD 19712, HD 27404), медленные (HD 178892, HD 40711). Магнитные поля у объектов также различны. Периоды вращения в целом схожи, кроме звезды HD 178892. Химическое содержание элементов также различается (таблица 7, рис. 3.5): особо сильное отличие видно в содержании магния, кремния, титана, хрома и марганца. В целом же химический состав типичен для Ap/Bp звезд [Любимков, 1995]. Исходя из положения звезд на диаграмме (рис. 3.6), можно сделать вывод: все исследуемые объекты принадлежат Главной последовательности; они имеют различное положение – есть массивный горячий молодой объект HD 45583, звезды средних масс примерно одинакового возраста HD 19712, HD 5601, HD 27404, HD 40711, и маломассивный старый объект HD 178892. Отсюда следует вывод в том, что пока не наблюдается корреляции в расположении звезд с сильными депрессиями на диаграмме ГР.

3.2 Химически пекулярные звезды ассоциации Орион OB1

Проблема происхождения и эволюции магнитных звезд не теряет актуальности и имеется много нерешенных вопросов, которые наиболее подробно рассмотрены в Главе 1. Решение этих проблем заключается в проведении наблюдательных проверок механизмов образования и эволюции магнитных полей химически пекулярных звезд. Для того чтобы изучить зависимость величины магнитного поля от возраста, наиболее выгодно выбирать рассеянные скопления разного возраста, которые близки к нам и лежат выше галактической плоскости. Дальнейший анализ результатов этих наблюдений покажет – имеется ли систематическое уменьшение поля с возрастом, как этого требует реликтовая теория или таких закономерностей нет.

В качестве первоочередной группировки для наблюдений была выбрана ассоциация Орион OB1. Была сформулирована программа наблюдений на 6-м телескопе БТА [Romanyuk et al, 2012; Romanyuk et al, 2013; Romanyuk et al, 2014], которая была выполнена за период 2013-2018 гг. Задачей являлось детальное изучение магнитных полей массивных В-звезд с аномалиями химического состава (Вр-звезды).

3.2.1 Обзор литературных данных об ассоциации Орион OB1

Ассоциация Орион OB1 лежит ниже галактической плоскости, поэтому среднее межзвездное поглощение звезд невелико: $A_V = 0.^m3$, и $E(B - V) = 0.^m06$ [Klochkova, 1985]. Находится ассоциация на значительном расстоянии – 400 пк.

Самое сложное при изучении звезд в ассоциациях или скоплениях – определение их принадлежности к ним. Звезды выделяются по собственному движению, лучевой скорости и модулю расстояния. Первая попытка определения принадлежности звезд в ассоциации Орион OB1 принадлежит Уоррену и Хессеру [Warren et al, 1977], где авторы привели список, состоящий из 526 звезд. Они проделали огромную работу: получили сведения по астрометрии, фотометрии и спектроскопии. Была выявлена вероятность принадлежности каждой звезды к ассоциации. Уорресс и Хессер, а затем и Блаау [Blaauw, 1964] разделили ассоциацию Орион OB1 на четыре части: подгруппы А, В, С и D (см. рис. 3.7). Наиболее современное представление о принадлежности звезд к подгруппам и ассоциации Орион OB1 представлено в работе [Brown et al, 1994]. Браун и др. выявили 814 звезд – установленных и заподозренных членов ассоциации. Для всех объектов при помощи моделей Куруца авторы определили эффективные температуры, ускорения силы тяжести, светимости, массы [Brown et al, 1994a].

На данный момент это наиболее полный и надежный список объектов из членов ассоциации Орион OB1.

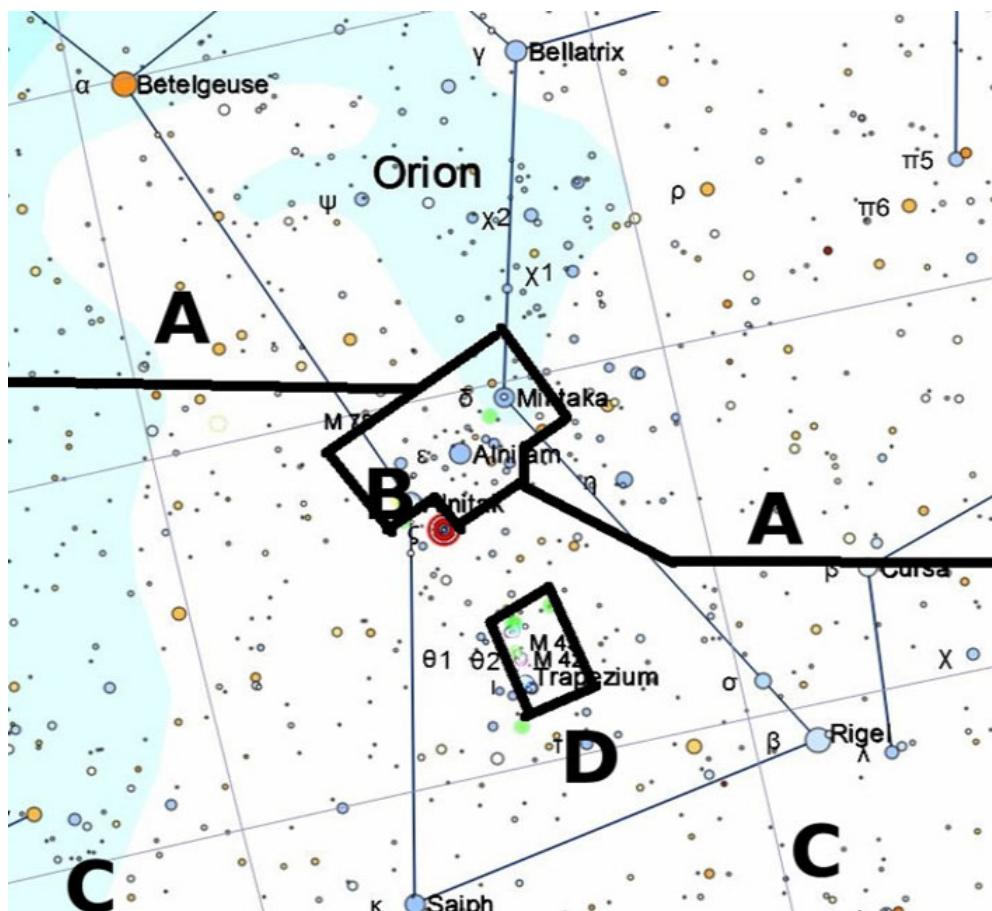


Рисунок 3.7 — Ассоциация Орион OB1. Пространственное распределение подгрупп A, B, C, D.

Пространственное распределение подгрупп в ассоциации следующее: подгруппа A относится к северной части ассоциации; подгруппа B – пояс созвездия Ориона; подгруппа C – область южнее пояса; подгруппа D – очень компактная область в центральной части ассоциации. Она связана с Туманностью Ориона, звездами Трапеции и Южным молекулярным облаком. Поэтому для подгруппы D характерно значительное межзвездное поглощение.

Проблему принадлежности звезд к ассоциации Орион OB1 можно решить, изучая параллаксы. Комплексное измерение данного параметра для всех членов ассоциации проделано спутником HIPPARCOS, публикации результатов которого были начаты в 1991 г. Так как расстояние до ассоциации в среднем составляет 400 пк, то точные измерения параллаксов с этого спутника были невозможны.

Ревизия этих данных, которая была проведена в 2007 году, не дала существенных улучшений для ассоциации Орион OB1. Поэтому параллаксы спутника HIPPARCOS, в большинстве случаев, не могли быть использованы в качестве критерия принадлежности той или иной звезды к ассоциации. В настоящее время эту проблему решают измерения параллаксов спутником GAIA, публикации которых начались в 2018 г. С их помощью можно будет надежно установить расстояния до объектов и проверить список звезд из работы [Brown et al, 1994a] на предмет принадлежности каждой из них к ассоциации. Но это предмет будущих исследований.

Одним из первых систематическое спектральное изучение химически peculiarных звезд в группировках разного возраста было проведено на 6-м телескопе под руководством И.М. Копылова. В рамках этой программы автором работы [Klochkova, 1985] была выполнена спектроскопия 24 химически peculiarных звезд из ассоциации Орион OB1, в результате которой были определены модули расстояния и возрасты подгрупп. Также были определены угловые размеры подгрупп и спектральные классы самых горячих звезд в подгруппах. Аналогичная работа была проведена в работе [Brown et al, 1994]. Сравнительные характеристики некоторых параметров представлены в Таблице 8.

Таблица 8 — Оценки параметров из работы Клочковой [Klochkova, 1985] и Брауна [Brown et al, 1994]. ([Klochkova, 1985]/ [Brown et al, 1994])

Подгруппа	Возраст, $\log t$	Угловой и пространственный размер, $^{\circ}/\text{пк}$	Самая горячая звезда, спектральный класс
A	7.3/7.1	6.0/50	B0.5
B	6.7/6.2	2.5/25	O9
C	6.4/ 6.7	1.9/15	O9
D	6.7/<6.0	0.2/2	O6

3.2.2 Выбор объектов для исследования

Цель работы по исследованию ассоциации Орион OB1 – собрать полную выборку химически пекулярных звезд в ней, а затем измерить их магнитные поля на 6-м телескопе. В качестве основы для выполнения этой работы был взят список 814 объектов звездного населения ассоциации, представленный в работе [Brown et al, 1994]. Хотя прошло более 25 лет с момента публикации этой статьи, позже других работ опубликовано не было.

Выбор и анализ химически пекулярных звезд в ассоциации подробно рассматривается в работах [Romanyuk et al, 2012; Romanyuk et al, 2013; Romanyuk et al, 2014]. В работе [Romanyuk et al, 2013] была произведена выборка химически пекулярных звезд из 814 членов ассоциации. Критерием того, что звезда является пекулярной, было ее наличие в каталоге [Renson, Manfroid, 2009]. В итоге на основании работ [Brown et al, 1994a] и [Renson, Manfroid, 2009], было выделено 85 химически пекулярных звезд. Основная часть из них: 59 звезд – это В_r-звезды, остальные 23 объекта – это А_m-звезды и 3 А_p-звезды. А_m-звезды были исключены из выборки, так как в работе [Romanyuk et al, 2013] было показано, что это звезды переднего плана, которые находятся на луче зрения. Из оставшихся 62 звезд, исходя из каталога [Renson, Manfroid, 2009], 27 звезд относятся к типу He-weak, 7 звезд к типу He-strong, 19 звезд к типу Si, Si⁺ и для 9 звезд класс пекулярности неизвестен. Пространственное распределение звезд можно найти в работе [Romanyuk et al, 2013].

Для 6-м телескопа была составлена программа наблюдений на ОЗСП (Магнитные поля массивных звезд - И.И. Романюк). Список объектов насчитывал все 62 потенциально магнитные звезды ассоциации. Так как почти все из них являются массивными В-звездами, для которых характерно быстрое вращение, то спектральные линии у них сильно уширены, и тогда умеренного разрешения ОЗСП ($R = 15000$) вполне достаточно для измерений магнитных полей и

фундаментальных параметров. Систематические наблюдения объектов по этой программе начались в 2013 году.

3.2.3 Магнитные поля химически пекулярных звезд ассоциации

Впервые поиск магнитных полей в ассоциации Орион OB1 начали авторы работы [Vogra et al, 1979]. Наблюдения проводились на бальмеровском магнитометре, оснащённом узкополосным интерференционным фильтром, который позволял измерять круговую поляризацию в ядре линии H_{β} . Подобная фотографическая регистрация спектров круговой поляризации В-звезд, имеющих малое количество линии, не позволяла анализировать их магнитные поля из-за низкой точности, но давало возможность в первом приближении оценить принадлежность звезды к магнитным. Таким образом, этой группой было обнаружено примерно 20 магнитных химически пекулярных звезд.

Тотальных спектральных измерений всех химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1 до настоящего момента не проводилось. Эта работа была выполнена на 6-м телескопе БТА. Современные методы регистрации с использованием ПЗС-матриц в качестве светоприемников позволяют проводить исследование поляризации, как в линиях металлов, так и в спектральных линиях водорода. В результате, в период с 2013 г. по 2018 г. были получены спектральные данные для 60 химически пекулярных звезд в области спектра от 4450 \AA до 4950 \AA . Этот диапазон особенно удобен для горячих звезд, у которых спектральные линии сильно уширены вращением. Он охватывает спектральную линию H_{β} , основные линии гелия ($\lambda = 4471 \text{ \AA}$ и $\lambda = 4713 \text{ \AA}$), магния $\lambda = 4481 \text{ \AA}$, линии других химических элементов.

В работе [Romanyuk et al, 2017] были представлены первичные результаты проделанной работы:

- выделенные 59 Вр-звезды составляют 13.4% от общего количества В-звезд, что в два раза превышает аналогичную долю для пекулярных А-звезд;
- выделенные группировки Ap/Am звезд и Вр-звезд в ассоциации пространственно не перекрываются;
- в ассоциации насчитывается 22 магнитные звезды, из которых 21 Вр-звезда и 1 Ap, 17 Вр-звезд – это звезды с аномальными линиями гелия.

В работе Романюка и др. [Romanyuk et al, 2017] приводится исследование магнитных полей этих звезд. Было найдено 9 новых магнитных звезд в дополнение к 20 ранее известным (см. рис. 3.8).

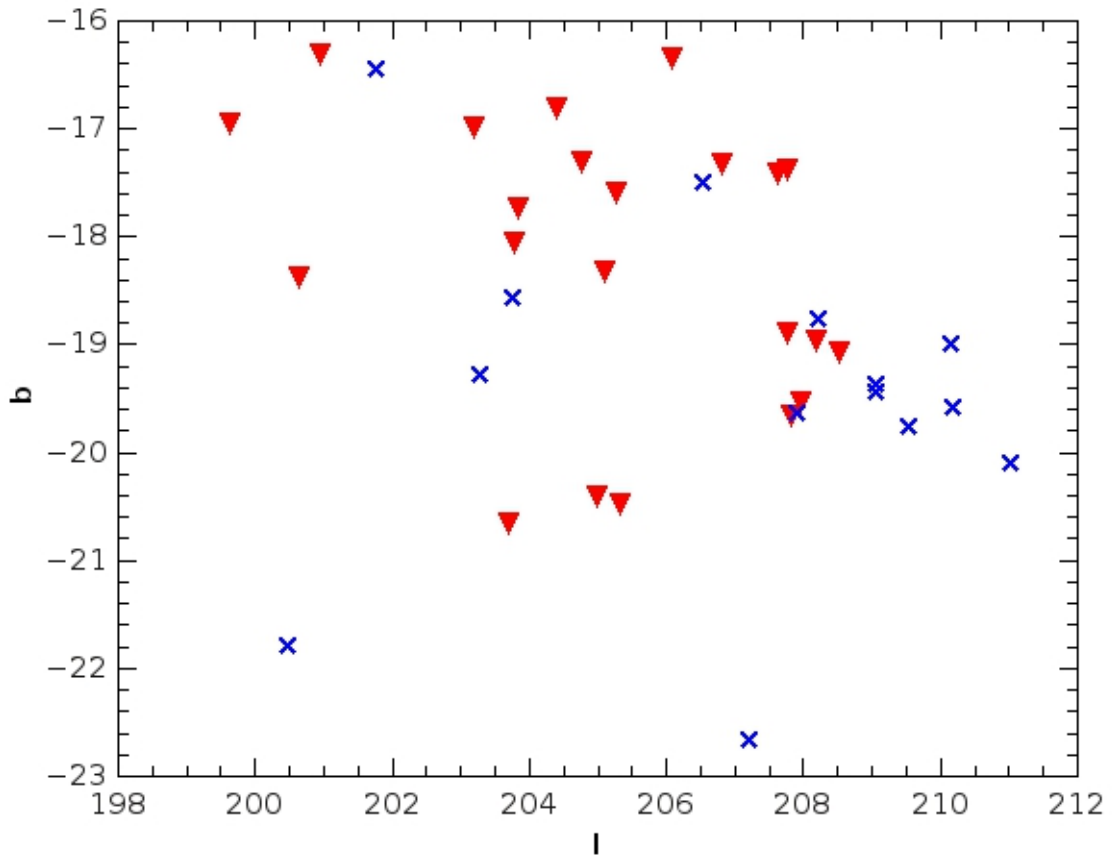


Рисунок 3.8 — Пространственное распределение магнитных и немагнитных звезд [Romanyuk et al, 2013]

В Таблице 9 приведены результаты анализа магнитных звезд. В колонках таблицы 9: звезда - название звезды из каталога HD, в скобках указана принадлежность к подгруппе ассоциации; спектральный класс и тип пекулярности,

которые были взяты из каталога [Renson, Manfroid, 2009], $\langle B_e \rangle \pm \sigma$ – среднее значение продольного магнитного поля, которое получено из всех имеющихся наблюдательных данных; * отмечены новые магнитные звезды, которые были открыты в ходе данного исследования.

Таблица 9 – Список магнитных химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1.

Звезда (подгруппа)	Спектральный класс	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс
HD 34736 (c)	B8 Si	4700 \pm 350
HD 34859* (a)	B9 Si	302 \pm 120
HD 34889 (c)	B9 Si	636 \pm 120
HD 35008* (a)	B9 Si	300 \pm 100
HD 35177* (a)	B9 Si	940 \pm 275
HD 35298 (a)	B6 He-wk	2145 \pm 139
HD 35456 (a)	B7 He-wk	441 \pm 96
HD 35502 (a)	B6 He-wk	1490 \pm 140
HD 36313 (b)	B8 He-wk	1020 \pm 450
HD 36485 (b)	B2 He-r	3220 \pm 318
HD 36526 (b)	B8 He-wk,Si	2820 \pm 380
HD 36540 (c)	B7 He-wk	470 \pm 220
HD 36668 (b)	B7 He-wk	1875 \pm 447
HD 36982 (d)	B9 Si	250 \pm 105
HD 36697* (c)	A0p	1137 \pm 64
HD 36916 (c)	B8 He-wk	464 \pm 180
HD 36955* (b)	A2 CrEu	920 \pm 230
HD 36982 (d)	B3 He-wk	250 \pm 105
HD 36997* (c)	B9 SiSr	1227 \pm 87
HD 37017 (c)	B2 He-r	1488 \pm 338
HD 37058 (c)	B3 He-wk,Sr	728 \pm 62
HD 37140 (b)	B8 SiSr	450 \pm 210
HD 37479 (b)	B2 He-r	1980 \pm 155
HD 37633* (b)	B9 EuSi	310 \pm 125
HD 37642 (c)	B9 He-wk,Si	2110 \pm 180
HD 37776 (b)	B2 He-r	1260 \pm 350
HD 37808 (c)	B9 Si	480 \pm 130
HD 40759* (c)	B9 SrCrEu	1990 \pm 240
HD 294046* (a)	B9 SrCr Eu	496 \pm 165

Работа по анализу магнитных звезд в Орионе продолжается, однако уже сейчас можно сделать некоторые выводы:

- доля химически пекулярных звезд по отношению к нормальным звездам в ассоциации падает в три раза в интервале возрастов от 1 млн (21%) до 10 млн лет (7%);
- доля магнитных звезд по отношению к химически пекулярным также падает с возрастом (рис. 3.9);
- магнитные звезды с сильными полями наблюдаются во всех подгруппах ассоциации, но наибольшее их количество имеется среди звезд с аномальными линиями гелия в поясе Ориона.

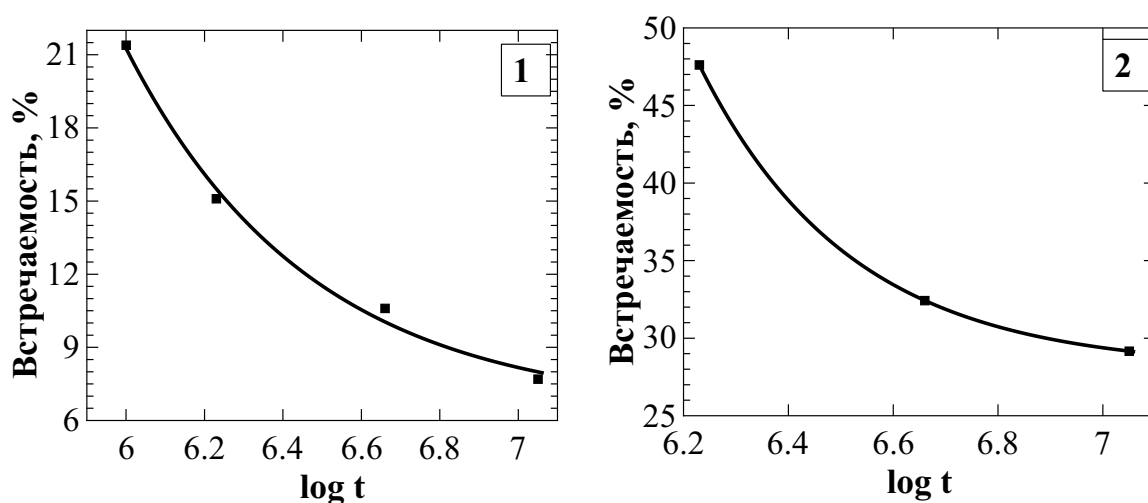


Рисунок 3.9 — Частота встречаемости химически пекулярных звезд относительно нормальных тех же спектральных классов (1), частота встречаемости магнитных звезд относительно химически пекулярных (2).

3.2.4 Результаты детального исследования магнитных химически пекулярных звезд в ассоциации

Для того чтобы получить кривые переменности продольной компоненты магнитного поля для всех потенциально магнитных 60 химически пекулярных звезд, требуется очень много наблюдательного времени. К настоящему времени имеется достаточное количество наблюдательного материала, чтобы построить кривые переменности продольной компоненты поля с фазой периода вращения

для 11 химически пекулярных звезд ассоциации. Они изучены с разной степенью полноты: для двух звезд удалось построить магнитные модели, а для остальных имеются только кривые переменности продольной компоненты. Рассмотрим результаты измерений для каждой из звезд подробно.

HD 34859

HD 34859 – звезда спектрального класса A0 с усиленными линиями кремния Si. Является довольно быстрым ротатором, линии широкие, поэтому точность измерения скорости вращения низкая: $v_e \sin i = 90 \pm 25 \text{ км с}^{-1}$.

На ОЗСП было получено четыре спектра. Измерения магнитного поля представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 34859

JD (2450000+)	$B_e(z) \pm \sigma, \text{ Гс}$	$B_e(r) \pm \sigma, \text{ Гс}$	$B_e(h), \text{ Гс}$	S/N
6640.4076	$+100 \pm 970$	$+410 \pm 80$	–	100
7761.2291	-1860 ± 570	-190 ± 150	-3700	100
8008.4756	$+1270 \pm 620$	$+280 \pm 130$	+100	150
8125.3687	-320 ± 520	-290 ± 110	-1000	150

Для оценки периода вращения были использованы фотометрические данные со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007]. В результате, было выявлено два предположительных периода: $P = 1.0462002$ суток (см. рис. 3.10), $P = 2.0924179$ суток (см. рис. 3.11). С этими периодами имеющиеся точки ложатся достаточно хорошо и указывают на наличие поля, хотя и с большим рассеянием (см. рис. 3.12, рис. 3.13). Для получения более точного периода необходимо провести дополнительные наблюдения звезды.

Фундаментальные параметры звезды представлены в Приложении В.

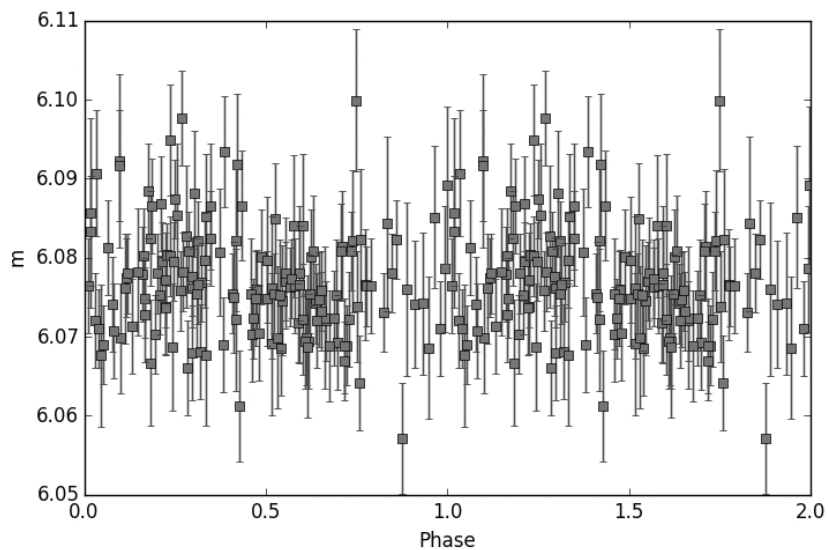


Рисунок 3.10 — Кривая блеска видимой звездной величины для звезды HD 34859, построенная с периодом $P = 1.0462002$ суток.

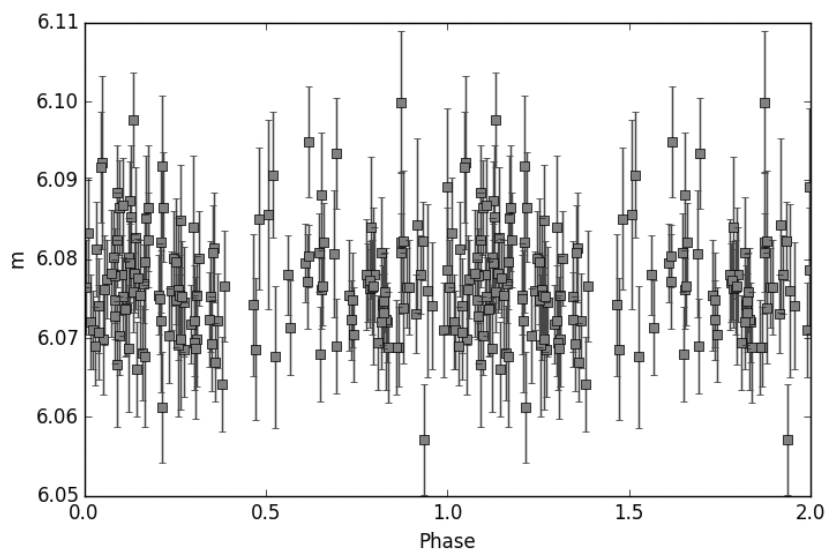


Рисунок 3.11 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 34859, построенная с периодом $P = 2.0924179$ суток.

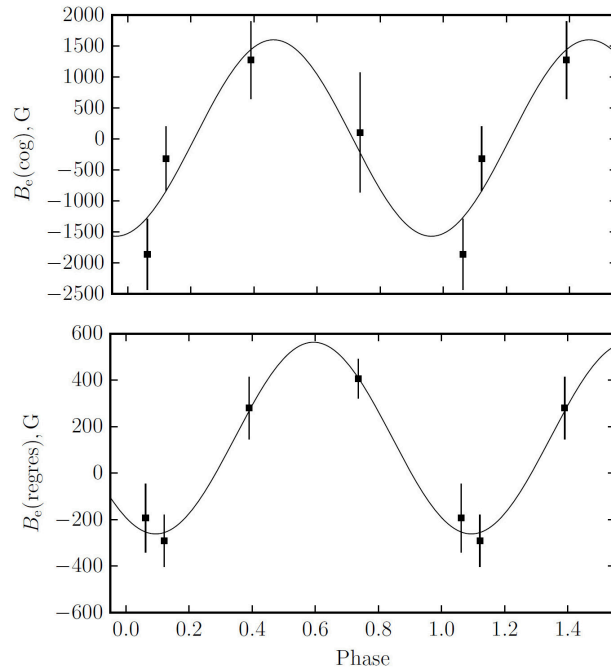


Рисунок 3.12 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 34859, построенная с периодом $P = 1.0462002$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).

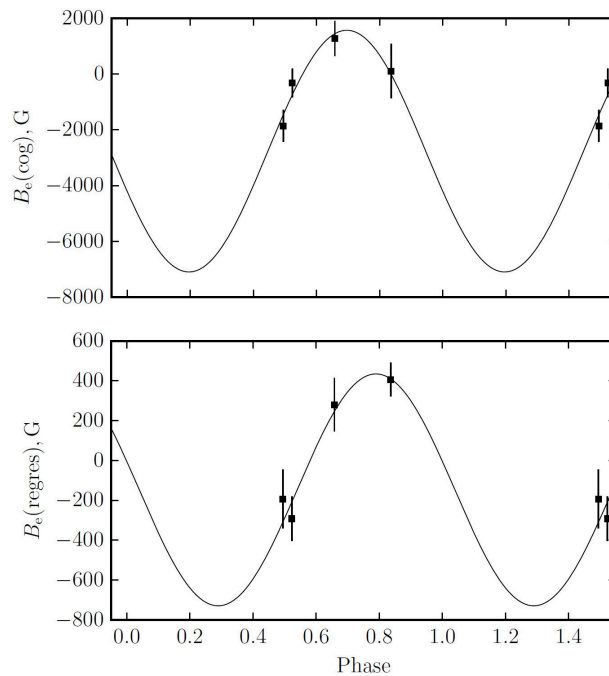


Рисунок 3.13 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 34859, построенная с периодом $P = 2.0924179$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).

HD 35456

HD 35456 – Вр-звезда [Romanyuk et al, 2016a], тип пекулярности He-weak [Renson, Manfroid, 2009]. Она является главным компонентом двойной системы по данным, полученными спекл-интерферометрическими исследованиями [Balega et al, 2013]. Было показано, что вклад линий второго спутника в спектр звезды примерно 7%, чем в данной работе можно пренебречь.

Впервые магнитное поле было зафиксировано в работе [Ворга, 1981], и автором было получено шесть измерений магнитного поля B_e с экстремальными значениями -300 и 1080 Гс. Из-за неравномерного покрытия наблюдательных данных по фазе вращения период этой звезды определить не получилось.

Наблюдения на спектрографе ОЗСП начались с 2010 года. Результаты измерения магнитного поля звезды представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 35456

HJD (2450000+)	$B_e \pm \sigma(z)$, Гс	$B_e \pm \sigma(r)$, Гс	$B_e(h)$, Гс	S/N
5554.338	+650 ± 70	+640 ± 80	+450	400
5962.385	+420 ± 60	+300 ± 40	+500	400
6590.292	+360 ± 80	+370 ± 80	+550	350
6995.355	+270 ± 140	+470 ± 120	+800	300
7289.585	+420 ± 120	+360 ± 80	+300	350
7290.535	+470 ± 80	+420 ± 60	+700	350

Для определения периода вращения звезды были взяты фотометрические данные со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007] (см. рис. 3.14). По этим данным было найдено два подходящих периода – 1.9140112 суток и 4.9506 суток. Магнитные измерения хорошо описываются только со вторым периодом (см. рис. 3.15).

Определение фундаментальных параметров началось с оценки проекции скорости вращения $v_e \sin i$. Она оценивалась по линиям с низким фактором Ланде, список которых приведен в таблице 21. Средняя ширина спектральных линий соответствует скорости вращения $v_e \sin i = 40.6 \pm 3.2$ км с⁻¹. Фундаментальные

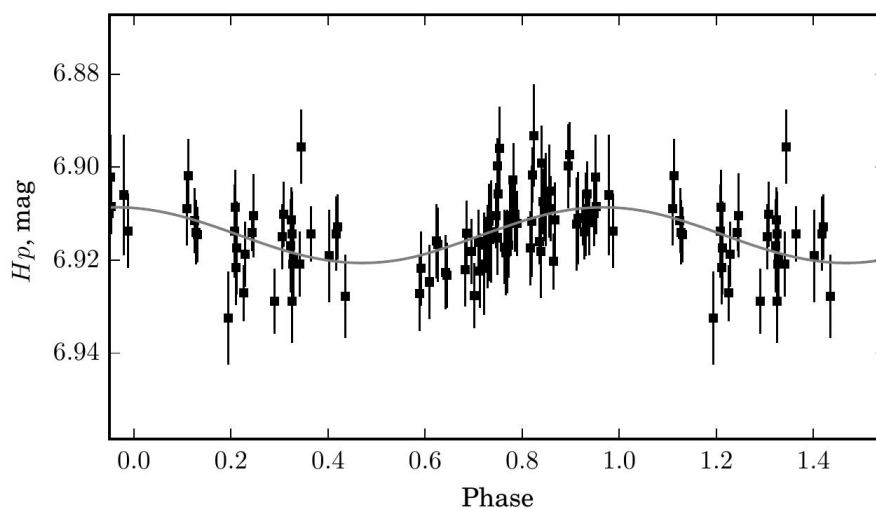


Рисунок 3.14 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины H_r для звезды HD 35456, построенная с периодом $P = 4.9506$ суток.

параметры, такие как эффективная температура, ускорение силы тяжести (рис. 3.16), светимость, масса и радиус представлены в Приложении В. Лучевая скорость звезды $V_R = +11.2 \pm 2.8 \text{ км с}^{-1}$.

Эти данные хорошо согласуются с литературными, взятыми из работы [Alonso et al, 2003], но плохо согласуются с данными из работы [Topilskaya, 1993]. Спектральный класс звезды по каталогу [Renson, Manfroid, 2009] соответствует В7, значит эффективная температура должна лежать в пределах 13000-14000 К, что и подтверждают полученные результаты. Зная скорость вращения, период и радиус, можно оценить угол наклона оси вращения i используя формулу (4.3): $i = 55^\circ$. Таким образом, мы наблюдаем преимущественно одну и ту же область звезды, а в случае, когда ось диполя слабо наклонена к оси вращения, будет регистрироваться преимущественно одна полярность.

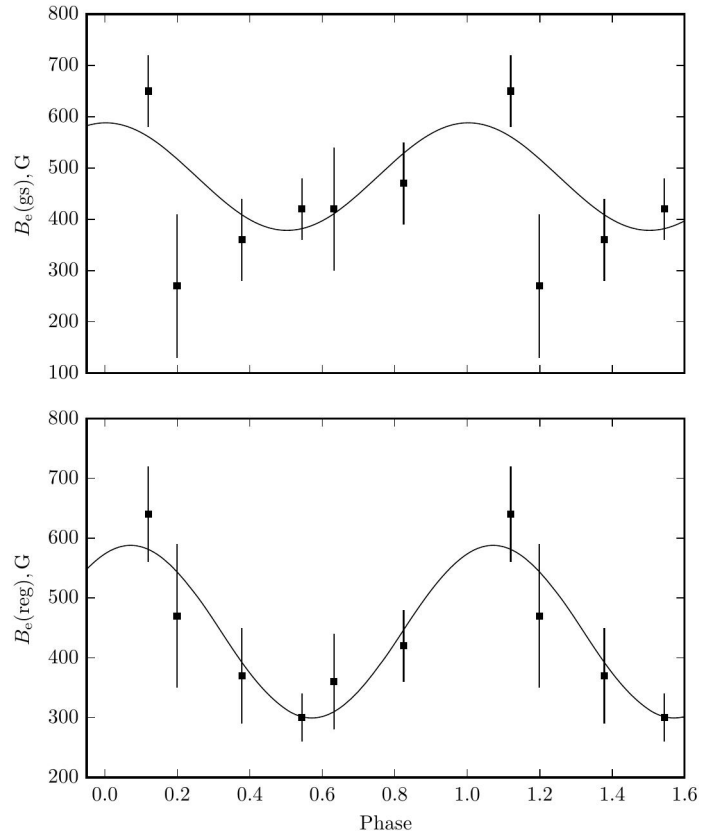


Рисунок 3.15 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 35456, построенная с периодом $P = 4.9506$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).

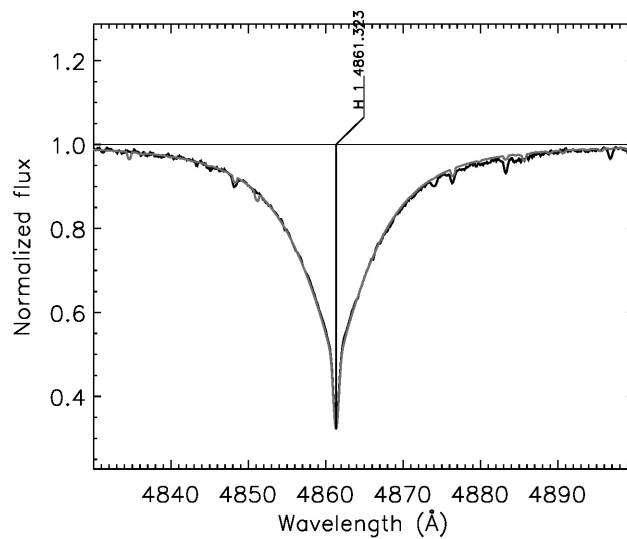


Рисунок 3.16 — Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 35456 (черный) в области спектральной линии H_{β} .

HD 35177

HD 35177 – химически пекулярная звезда с аномальным содержанием кремния Si. Она является быстрым ротатором — $v_e \sin i = 200 \text{ км с}^{-1}$. Магнитное поле впервые было обнаружено на БТА. На ОЗСП было получено пять спектров (см. таблица 12).

Таблица 12 — Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 35177

JD (2450000+)	$B_e(z) \pm \sigma, \text{ Гс}$	$B_e(r) \pm \sigma, \text{ Гс}$	$B_e(h), \text{ Гс}$	S/N
6590.4375	-1590 ± 1290	-380 ± 410	-4100	330
6640.2881	-730 ± 250	-150 ± 100		180
7740.2944	-1910 ± 2600	$+1790 \pm 290$	-400	190
7762.4305	-1700 ± 1900	-710 ± 190	+1400	320
8068.5006	$+730 \pm 1230$	$+740 \pm 280$	+500	200

На рис. 3.17 приведена кривая блеска видимой звездной величины, которая получена спутником HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007], и на рис. 3.18 фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного с периодом $P = 0.5496$

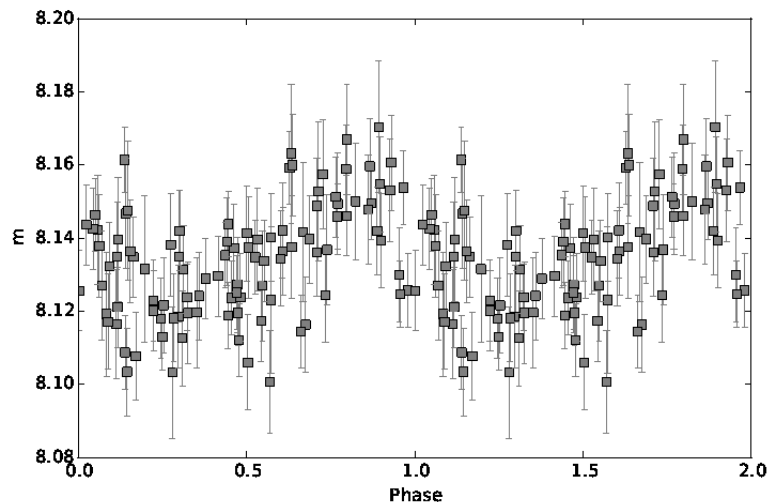


Рисунок 3.17 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 35177, построенная с периодом $P = 0.5496000$ суток.

Фундаментальные параметры звезды представлены в Приложении В.

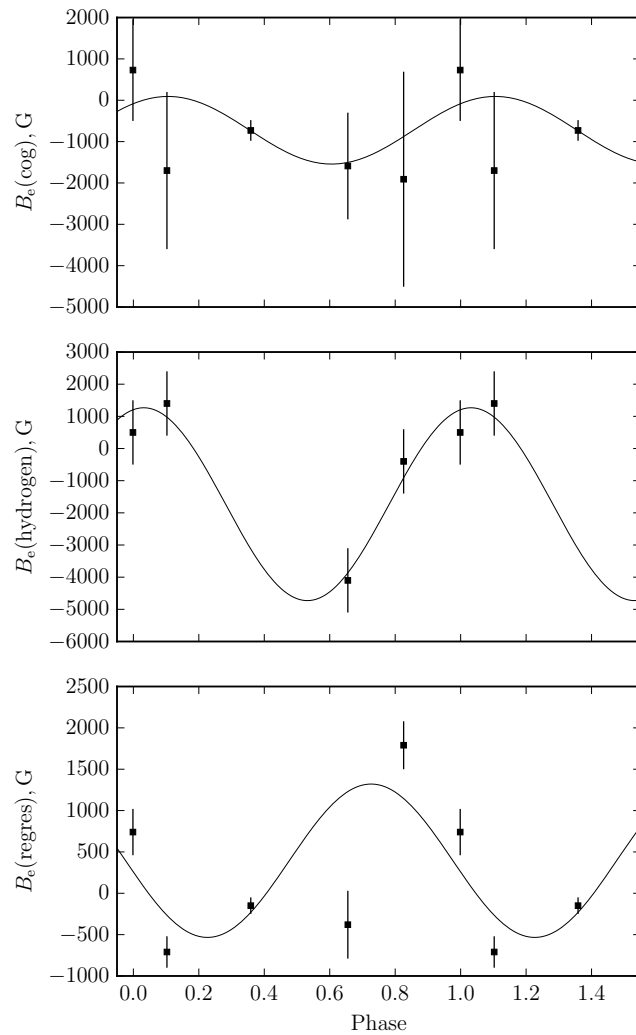


Рисунок 3.18 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 35177, построенная с периодом $P = 0.5496000$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – по измерениям, полученным по спектральной линии H β , нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).

HD 35881

Следующая звезда исследования – HD 35881 [Romanyuk et al, 2016a]. Она относится к типу He-weak, спектрального класса B8 и является членом ассоциации Орион OB1 подгруппы A.

В спектре звезды наблюдаются несколько широких линий. Это говорит о большой скорости вращения звезды. Средняя проекция скорости $v_e \sin i$ близка к 300 ± 90 км с⁻¹. Большая ошибка в определении обусловлена малым количеством линий.

Фундаментальные параметры представлены в Приложении В, а на рисунке 3.19 дано сравнение наблюдаемого спектра с теоретическим в области спектральной линии H β . Лучевая скорость звезды $V_R = +19.5 \pm 3.7$ км с⁻¹.

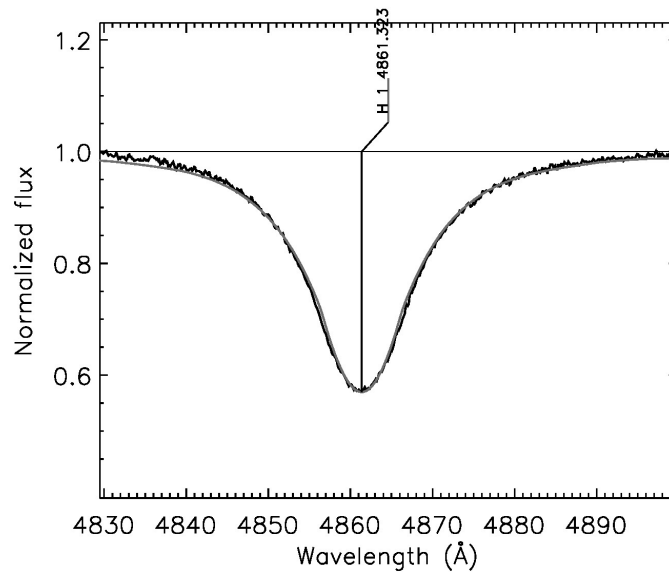


Рисунок 3.19 — Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 35881 (черный) в области спектральной линии H β .

Магнитное поле для данной звезды было определено впервые. Всего получено шесть измерений, представленных в таблице 13.

Так как линий в спектре очень мало, они сложные и сильно уширены вращением, то измерения эффективного продольного магнитного поля методом центра тяжести (интегральным методом) имеют низкую точность.

Таблица 13 — Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 35881

HJD (2450000+)	$B_e \pm \sigma(z)$, Гс	$B_e \pm \sigma(r)$, Гс	$B_e(h)$, Гс	S/N
5553.262	-1070 ± 590	-60 ± 140	-1600	400
5962.317	$+2470 \pm 1370$	$+160 \pm 120$	-700	400
6590.605	-8900 ± 9300	$+200 \pm 140$	+1900	400
7288.545	$+2800 \pm 3500$	-80 ± 150	-200	500
7289.535	-400 ± 1100	$+40 \pm 130$	-1200	350
7290.535	$+520 \pm 430$	$+160 \pm 260$	-1000	700

Для определения периода вращения звезды были использованы фотометрические данные со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007] (см. рис. 3.20), где наиболее предпочтительный период $P = 0.6998$ суток, который удовлетворительно подходит и для магнитных данных (см. рис. 3.21).

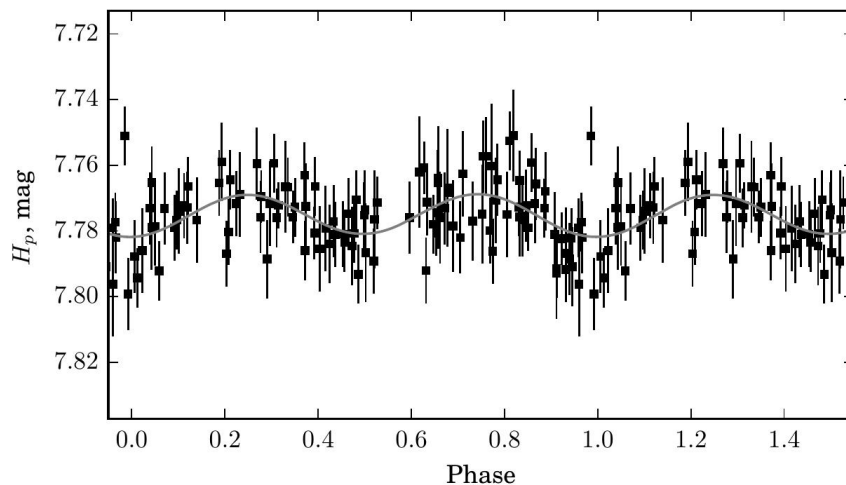


Рисунок 3.20 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 35881, построенная с периодом $P = 0.6998$ суток.

Оценить угол наклона к оси вращения i не представляется возможным. Более точные исследования провести можно только с увеличением количества данных.

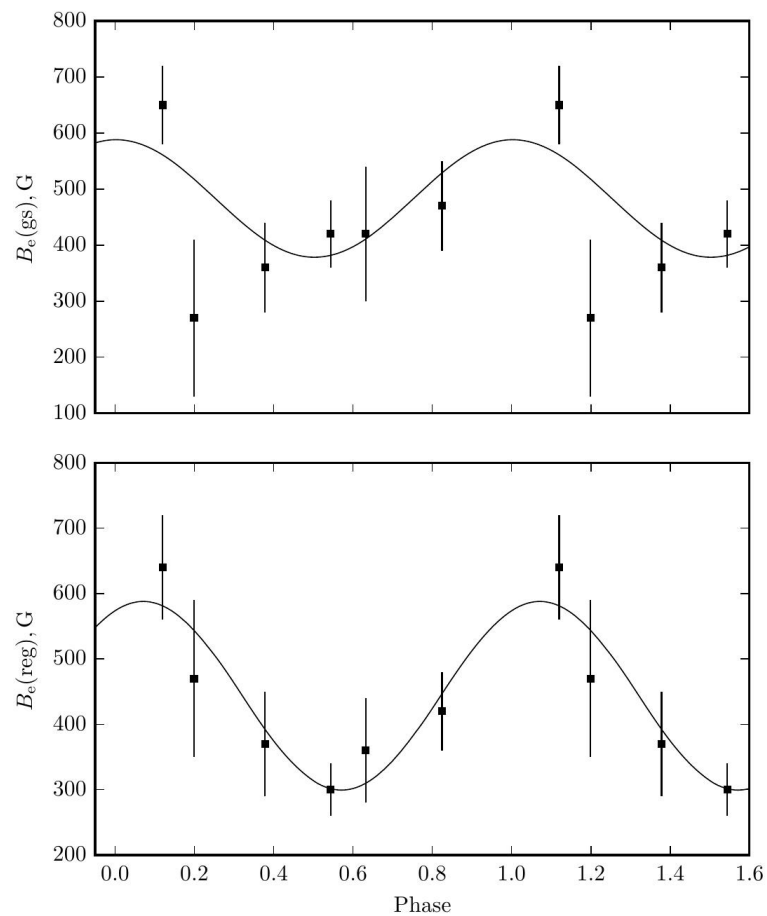


Рисунок 3.21 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 35881, построенная с периодом $P = 0.6998$ суток: верхний график по измерениям, полученным по спектральной линии H β , нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).

HD 36313

Звезда HD 36313 относится к спектральному классу В8 и имеет аномально слабые линии гелия (He-weak) [Romanyuk et al, 2016a]. Данные спекл-интерферометрии [Balega et al, 2013] показали, что она входит в состав двойной системы с незначительным расстоянием между компонентами. В спектре звезды видны линии второго компонента. Благодаря этому удалось измерить проекции скоростей вращения обоих компонентов: $v_e \sin i$ (a) = 160 ± 30 км с⁻¹, $v_e \sin i$ (b) = 25 ± 2 км с⁻¹. Ошибка определения проекции скорости вращения первого компонента системы велика, так как спектр звезды практически полностью состоит из узких линий второго объекта. Лучевая скорость компонентов: V_R (a) = -12.4 ± 2.9 км с⁻¹, V_R (b) = $+25.0 \pm 3.1$ км с⁻¹. На рисунке 3.22 представлено сравнение теоретического спектра, рассчитанного с параметрами, взятыми из Приложения В, с наблюдаемым.

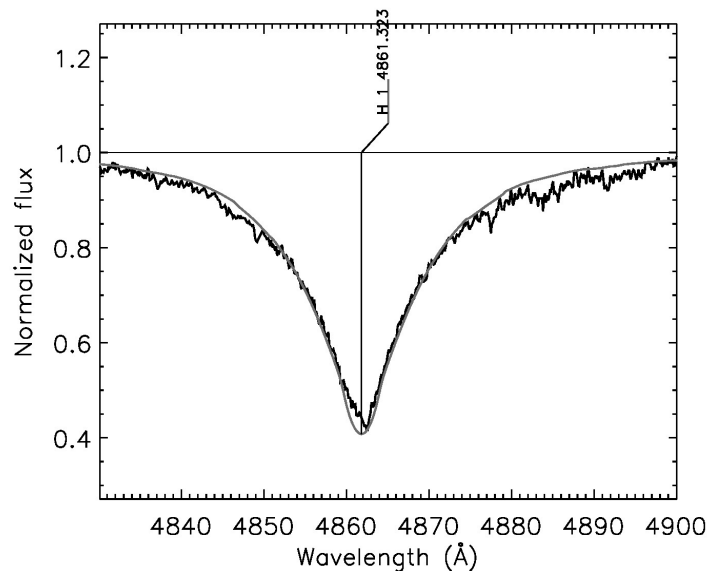


Рисунок 3.22 — Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36313 (черный) в области спектральной линии H_{β} .

Магнитное поле впервые у данной звезды было обнаружено в работе [Botta, 1981]. В ней была построена кривая переменности продольной компоненты магнитного поля и определен период $P = 0.776$ суток. Период вращения

для данной звезды был найден и в работе [North, 1984]: $P = 0.58931$ суток. Измерения магнитного поля по спектрам, полученным при помощи ОЗСП, представлены в таблице 14.

Таблица 14 — Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 36313

HJD (2450000+)	$B_e \pm \sigma(z)$, Гс	$B_e \pm \sigma(r)$, Гс	$B_e(h)$, Гс	S/N
5554.321	$+120 \pm 120$	$+560 \pm 180$	-1800	400
5842.500	$+160 \pm 160$	$+480 \pm 190$	+1600	350
5843.542	$+40 \pm 130$	$+250 \pm 270$	+1100	350
6995.325	-160 ± 400	$+280 \pm 210$	+2000	250
7288.512	-480 ± 370	$+340 \pm 150$	–	350
7288.528	-300 ± 300	-70 ± 190	+600	400
7289.492	$+280 \pm 160$	-40 ± 120	-500	300
7290.483	-60 ± 290	$+20 \pm 180$	-1500	300

Первичная оценка магнитного поля проводилась только по узким линиям второго компонента системы. Это предположение было обосновано тем, что чаще всего магнитные звезды имеют низкую скорость вращения. Однако оказалось, что для данной системы это предположение ошибочно. Второй компонент не является магнитным, а магнитная природа заподозрена только у первого компонента системы с широкими линиями. Поэтому первые два метода регистрации магнитного поля – интегральный и дифференциальный, дают оценки низкой точности. Измерения поля по спектральной линии H_β дают наиболее достоверный результат, который подтверждается работой [Vorra, 1981]. Дополнительно для поиска периода вращения использовались фотометрические данные со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007]. При построении кривой переменности видимой звездной величины и измерений магнитного поля наиболее подходящим оказался двойной период Норта $P = 1.17862$ суток (см. рис. 3.24, 3.23).

Моделирование магнитного поля и поиск угла наклона оси i провести не удалось.

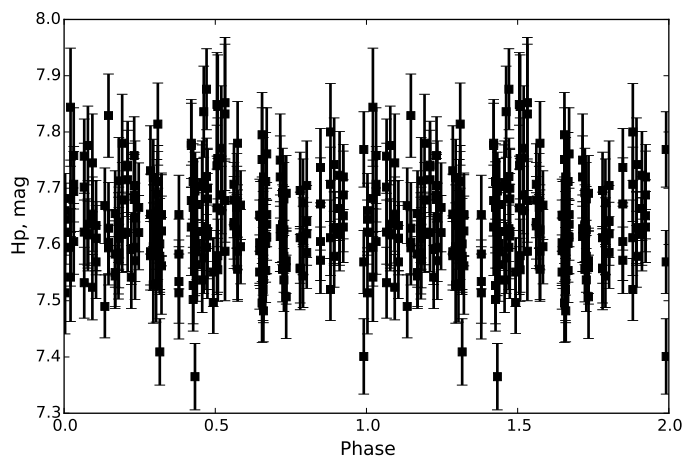


Рисунок 3.23 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36313, построенная с периодом $P = 1.17862$ суток.

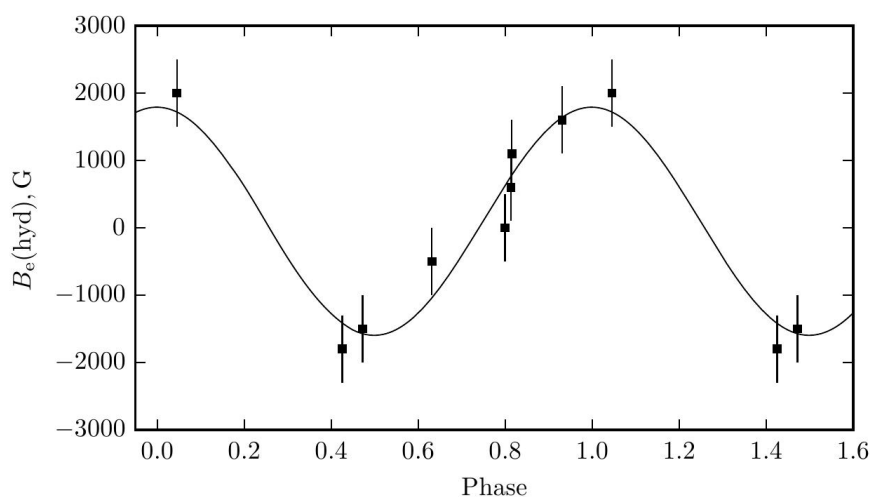


Рисунок 3.24 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36313, построенная с периодом $P = 1.17862$ суток, по измерениям, полученным по спектральной линии H β .

HD 36526

Звезда HD 36526, спектрального класса V8, имеет ослабленные линии гелия (He-weak) [Romanyuk et al, 2016a]. Она относится к подгруппе В в ассоциации Орион OB1. Авторами в работе [Balega et al, 2013] был найден спутник на расстоянии $0.''15$.

Магнитное поле впервые было исследовано в работе [Vorra, 1981] по шести измерениям. Автор работы [North, 1984] оценил период вращения этой

звезды $P = 1.5405$ суток. У нее имеется широкая депрессия в континууме на длине волны $\lambda = 5200 \text{ \AA}$, что говорит о большой величине магнитного поля, предположительно $B_s = 2.4 \text{ кГс}$.

Фундаментальные параметры звезды представлены в Приложении В, а на рис. 3.25 показано сравнение теоретического профиля спектральной линии водорода H_β с наблюдаемым. Лучевая скорость звезды $V_R = 23.3 \pm 2.9 \text{ км с}^{-1}$.

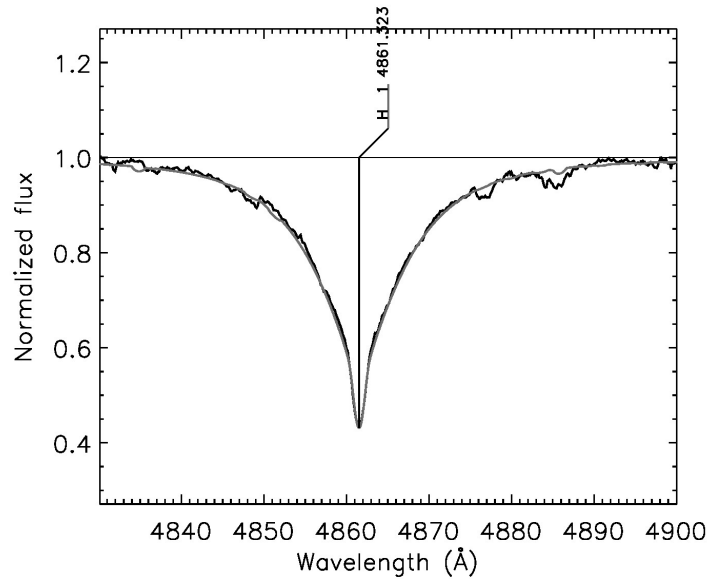


Рисунок 3.25 — Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36526 (черный) в области спектральной линии H_β .

На ОЗСП было получено шесть спектров для данной звезды (см. таблица 15). Все измерения магнитного поля хорошо согласуются с данными работы [Vorra, 1981].

Таблица 15 — Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 36526

HJD (2450000+)	$B_e \pm \sigma(z)$, Гс	$B_e \pm \sigma(r)$, Гс	$B_e(h)$, Гс	S/N
5553.342	$+2730 \pm 320$	$+2180 \pm 170$	+3200	350
5842.532	$+1510 \pm 400$	-290 ± 210	-2200	350
5963.292	—	$+2790 \pm 50$	+3410	350
6589.530	$+2150 \pm 220$	$+1970 \pm 130$	+5700	450
7289.570	$+2040 \pm 290$	$+1180 \pm 100$	+3200	350
7290.525	$+4600 \pm 590$	$+980 \pm 150$	+200	350

Кривую переменности магнитного поля получилось построить с удвоенным периодом Норта: $P = 3.081$ суток. Фазовая кривая представлена на рис. 3.26.

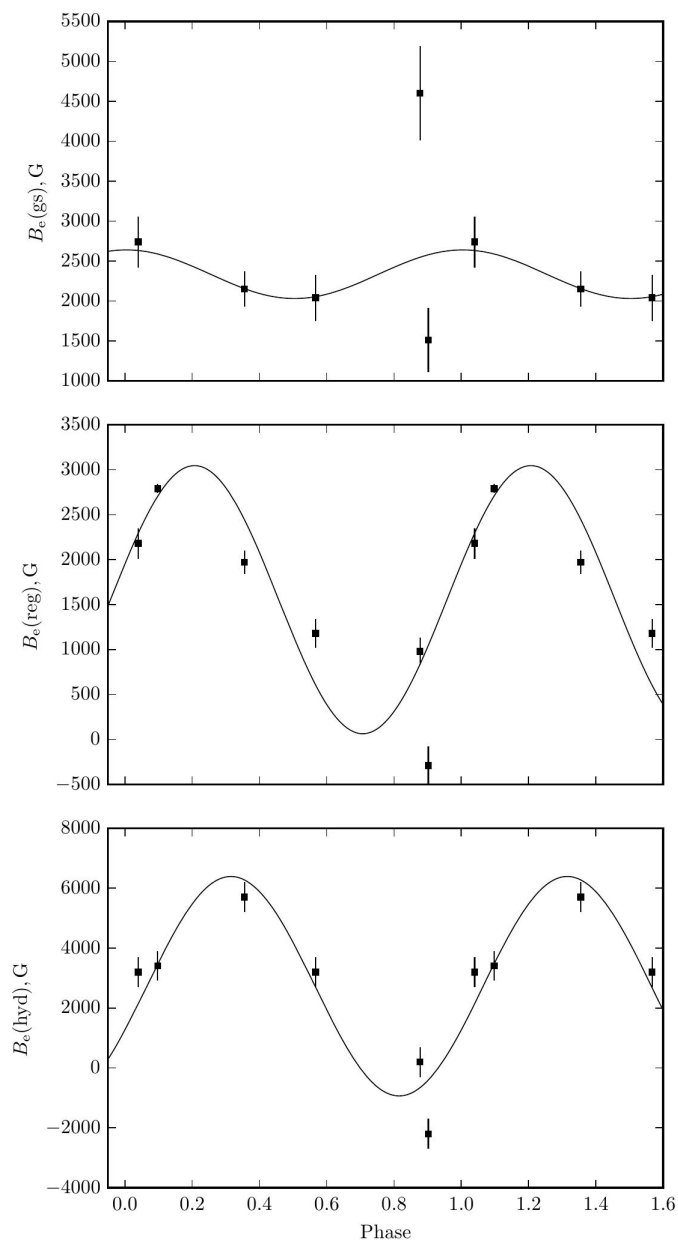


Рисунок 3.26 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36526, построенная с периодом $P = 3.081$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – методом регрессии (дифференциальный метод), нижний график – по измерениям, полученным по спектральной линии H β .

С учетом данных проекции скорости вращения, периода и радиуса, по формуле 4.3 был найден угол наклона оси вращения: $i = 80^\circ$. Магнитное моделирование провести не удалось.

HD 36540

HD 36540 относится к типу переменности He-weak со спектральным классом B7 [Romanyuk et al, 2017], располагается в подгруппе C с возрастом $\log t = 6.6$. В работе [Balega et al, 2013] у данной системы был найден спутник на расстоянии $0.''2$.

Впервые магнитное поле было найдено в работе [Borra, 1981] по четырем измерениям. Излучение данной звезды сильно поляризовано, так как ее свет проходит через Большую туманность Ориона [Pagnago, 1954]. Это подтверждается и большим межзвездным поглощением: $A_V = 0.^m59$.

В работе [North, 1984] был определен фотометрический период звезды $P = 2.1709$ суток.

Сравнение наблюдаемого спектра с теоретическим в области спектральной линии H_{β} представлено на рис. 3.27. Теоретический спектр был рассчитан с фундаментальными параметрами, взятыми из Приложения В. Следует отметить, что для данной звезды имеется большой разброс в определении эффективной температуры от 12000 К до 16 000 К. Так как спектральный класс звезды B7, то эффективная температура должна быть в пределах 14000-15000 К. Лучевая скорость звезды переменная: $V_R(min) = +14.0 \pm 2.9$ км с⁻¹, $V_R(max) = +30.8 \pm 2.9$ км с⁻¹.

На ОЗСП было получено четыре спектра для данной звезды. Ее спектральные линии уширены вращением, имеют сложные профили и малую интенсивность, что повлекло на большой разброс результатов по измерению магнитного поля методом центров тяжести (Таблица 16).

Свернуть фазовую кривую с периодом, определенным в работе Норты, или более близким периодом не получилось. Для уточнения периода были взяты фотометрические данные со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007], но их использование не привело к успеху. Были выделены два предпочтительных периода: $P = 2.172$ суток (рис. 3.29) и $P = 1.8437$ суток (рис. 3.28).

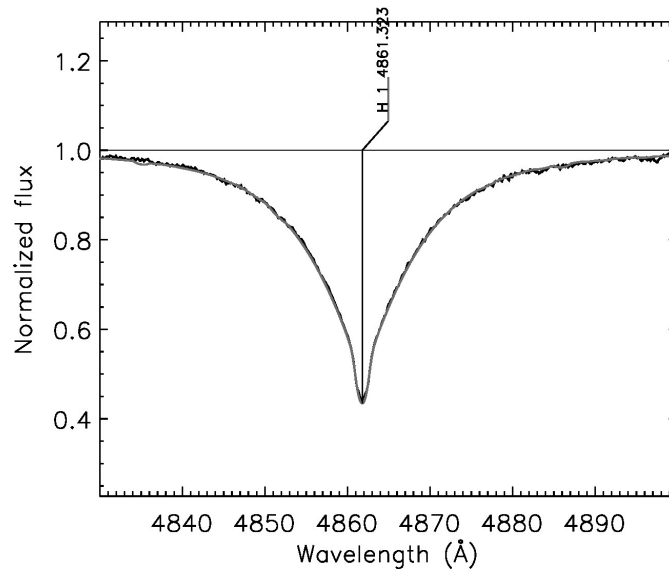


Рисунок 3.27 — Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36540 (черный) в области спектральной линии H_{β} .

Таблица 16 — Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 36540

HJD (2450000+)	$B_e \pm \sigma(z)$	$B_e \pm \sigma(r)$	$B_e(h)$	S/N	$V_R \pm \sigma, \text{ км с}^{-1}$
2854.570	—	$+280 \pm 60$	-1600	70	—
5553.357	$+400 \pm 250$	$+320 \pm 120$	-700	310	31.4 ± 3.7
5873.558	$+550 \pm 420$	-400 ± 160	+1900	210	31.6 ± 3.6
5962.404	$+360 \pm 280$	-120 ± 110	-200	160	38.5 ± 4.6
5963.415	$+4300 \pm 3400$	$+110 \pm 110$	-1200	140	31.3 ± 3.8

Фазовые кривые магнитных измерений из таблицы 16 представлены на рис. 3.30, 3.31.

При оценке угла наклона оси вращения предпочтителен период $P = 1.8437$ суток: $i = 65^\circ$. На данный момент нет возможности подтвердить эти данные магнитным моделированием, так как слишком мало измерений магнитного поля. Таким образом, исключать из рассмотрения период $P = 2.172$ суток нельзя. Подробный анализ возможно провести только по спектрам высокого разрешения и при наличии большего числа измерений магнитного поля.

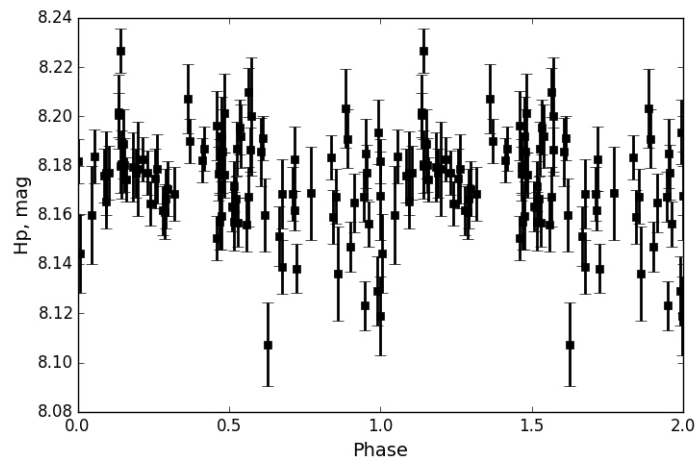


Рисунок 3.28 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36540, построенная с периодом $P = 1.8437$ суток.

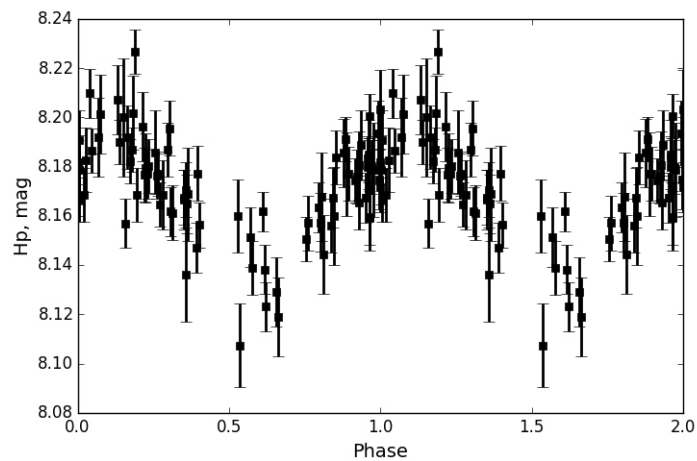


Рисунок 3.29 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36540, построенная с периодом $P = 2.172$.

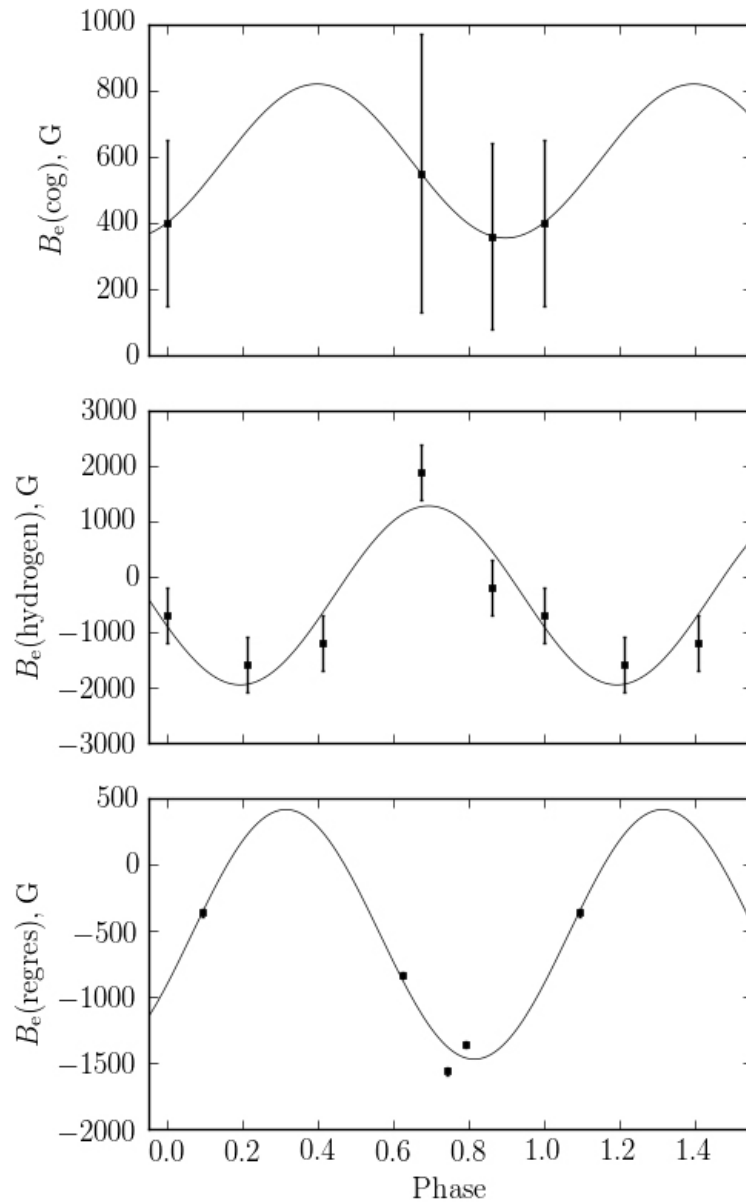


Рисунок 3.30 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36540, построенная с периодом $P = 1.8437$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – по измерениям, полученным по спектральной линии $H\beta$, нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).

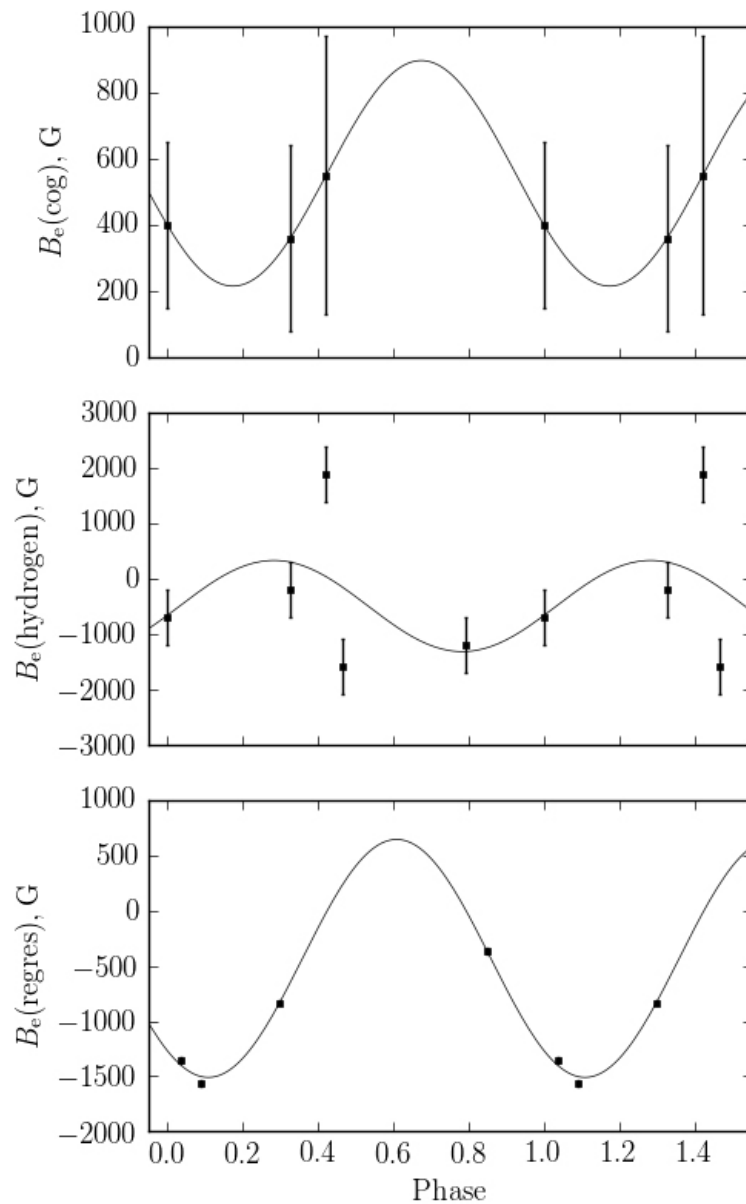


Рисунок 3.31 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36540, построенная с периодом $P = 2.172$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – по измерениям, полученным по спектральной линии $H\beta$, нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).

HD 36668

HD 36668 – химически пекулярная звезда с ослабленными линиями гелия (He-weak) спектрального класса B7 [Romanyuk et al, 2017]. Она относится к подгруппе В в ассоциации Орион OB1. Фундаментальные параметры для данной звезды представлены в Приложении В. На рис. 3.32 показано сравнение синтетического спектра с наблюдаемым в области спектральной линии H_{β} .

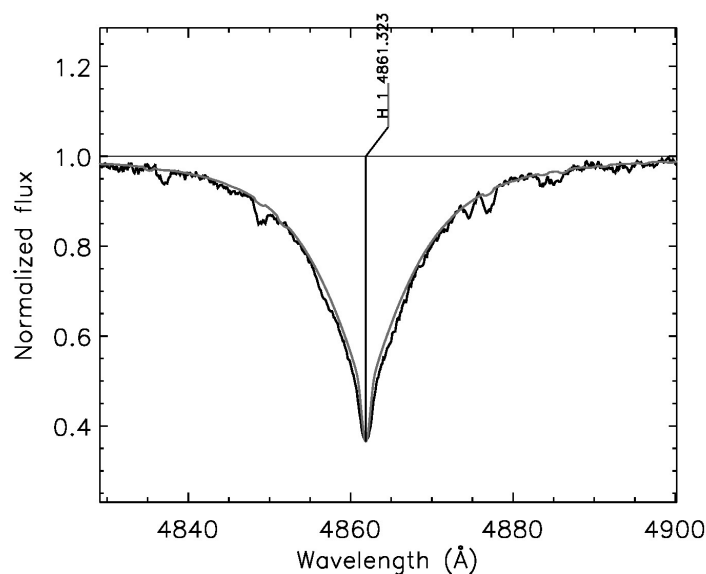


Рисунок 3.32 — Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36668 (черный) в области спектральной линии H_{β} .

Для данной звезды имеются определения параметров эффективной температуры и ускорения силы тяжести в работе [Topilskaya, 1993], где авторами были получены следующие значения: $T_{eff} = 11700$ К, $\log g = 3.20$. Так как возраст звезды примерно соответствует возрасту подгруппы В: $\log t = 6.2$, то такое значение ускорения силы тяжести представляется заниженным и противоречит молодому возрасту звезды. Лучевая скорость звезды $V_R = +33.7 \pm 1.4$ км с⁻¹.

Впервые магнитные оценки были проведены в работе [Vorra, 1981] по шести измерениям. Норт выполнил анализ фотометрической переменности для данной звезды и обнаружил, что кривая изменения видимой звездной величины имеет два максимума, и оценил период $P = 2.1211$ суток [North, 1984]. Адельман,

исследуя данные по четырехцветной фотометрии звезды, предложил немного другой период $P = 2.11884$ суток [Adelman, 2000]. Он также заметил вторичный максимум на кривой блеска. По фотометрическим данным со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007] при построении кривой блеска с периодом 2.11884 суток можно наблюдать широкий минимум на фазах от 0.2-0.8 и выраженный максимум на фазе 0.0 (см. рис. 3.33).

На спектрографе ОЗСП было выполнено восемь наблюдений данной звезды (см. таблица 17).

Таблица 17 — Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 36668

HJD (2450000+)	$B_e \pm \sigma(z)$	$B_e \pm \sigma(r)$	$B_e(h)$	S/N	$V_R \pm \sigma, \text{ км с}^{-1}$
5582.364	-1100 ± 240	-580 ± 180	-2200	240	30.9 ± 4.6
5583.312	-1610 ± 230	-1200 ± 210	-2300	310	29.8 ± 3.8
5842.478	-1170 ± 350	-1140 ± 150	-2100	300	38.6 ± 4.7
5962.327	$+2160 \pm 180$	$+1140 \pm 50$	–	300	38.1 ± 4.7
5963.277	-1010 ± 790	-920 ± 66	–	300	33.4 ± 3.3
7288.565	$+2060 \pm 350$	$+1030 \pm 80$	+2500	200	36.0 ± 2.1
7289.556	-1640 ± 340	-510 ± 210	-1400	240	31.1 ± 4.0
7290.513	$+1420 \pm 430$	$+430 \pm 340$	+1200	230	32.4 ± 1.1

Фазовая кривая измерений магнитного поля, полученными разными методами, показана на рис. 3.34.

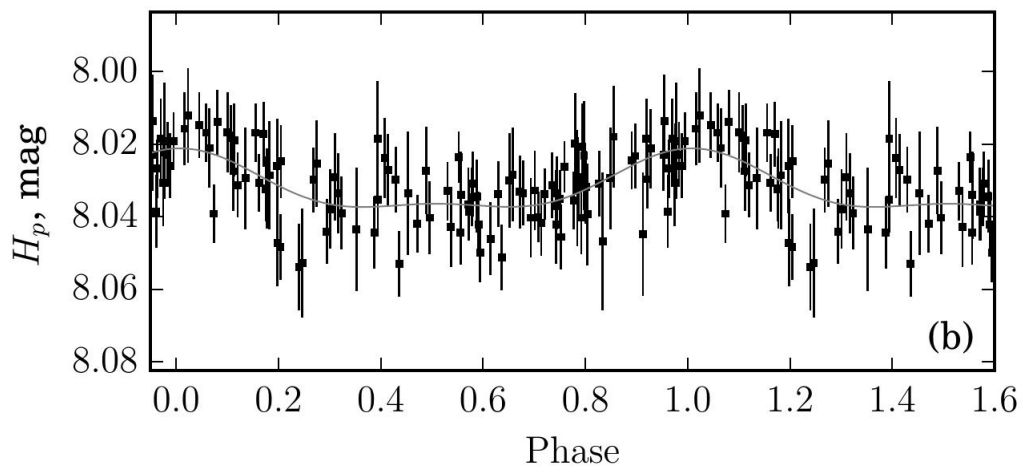


Рисунок 3.33 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36668, построенная с периодом $P = 2.11884$ суток.

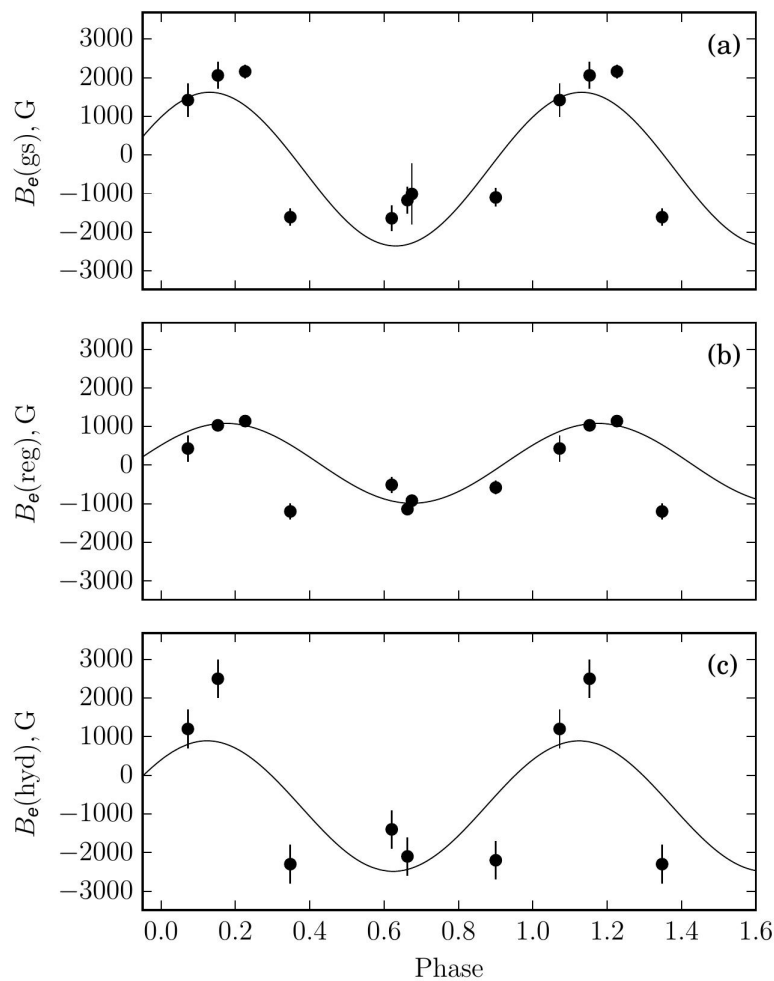


Рисунок 3.34 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36668, построенная с периодом $P = 2.11884$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – методом регрессии (дифференциальный метод), нижний график – по измерениям, полученным по спектральной линии H_{β} .

На рис. 3.34 видно, что на фазах от 0.3-0.9 можно различить наличие второго максимума. Это плато как раз соотносится с тем местом, где на фазовой кривой видимой звездной величины виден широкий минимум. Это говорит о том, что магнитный полюс имеет более низкую температуру по сравнению с окружающим веществом. Наилучшим способом описать видимую кривую переменности магнитного поля можно путем введения в систему еще одного диполя. Этот факт особо интересен тем, что в подгруппе В ассоциации Орион OB1 уже были найдены две такие звезды: HD 37776 [Kopylova, Romanyuk, 1992] и HD 34736 [Semenko et al, 2014]. Это свидетельствует о том, что данное явление в этой подгруппе не является случайным. Для более точного построения моде-

ли магнитного поля звезды необходимо больше наблюдательных данных более высокого качества.

HD 36916

HD 36916 – химически пекулярная звезда с ослабленными линиями гелия (He-weak) и со спектральным классом B8 [Romanyuk et al, 2017]. Она принадлежит к подгруппе C в ассоциации Орион OB1.

Фундаментальные параметры звезды представлены в Приложении В. На рис. 3.35 показано сравнение синтетического спектра с наблюдаемым в области спектральной линии H_{β} .

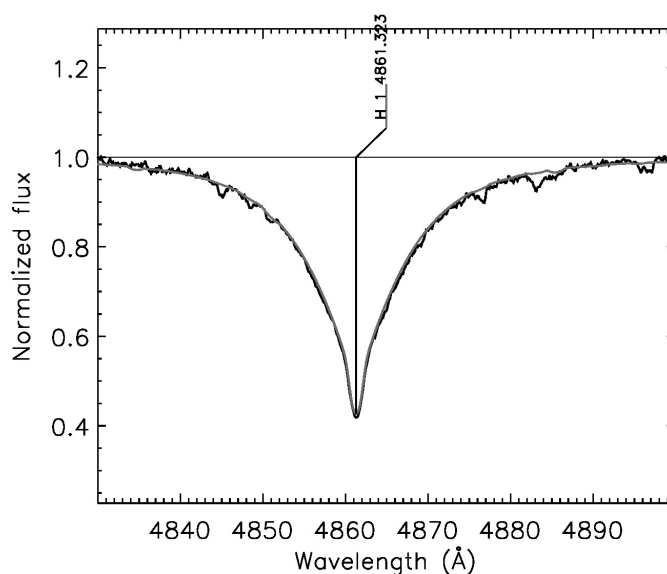


Рисунок 3.35 — Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36916 (черный) в области спектральной линии H_{β} .

Авторы работы [Topilskaya, 1993] вывели другие значения эффективной температуры и ускорения силы тяжести: $T_{eff} = 13450$ К, $\log g = 3.40$. Однако моделирование показало, что эти параметры не соответствуют наблюдаемому спектру звезды. Лучевая скорость носит переменный характер, что указывает на

двойственность объекта и требует спекл-интерферометрического исследования. Среднее значение лучевой скорости $\langle V_R \rangle = +20.5 \pm 1.4 \text{ км с}^{-1}$.

Магнитное поле впервые было обнаружено в работе [Borra, 1981] по двум измерениям, и затем авторы работы [Bagnulo et al, 2002] получили еще одно измерение. Фотометрическую переменность звезды с периодом $P = 1.56536$ суток нашел Норт [North, 1984].

На спектрографе ОЗСП было проведено шесть измерений магнитного поля (см. таблица 18). Фазовая кривая с уточненным периодом $P = 1.5652386$ суток представлена на рис. 3.36 для фотометрических данных, взятых со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007], и на рис. 3.37 для магнитных измерений.

Таблица 18 — Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 36916

HJD (2440000+)	$B_e \pm \sigma(z)$	$B_e \pm \sigma(r)$	$B_e(h)$	S/N	$V_R \pm \sigma, \text{ км с}^{-1}$
55554.348	-950 ± 150	-660 ± 220	-1000	330	22.2 ± 2.7
55842.549	-570 ± 230	-360 ± 150	-500	330	26.6 ± 3.8
55963.377	$+70 \pm 310$	-170 ± 60	—	320	15.6 ± 3.2
56590.506	-1040 ± 380	-610 ± 170	-1200	350	22.9 ± 3.2
57289.604	$+190 \pm 460$	-450 ± 270	+100	240	16.0 ± 3.3
57920.545	-800 ± 250	-400 ± 70	-700	400	18.8 ± 1.3

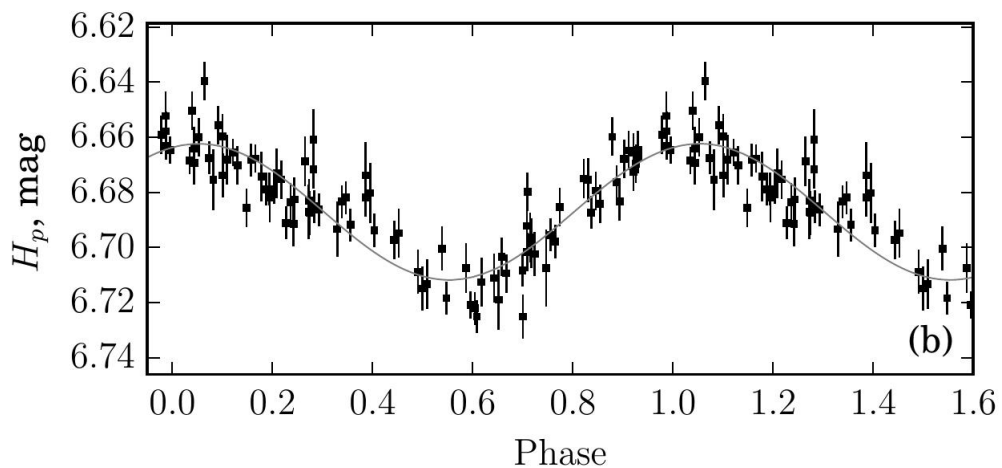


Рисунок 3.36 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36916, построенная с периодом $P = 1.5652386$ суток.

Используя данные из таблицы Б.2, угол наклона оси $i = 50^\circ$, что согласуется с магнитными данными, если положить угол между осью диполя и осью вращения $\beta = 130^\circ$.

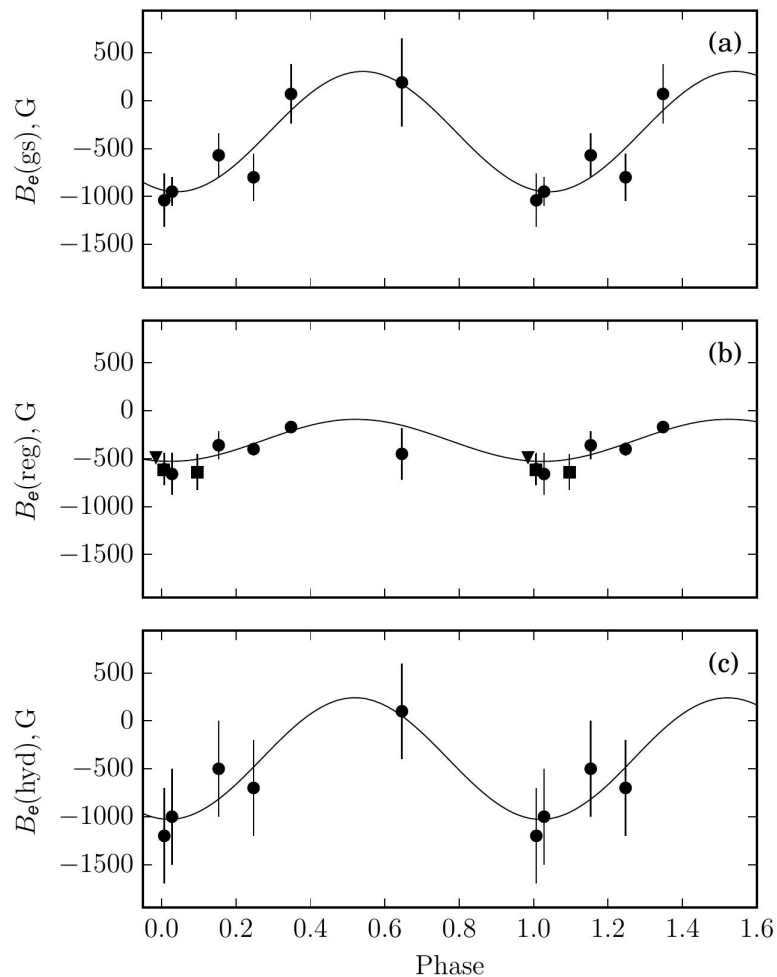


Рисунок 3.37 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36916, построенная с периодом $P = 1.5652386$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – методом регрессии (дифференциальный метод), нижний график – по измерениям, полученным по спектральной линии H_{β} .

HD 37058

HD 37058 – звезда с ослабленными линиями гелия (He-weak) спектрального класса B3 [Romanyuk et al, 2017]. Она является членом подгруппы C ассоциации Орион OB1 и находится в Туманности Ориона [Pagnano, 1954].

Фундаментальные параметры звезды представлены в Приложении В. На рис. 3.38 показано сравнение синтетического спектра с наблюдаемым в области спектральной линии H_{β} .

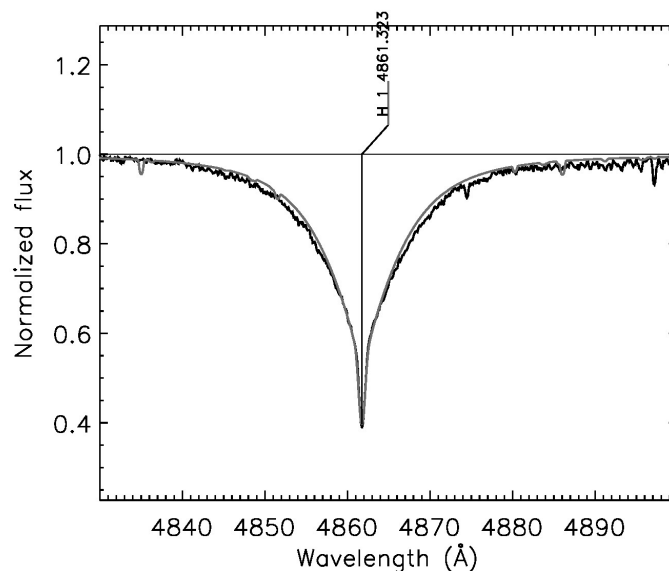


Рисунок 3.38 — Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 37058 (черный) в области спектральной линии H_{β} .

Лучевая скорость переменная, что свидетельствует о наличии второго компонента в данной системе.

Впервые данные о магнитном поле появились в работе [Sargent, 1967]. В дальнейшем звезда эпизодически изучалась разными авторами и на разных инструментах. Все они зафиксировали наличие магнитного поля. На ОЗСП было получено семь спектров (Таблица 19).

Как можно заметить, для звезды достигается высокая точность измерений благодаря большому количеству узких линий в спектре, что нехарактерно

Таблица 19 — Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 37058

HJD (2450000+)	$B_e \pm \sigma(z)$	$B_e \pm \sigma(r)$	$B_e(h)$	S/N	$V_R \pm \sigma, \text{ км с}^{-1}$
5582.301	-1250 ± 70	-1100 ± 70	-1000	230	31.4 ± 3.7
5583.384	-1140 ± 50	-1130 ± 60	-900	270	32.2 ± 4.2
5842.619	-120 ± 40	-110 ± 50	-600	290	27.5 ± 3.2
5843.494	-440 ± 40	-320 ± 90	-2000	420	19.1 ± 3.2
5873.587	-950 ± 80	-800 ± 60	-800	230	27.0 ± 3.4
7289.594	$+680 \pm 140$	$+370 \pm 70$	+100	200	28.0 ± 1.6
7290.558	$+830 \pm 90$	$+620 \pm 50$	+700	250	27.4 ± 2.8

для звезды спектрально класса В3. Период вращения был определен по измерениям эффективного продольного магнитного поля в работе [Vogt, 1981]: $P = 14.61$ суток. Затем авторы работы [Mathys et al, 1997] уточнили данный период $P = 14.612$ суток. По фотометрическим данным со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007] период был уточнен $P = 14.6590$ суток (см. рис. 3.39). Этот период также не противоречит измерениям магнитного поля (см. рис. 3.40).

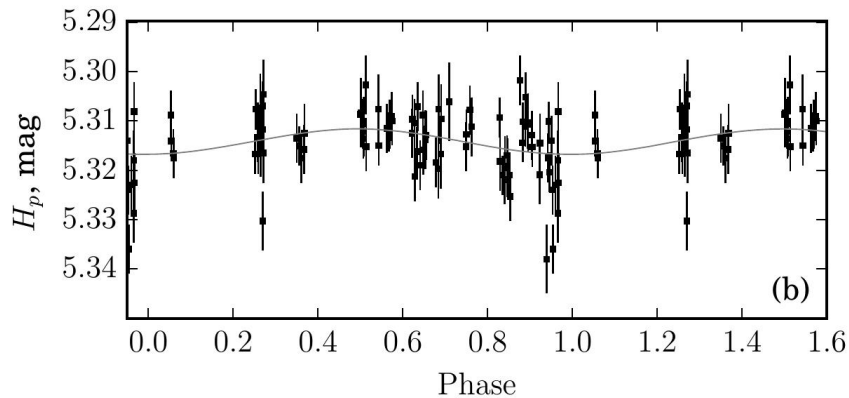


Рисунок 3.39 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 37058, построенная с периодом $P = 14.6590$ суток.

Исходя из оценок радиуса и периода, можно сказать, что звезда HD 37058 является медленным ротатором с экваториальной скоростью $v_e = 18 \text{ км с}^{-1}$. Из этого следует, что ширина наблюдаемого профиля линии должна быть уже инструментального профиля спектрографа ОЗСП. Угол наклона луча зрения к оси вращения $i = 40^\circ$, что подтверждается магнитными измерениями при угле наклона оси диполя к оси вращения звезды $\beta = 100^\circ$.

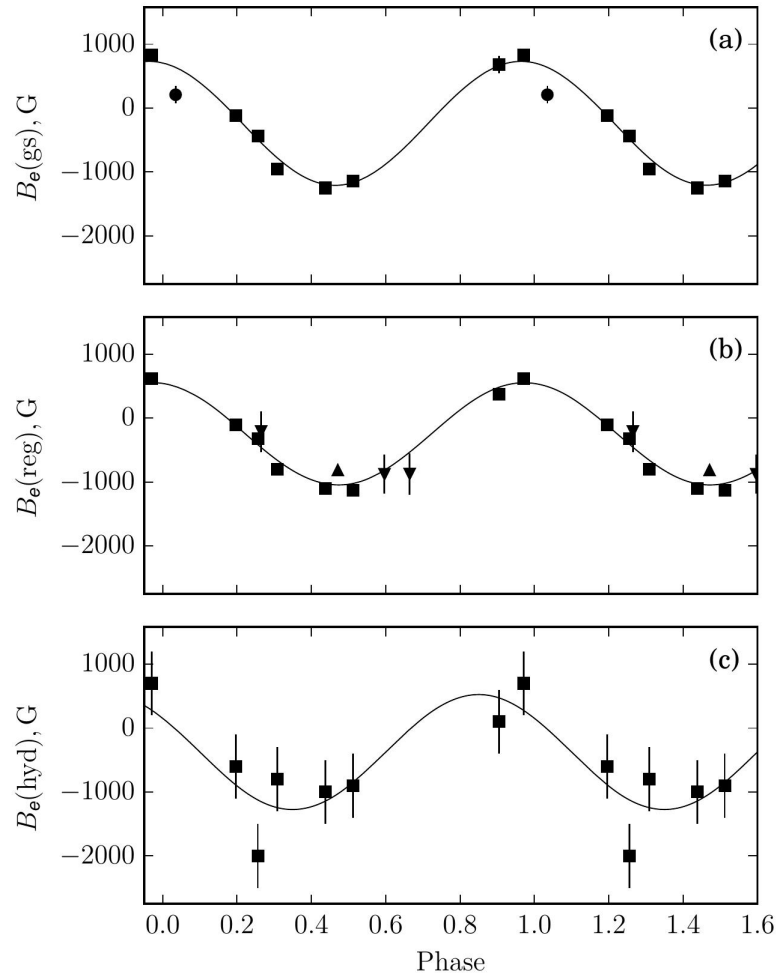


Рисунок 3.40 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 37058, построенная с периодом $P = 14.6590$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – методом регрессии (дифференциальный метод), нижний график – по измерениям, полученным по спектральной линии H_{β} .

HD 294046

HD 294046 – звезда спектрального класса B9 с усиленными линиями кремния Si. Впервые магнитное поле было зафиксировано на БТА. На ОЗСП было получено четыре спектра. В таблице 20 представлены результаты измерения магнитного поля.

Таблица 20 — Результаты измерений магнитного поля B_e для HD 294046

JD (2450000+)	$B_e(z) \pm \sigma$, Гс	$B_e(r) \pm \sigma$, Гс	$B_e(h)$, Гс	S/N
8067.4027	-1420 ± 1800	-90 ± 130	-1600	80
8068.4666	-1750 ± 680	-890 ± 130	-2300	230
8116.2500	-1500 ± 970	$+270 \pm 220$	-1100	130
8117.2729	$+3350 \pm 1120$	$+330 \pm 160$	+1100	200

Для определения периода вращения использовались фотометрические данные со спутника HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007]. С использованием этих данных был найден период $P = 0.8985767$ суток, который одинаково хорошо описывает как фотометрические (см. рис. 3.41), так и магнитные (см. рис. 3.42) измерения.

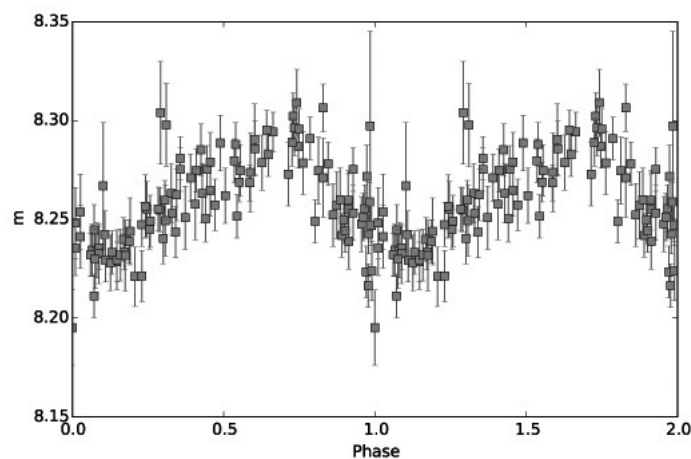


Рисунок 3.41 — Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 294046, построенная с периодом $P = 0.8985767$ суток.

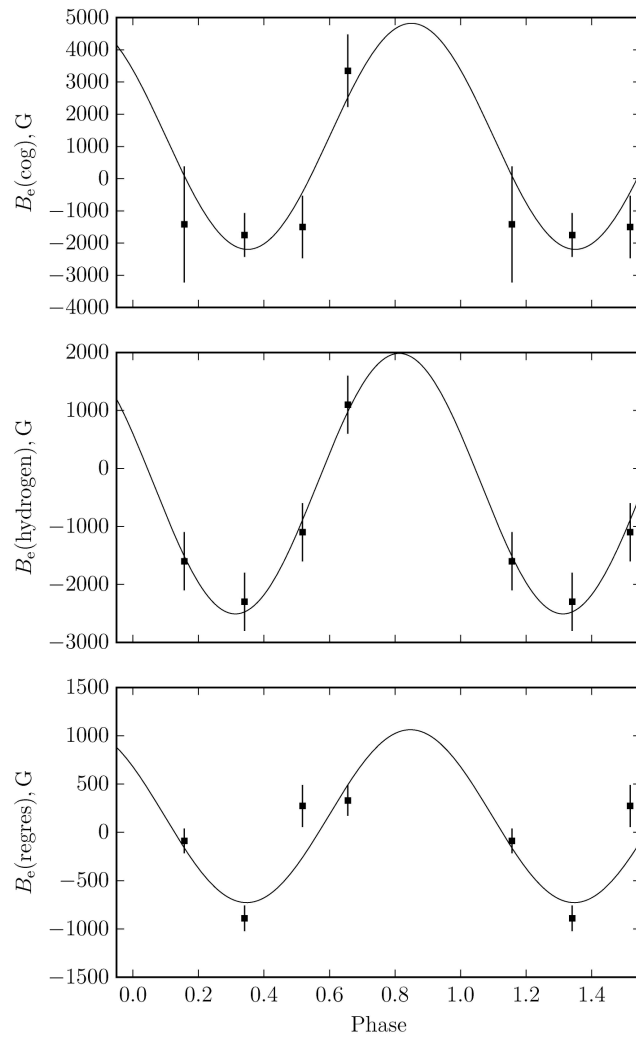


Рисунок 3.42 — Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 294046, построенная с периодом $P = 0.8985767$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график — по измерениям, полученным по спектральной линии H_{β} , нижний график — методом регрессии (дифференциальный метод).

3.3 Выводы

В результате данного исследования было открыто 30 новых магнитных звезд (21 звезда – обработка и анализ архивного материала, полученного на ОЗСП с 2009 по 2011 гг., и 9 звезд – анализ магнитных полей звезд в ассоциации Орион OB1 по спектральным материалам с ОЗСП периодом 2013-2018 гг.), что составляет 6% из всех известных. Всего на БТА было открыто 35% новых магнитных звезд ([Kudryavtsev et al, 2004; Kudryavtsev et al, 2006; Romanyuk et al, 2014a; Romanyuk et al, 2015b; Romanyuk et al, 2016b; Romanyuk et al, 2017; Romanyuk et al, 2018]). Этот результат подтверждает, что 6-м телескоп, оснащенный спектрографом ОЗСП, находится на достойном мировом уровне в области исследования звездного магнетизма.

Всего было обработано: 373 пары спектров циркулярно-поляризованного излучения для 146 звезд, из которых 106 магнитные или потенциально магнитные объекты с депрессиями на уровне 3%; 134 пары спектров циркулярно-поляризованного излучения для 60 химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1, для 11 из которых обрабатывался весь имеющийся материал.

В данной главе приведены детальные исследования двух объектов с сильными депрессиями в континууме ($\sim 5\%$): HD 5601, HD 19712. Результаты определения магнитных полей, фундаментальных параметров и химического состава по спектроскопическим данным для этих звезд были получены впервые. По фотометрическим данным спутника HIPPARCOS и магнитным измерениям с ОЗСП были найдены периоды вращения звезд. Построены магнитные модели для обеих звезд. Поля на полюсах диполей B_p составляют 10 кГс у HD 5601 и 12 кГс у HD 19712 соответственно. Поля имеют дипольную структуру, но угол наклона оси диполя к оси вращения у них отличается мало: $\beta = 116^\circ$ ($180^\circ - 116^\circ = 64^\circ$) у HD 5601; $\beta = 75^\circ$ у HD 19712, а угол наклона оси вращения: $i = 20^\circ$ у HD 5601; $i = 55^\circ$ у HD 19712. Экваториальная скорость двух звезд практически одинакова: $v_e = 77 \text{ км с}^{-1}$ у HD 5601; $v_e = 60 \text{ км с}^{-1}$ у HD

19712. Также звезды имеют одинаковые фундаментальные параметры и возраст. Однако звезды имеют разные аномалии в химическом содержании элементов: у звезды HD 5601 в среднем они на порядок больше. Также была проведена попытка оценить возраст обеих звезд: в пределах ошибок он не различается (HD 19712 - $\log t = 8.3$, HD 5601 - $\log t = 8.6$).

При сравнении исследуемых звезд с другими изученными объектами с сильными депрессиями не было выявлено корреляции. Параметры звезд с сильными депрессиями в целом различны: среди них встречаются как горячие представители (HD 45583), так и холодные (HD 178892); быстрые ротаторы (HD 45583), умеренные (HD 19712, HD 27404), медленные (HD 178892, HD 40711). Периоды вращения в целом схожи, кроме звезды HD 178892. Химическое содержание элементов различается: особо сильное отличие видно в содержании магния, кремния, титана, хрома и марганца. В целом же, химический состав типичен для Ar/Br звезд [Любимков, 1995]. Исходя из их положения на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, можно сделать вывод: все исследуемые объекты принадлежат главной последовательности; среди них есть массивный горячий молодой объект HD 45583, звезды средних масс примерно одинакового возраста HD 19712, HD 5601, HD 27404, HD 40711, и маломассивный старый объект HD 178892.

На основании измерений спектров циркулярно-поляризованного излучения, полученных на 6-м телескопе, построены кривые переменности эффективного продольного магнитного поля с периодом вращения для 11 звезд ассоциации Орион OB1. Для двух объектов из них проведено магнитное моделирование. Периоды вращения получены из анализа периодограмм, построенных по фотометрии спутника HIPPARCOS. За исключением одной звезды HD 37058, имеющей период вращения около 14 суток, все остальные являются быстрыми ротаторами с периодами вращения от 0.5 до 5 суток.

Почти все кривые V_e описываются в первом приближении синусоидой, что свидетельствует о дипольной структуре их магнитных полей. По результатам исследования звезда HD 36668 была заподозрена в недипольной структуре

магнитного поля. Можно отметить, что из 29 известных магнитных звезд в ассоциации Орион OB1 только две имеют явно недипольную структуру: HD 34736 [Semenko et al, 2014], HD 37776 [Thompson et al., 1985].

Таким образом, несмотря на молодой возраст ассоциации Орион OB1, доля магнитных химически пекулярных звезд со сложной конфигурацией поля не превышает 10%. Исходя из реликтовой теории, можно было ожидать большее число подобных объектов.

Глава 4. Фундаментальные параметры магнитных химически пекулярных звезд

К фундаментальным параметрам звезд относятся их эффективные температуры, светимости, радиусы, массы. Так как основная часть вещества Галактики сконцентрирована в звездах, то знание их фундаментальных параметров позволяет исследовать не только процессы происхождения и эволюции отдельных конкретных звезд, но и всей Галактики в целом.

В диссертационной работе изучаются фундаментальные параметры химически пекулярных звезд главной последовательности. В литературе и в разных базах данных фигурируют сведения об этих параметрах, но часто они противоречивы, содержат большие ошибки, бывают просто неверными. Используя обширный наблюдательный материал, полученный на 6-м телескопе, была предпринята попытка определить фундаментальные параметры большой выборки химически пекулярных звезд, с помощью единой методики обработки и анализа данных.

4.1 Методы определения фундаментальных параметров

4.1.1 Краткий литературный обзор

Фундаментальные параметры химически пекулярных звезд изучены слабо. Основная причина – трудоемкость этой работы, необходимость иметь спектральный материал достаточно высокого разрешения, зависимость полученного результата от применяемой методики. Спектры пекулярных звезд аномальны, имеются депрессии континуума, химический состав атмосфер отличается от

нормального, поэтому стандартные методы определения эффективной температуры, светимости, массы и радиуса не всегда дают корректный результат.

Для химически пекулярных звезд определение химического состава является наиболее сложной и важной задачей, так как спектральные пекулярности не являются результатом аномалий физических условий в их атмосферах, а имеют химическую природу [Preston, 1974]. Наиболее популярной теорией, которая объясняет наличие аномалий химических элементов, является гипотеза [Michaud, 1970], согласно которой, аномалии химического состава всех химически пекулярных звезд можно объяснить разделением химических элементов в их атмосферах вследствие механизма диффузии атомов и ионов под действием двух сил: силы тяжести, заставляющей более тяжелые элементы тонуть, и выталкивающей силы лучистого давления. Также не стоит забывать о наличии магнитного поля у Ap/Bp звезд. Магнитное поле не может влиять на движение незаряженных частиц и атомов, однако оно оказывает сильное влияние на диффузию заряженных частиц (ионов). Зеемановское расщепление увеличивает непрозрачность в частотах спектральных линий, что, в свою очередь, увеличивает силу лучевого давления в них, заставляя эти элементы "всплывать" на поверхность звезды [Michaud, 1970]. Соответственно, этому влиянию больше подвержены элементы, которые более чувствительны к магнитному полю (с высоким фактором Ланде). А неправильно подобранная модель атмосферы приводит к большим ошибкам определения многих параметров звезды.

Таким образом, особенности химического состава и присутствие магнитного поля приводят к тому, что традиционные методы определения фундаментальных параметров, которые отлично подходят для нормальных звезд, дают менее точные результаты для пекулярных звезд.

Для тестирования теории происхождения и эволюции магнитных CP-звезд необходимо из наблюдений получить зависимости магнитного поля от других параметров, таких как скорость вращения, эффективная температура, масса, светимость.

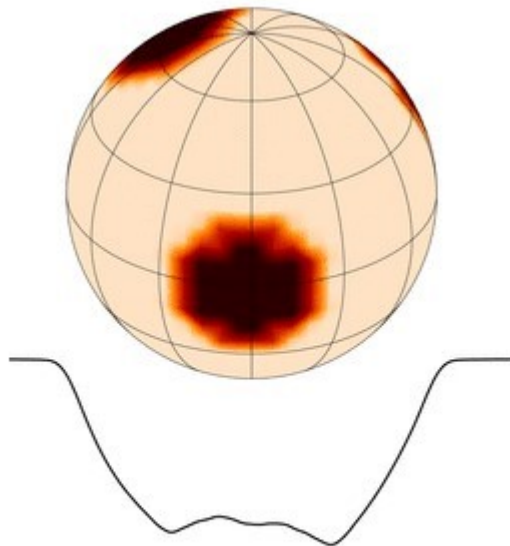


Рисунок 4.1 — Пример искажения спектральной линии при наличии пятна на поверхности звезды.

К настоящему времени нет достаточного количества надежных данных для построения подобных зависимостей. В то время как эффективную температуру звезды и ускорение силы тяжести можно получить непосредственно из наблюдений, масса, светимость и радиус вычисляются более сложным образом. Но наиболее сложным для определения параметром является возраст звезд. Обще-принятым методом его оценки является вычисление по эволюционным трекам. Для этого надо точно знать светимость звезды, а определение этого параметра имеет сложности. Во-первых, необходимо точно рассчитать межзвездное поглощение, так как неправильный учет привносит существенный вклад в определение конечной величины. Сделать это можно, например, при помощи карт распределения межзвездного вещества в плоскости Галактики (работа [Lucke, 1978]). Однако полностью учесть этот вклад не представляется возможным. Во-вторых, для определения светимости необходимо знать расстояние до объекта. Достоверно можно оценить расстояние до 300 пк. Если рассматривать звезды более далекие, то ошибка определения будет близка к 100%. В недавнем времени был введен в строй новый проект, который носит название GAIA – Global

Astrometric Interferometer for Astrophysics [Gaia Collaboration, 2016]. Это космический телескоп Европейского назначения, который пришел на смену проекту HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007]. Главная задача этого телескопа – построение подробной карты распределения звезд в нашей Галактике. Самая важная часть работы проекта – улучшение пределов определения параллакса звезд и их местоположения. Благодаря этому, можно будет оценивать расстояния до звезд с большей точностью, а это значит и точность определения светимости будет выше. Но, так как проект вступил в работу относительно недавно, данных о параллаксах звезд, например в области ассоциации Орион OB1, еще недостаточно.

Построение зависимости величины магнитного поля от возраста может иметь фундаментальное значение для построения теории эволюции магнитных звезд. По теории динамо в ядре (см. Главу 1) магнитное поле, либо должно увеличиваться с возрастом, либо не зависеть от него. Реликтовая теория же предполагает, что магнитное поле должно уменьшаться с возрастом. Разработаны различные сценарии, связанные со скоростью этого уменьшения. Для построения такой зависимости необходимо использовать надежные значения магнитных полей и других фундаментальных параметров, а также точно знать возраст. Для звезд поля эта задача трудно решаемая, так как их возраст определяется с большой ошибкой. Намного проще решать эту задачу, используя звезды, которые входят в состав скоплений разного возраста.

Еще одна проблема связана с тем, что всего известно около 450-500 магнитных химически пекулярных звезд [Romanyuk et al, 2008] и только для 50-100 из них надежно определены фундаментальные параметры. Для построения необходимых зависимостей эта выборка слишком мала.

Кроме того, параметры для одних и тех же звезд, полученные разными авторами, часто существенно различаются. Особенно сильно это заметно при использовании результатов массовой классификации. Так как она чаще всего основывается на данных фотометрии и хороша для нормальных звезд, а для химически пекулярных звезд ее использование приводит к неверным результатам.

Наиболее полным каталогом фундаментальных параметров для магнитных звезд можно считать работу [Kochukhov et al, 2006], где можно найти эффективную температуру, светимость, массу и возраст для 194 звезд. Основной метод определения фундаментальных параметров в работе [Kochukhov et al, 2006] – использование различных фотометрических систем и калибровок, что не подходит для получения точных значений параметров. Больше подобных массовых исследований для большого количества параметров не проводилось. В каталоге [Levato et al, 1996] находятся сведения о лучевых скоростях и скоростях вращения для 568 химически пекулярных звезд. В каталоге [Glagolevskij, 1994] представлены оценки эффективной температуры для 671 химически пекулярной звезды. Среди общих каталогов фундаментальных параметров можно выделить [Stevens et al, 2017; McDonald, 2017]. Но стоит отметить, что подобные каталоги часто компилятивные и их данные разнятся даже между собой, хотя все оценки параметров основаны на фотометрических системах.

Можно выделить нескольких авторов (Adelman, Fossati, Bagnulo, Landstreet, Wade, Piskunov, Kochukhov, Shulyak, Ryabchikova, Semenko, Yakunin), которые проводят индивидуальные или групповые исследования магнитных химически пекулярных звезд. Чаще всего для детального отдельного анализа выбирают уникальные объекты, поэтому при проведении общей статистики выделяется сильная селекция данных.

Наиболее полный обзор химически пекулярных звезд можно найти в каталоге [Renson, Manfroid, 2009]. В нем представлены индексы фотометрических систем Джонсона и Стремгрена, указан спектральный класс и тип пекулярности для каждой звезды.

4.1.2 Эффективная температура и ускорение силы тяжести

Эффективная температура звезды – это температура абсолютно черного тела, которое излучает с единицы поверхности в единицу времени такое же количество энергии, что и звезда. Из закона Стефана-Больцмана для чернотельного излучения вытекает прямой метод оценки эффективной температуры звезд:

$$F = \sigma T_{eff}^4, \quad (4.1)$$

где F – полный поток излучения звезды с единицы поверхности, σ – постоянная Больцмана.

Основная проблема в определении температуры этим методом заключается в том, что мы не можем получить реальное значение потока звезды, так как она удалена от нас на некоторое расстояние, то есть мы получаем только полную освещенность на уровне Земли:

$$E = \left\langle \frac{R}{d} \right\rangle^2 F, \quad (4.2)$$

где R – радиус звезды, d – расстояние до звезды.

Также свет от звезды искажается межзвездным веществом на пути к приемнику. Величины R и d определены точно только для близких 20 химически пекулярных звезд [Stepien, 1994]. Таким образом, для определения эффективной температуры более далеких звезд требуются косвенные методы.

Первый способ – это фотометрические методы определения температуры. Эти методы весьма распространены благодаря простоте реализации при сохранении достаточно высокой точности. Наиболее подробно с ними можно ознакомиться в монографии [Сахибуллин, 2003]. Эти методы подходят не только для определения эффективной температуры, но и для других фундаментальных параметров. Обычно они разбиваются на группы в зависимости от полуширины полос пропускания $\delta\lambda$:

- широкополосные $\delta\lambda > 500 \text{ \AA}$;

- среднеполосные $\delta\lambda = 100 - 500 \text{ \AA}$;
- узкополосные $\delta\lambda < 100 \text{ \AA}$.

Среди широко используемых фотометрических систем можно отметить:

- UBVRi систему Джонсона-Моргана;
- четырехцветную систему Стремгрена;
- семицветную Женевскую и Вильнюсскую системы;
- шестицветную DDO систему;
- пятицветную систему Вальравена.

В основе фотометрических методов лежит закон смещения Вина: если мы имеем видимые звездные величины звезды для двух длин волн, то их разница будет характеризовать отношение потоков для этих частот. Соответственно, изменение температуры меняет и эти отношения. Эти методы дают хорошую точность при определении температуры и ускорения силы тяжести нормальных звезд. Если мы рассматриваем звезды с аномальным химическим составом, то необходимо учитывать некоторые вещи:

- для магнитных звезд с низкими и промежуточными температурами характерно перераспределение энергии в континууме из ультрафиолетовой области в видимую, что приводит к завышенной оценке параметра;
- межзвездное поглощение, которое приводит к заниженной оценке температуры;
- присутствие депрессий в непрерывном спектре, наиболее интенсивная из которых на $\lambda = 5200 \text{ \AA}$ приводит к искажению наклона континуума, как правило, это приводит к завышенной оценке эффективной температуры.

Точность определения параметров начинает зависеть от степени химических аномалий. При больших химических аномалиях использовать фотометрические калибровки не имеет смысла. Было замечено, что аномалии увеличиваются с температурой [Kochukhov et al, 2006], [Landstreet et al, 2007]:

точность определения эффективной температуры в пределах 200 К для звезд с $T_{eff} < 8500$ К и около 500 К для звезд горячее, чем 16000 К.

Спектроскопические методы свободны от перечисленных выше недостатков фотометрии, поэтому они более надежны. Определение параметров эффективной температуры и ускорения силы тяжести проводится совместно, при анализе профилей эквивалентных ширин спектральных линий. Самый распространенный спектроскопический метод – это использование моделей атмосфер. В частности, создается сетка, состоящая из синтетических участков спектров, характеризующиеся различными наборами параметров эффективной температуры и ускорения силы тяжести. Далее, наблюдаемый участок спектра помещается в эту сетку и каким-нибудь методом, который минимизирует невязки, например, методом наименьших квадратов, достигается полное соответствие наблюдаемого участка с синтетическим. Участки чаще всего выбирают так, чтобы в него входила одна из водородных линии серии Бальмера: $H\delta$: $\lambda = 4101 \text{ \AA}$, $H\gamma$: $\lambda = 4340 \text{ \AA}$, $H\beta$: $\lambda = 4861 \text{ \AA}$ или $H\alpha$: $\lambda = 6562 \text{ \AA}$.

Для звезд с температурами выше 7500 К профиль водородной линии начинает быть чувствительным не только к изменению температуры, но и к изменению ускорения силы тяжести. Таким образом, чтобы определить параметры для горячих звезд, нам необходимо знать один из параметров. В реальности, это не всегда представляется возможным, например, для многих химически peculiarных звезд нет данных об их фундаментальных параметрах. Тогда можно поступить следующим образом: сперва строится обширная сетка с различными параметрами T_{eff} и $\log g$, затем туда помещается наблюдаемый спектр и для каждого рассчитывается невязка, затем строится трехмерная поверхность распределения невязок в зависимости от эффективной температуры и ускорения силы тяжести. Минимум этой поверхности соответствует искомым параметрам температуры и ускорения сил тяжести.

Модели атмосфер

Для того чтобы построить синтетический спектр звезды, мы должны знать параметры среды, где этот спектр формируется, т.е. параметры звездной атмосферы. Так как учесть все процессы в звезде не представляется возможным, то при расчете модели допускаются упрощения:

- атмосфера плоско-параллельная и серая (атмосфера Милна-Эддингтона);
- в атмосфере действует локальное термодинамическое равновесие (ЛТР);
- атмосфера звезды находится в статическом равновесии;
- атмосфера звезды находится в состоянии лучистого равновесия.

Эти упрощения вносят свой вклад в итоговый синтетический спектр, но если нужно провести очень точные и детальные исследования, то эти упрощения можно пересмотреть. Например, чаще всего нарушается второй пункт - ЛТР. Есть множество работ, где авторы перерабатывают и учитывают этот факт. Более подробно об этом можно прочитать в монографии Сахибуллина [Сахибуллин, 2003], или относительно химически пекулярных звезд [Piskunov et al, 2003; Korotin et al, 2018; Alexeeva et al, 2018; Sitnova et al, 2018].

С началом компьютерной эпохи были созданы различные программы расчета моделей атмосфер. В данной работе процедура реализована в программе ATLAS9 [Kurucz, 1993]. Поглощение в линиях учитывается через функцию распределения поглощения (ODF) на заданном участке длин волн. В этой программе таблицы ODF рассчитываются один раз для различного набора температур, давлений и химических составов с определенным шагом. Далее, по запросу пользователя, выбирается необходимая модель, без повторного пересчета. В случае химически пекулярных звезд все становится сложнее: необходимо учитывать химическую неоднородность, то есть химический состав не масштабируется как в солнечноподобных звездах, каждый элемент необходимо учитывать и стратификацию химических элементов [Ryabchikova et al, 2003],

а также, если звезда магнитная, то учитывать расщепление спектральных линий под действием магнитного поля.

Для анализа химического состава разработана программа расчета синтетического спектра SYNTH3 [Kochukhov, 2007], а для анализа поляризованных спектров магнитных звезд - программа SYNTHMAG [Kochukhov, 2007]. Они обе предназначены для расчета теоретических спектров, допуская описанные выше упрощения. В этих программах поверхность звезды делится на семь угловых зон, для которых происходит вычисления выходящего излучения путем численного решения скалярного уравнения переноса. SYNTHMAG делает тоже самое, но решает векторные уравнение переноса для вектора магнитного поля в каждой из зон. Вектор магнитного поля определяется тремя компонентами: радиальной составляющей, меридиональной и азимутальной. Векторное уравнение переноса заменяется параметрами Стокса, и таким образом, в SYNTHMAG определяются профили спектральных линий для простейшей модели дипольного магнитного поля.

Но для построения синтетического спектра одной модели атмосферы, где задано изменения параметров температуры, давления и химического состава с глубиной, недостаточно. Для этого еще нужен список атомарных или молекулярных линий, которые будут присутствовать на заданном диапазоне длин волн. Если исследования проводятся с магнитными химически пекулярными звездами, то в этом списке линий также должна находиться информация о расщеплении и относительной интенсивности зеемановских компонент каждой линии списка. Все это можно взять из универсальной базы данных атомных параметров спектральных линий VALD3 (Vienna Atomic Line Database) [Ryabchikova et al, 2015]. Это постоянно обновляющаяся база, и сейчас доступна уже третья ее модификация. VALD3 содержит информацию о более чем 200 млн спектральных линий, из которых около 1.2 млн линий до десятой стадии ионизации имеют точные длины волн.

Таким образом, для того чтобы построить синтетический спектр, нам надо загрузить два файла в программу расчета синтетического спектра SYNTH или

SYNTHMAG модель атмосферы, которая получена в программе ATLAS9, и список атомных параметров спектральных линий для заданного участка длин волн.

Для визуализации сравнения наблюдаемого спектра с синтетическим используется программа BINMAG [Kochukhov, 2018]. На самом деле, можно использовать любую программу, которая способна строить графики и работать с большими таблицами, но эта программа позволяет выполнять множество операций с синтетическим спектром: свернуть его с инструментальным профилем, с профилем вращения, задать лучевую скорость, измерить эквивалентную ширину линий. И это минимальный список ее функций. Программа обладает удобным и интуитивно понятным интерфейсом, что очень облегчает работу со спектральными данными.

4.1.3 Скорость и период вращения звезд

Вращение – один из важнейших фундаментальных параметров звезды. Так как звезды – это газовые шары, то вращение у них не твердотельное, а дифференциальное – центральные области вращаются с большей скоростью, чем области у ее полюсов.

Влияние вращения звезды на линии в ее спектре следующие: пусть наблюдается звезда под каким-то углом наклона к оси ее вращения i , тогда некоторые участки поверхности звезды будут приближаться к нам, а некоторые в то же время удаляться. Из-за эффекта Доплера приближающиеся участки вызовут смещение линий в спектре в фиолетовую область, а удаляющиеся – в красную, вследствие чего спектральная линия уширится. Таким образом, непосредственно из наблюдений можно оценить только проекцию скорости вращения на луч зрения $v_e \sin i$.

Для того чтобы найти экваториальную скорость вращения необходимо знать период вращения звезды и ее радиус:

$$v_e = \frac{50.6R}{P}. \quad (4.3)$$

В отличие от нормальных звезд, периоды вращения которых определить практически невозможно, химически пекулярные звезды имеют пятна на поверхности и при вращении возникает периодическая фотометрическая и спектральная переменность.

Как было отмечено в Главе 1, магнитную химически пекулярную звезду можно представить моделью наклонного ротатора. Суть этой модели в том, что магнитное поле представляется неким диполем с двумя полюсами и при вращении звезды поле меняется по синусоидальному закону. Период изменения магнитного поля равен периоду вращения звезды. Если магнитное поле носит не синусоидальный закон, то это говорит о более сложной, не дипольной структуре поля. Этот метод позволяет сразу решить две проблемы: во-первых, мы изучаем магнитную природу звезды, во-вторых, можем определить ее период вращения, а следовательно и ее экваториальную скорость вращения v_e , что очень важно для теории генерации магнитного поля.

Самый простой и легко реализуемый метод определения проекции скорости вращения звезд – это определение по полной ширине линии на половине ее максимума ($FWHM$). Более подробно этот метод описан в монографии [Сахибуллин, 2003]. Формула зависимости этих двух величин проста и справедлива для всех звезд, то есть, как для медленных ротаторов, так и для быстрых:

$$v_e \sin i = 43.47 FWHM - 11.04. \quad (4.4)$$

Так как мы рассматриваем магнитные химически пекулярные звезды, то при определении проекции скорости вращения следует учитывать магнитное уширение линий, которое зависит от степени влияния магнитного поля на химический элемент (фактора Ланде). Поэтому при оценке этого параметра целесообразно выбирать линии элементов, у которых низкий фактор Ланде. Список таких линий можно найти в работе Романюка и др. [Romanyuk, 2007] или

более расширенный вариант в работе [Romanyuk, 1984]. В таблице 21 представлен список линий, который использовался в данной работе.

Таблица 21 — Список используемых линий для оценки параметров: проекция скорости вращения $v_e \sin i$ и V_R .

Ион элемента	$\lambda, \text{Å}$	Фактор Ланде
Fe II	4402.873	0.37
Fe I	4404.750	0.64
Fe II	4472.923	0.94
Fe I	4476.075	0.58
Fe II	4491.397	0.91
Fe II	4515.333	0.99
Fe II	4576.322	0.85
Fe II	4595.673	0.04
Fe II	4598.465	0.79
Fe II	4666.749	0.49
Fe II	4923.921	0.57

Другой способ оценки проекции скорости вращения – это использование моделей атмосфер: выбирается подходящая модель атмосферы с параметрами эффективной температуры и ускорения силы тяжести, строится синтетический спектр, учитывается инструментальное уширение $\delta\lambda = \frac{\lambda}{R}$ и микротурбулентная скорость ξ_{turb} , которая в среднем для химически пекулярных звезд равна 3-4 км с⁻¹. В программе BINMAG синтетический спектр сравнивается путем подбора параметров $v_e \sin i$ и V_R с наблюдаемым так, чтобы невязки были минимальны. Эта процедура происходит автоматически, пользователю необходимо указать участки, где будет проводиться сравнение. На выходе получаем итоговые значения параметров $v_e \sin i$ и V_R .

В этом методе существуют те же проблемы, что и в предыдущем: магнитное уширение линий, а также химическая неоднородность, которая приводит к образованию пятен на поверхности звезд, где концентрируются элементы, и тогда спектральная линия в этой области будет уже, что приведет к заниженной оценке скорости вращения [Ryabchikova et al, 2003]. Также, современные программы построения синтетических спектров (SYNTHMAG) позволяют учитывать величину магнитного поля звезды, и итоговый синтетический спектр

учитывает влияние магнитного поля (рис. 4.2, 4.3, 4.4 сравнение магнитного и немагнитного спектра).

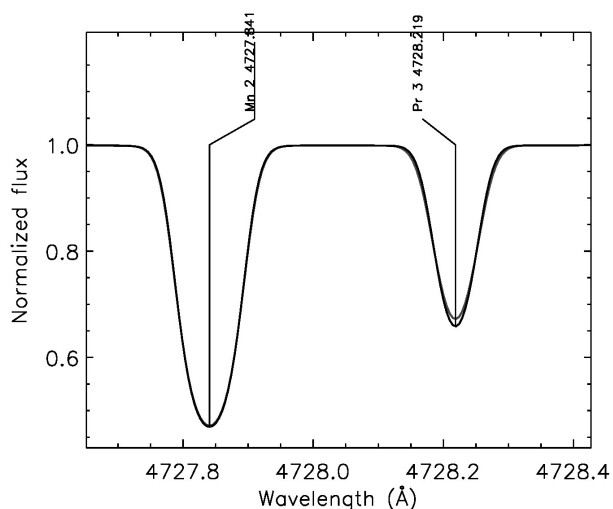


Рисунок 4.2 — Сравнение синтетических спектров с магнитным полем (серый) и без (черный). Величина поверхностного магнитного поля 1 кГс.

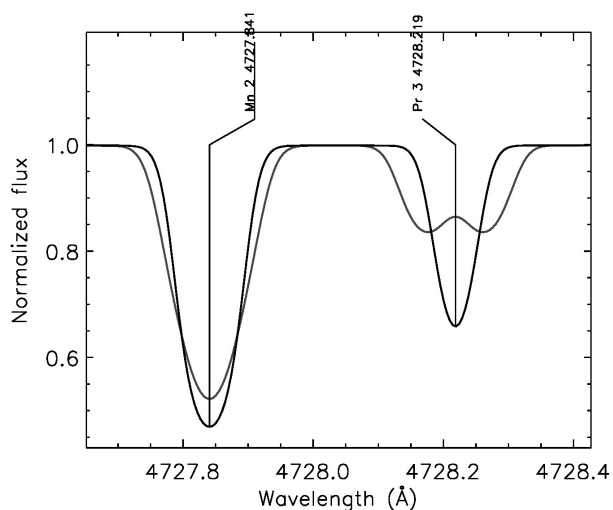


Рисунок 4.3 — Сравнение синтетических спектров с магнитным полем (серый) и без (черный). Величина поверхностного магнитного поля 5 кГс.

При изучении скоростей вращения химически пекулярных звезд была выявлена закономерность: химически пекулярные звезды вращаются медленнее нормальных при тех же значениях эффективной температуры и ускорения силы тяжести. Также было замечено, что у быстровращающихся звезд отсутствуют химические аномалии, а медленно вращающиеся Ar/Vr звезды пекулярные

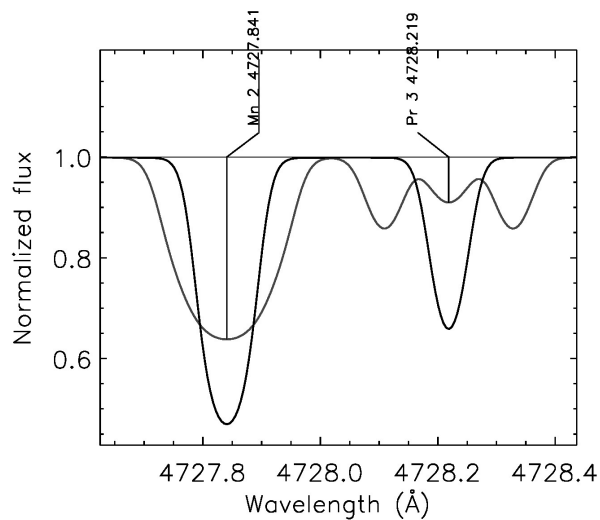


Рисунок 4.4 — Сравнение синтетических спектров с магнитным полем (серый) и без (черный). Величина поверхностного магнитного поля 10 кГс.

[Wolff et al, 1978]. В работе [Romanyuk, 2007] была показана зависимость фотометрического индекса Δa от периода вращения звезды: чем больше период вращения, тем больше индекс.

4.1.4 Светимость, масса, радиус, возраст

Светимость – это полная энергия, излученная звездой:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4, \quad (4.5)$$

где R - радиус звезды, σ - постоянная Больцмана, T_{eff} - эффективная температура звезды.

Но в реальном мире мы не можем получить чистую энергию излучения звезды, а получаем лишь ее часть, которая прошла через межзвездную среду, оптику и попала на регистрирующее устройство, у которого есть своя функция чувствительности. Таким образом, были разработаны иные методы оценки светимости звезды. Самый простой – с помощью формулы:

$$\log L/L_{\odot} = -\frac{M_V + BC - M_{bol}}{2.5} \quad (4.6)$$

где M_V - абсолютная звездная величина: $M_V = m_V + 5 + \log \pi - A_v$, BC - болометрическая поправка, A_v - коэффициент учета межзвездного поглощения: $A_v = 3.1 E_{(B-V)}$, $E_{(B-V)}$ - показатель межзвездного поглощения, который можно найти по картам распределения межзвездного вещества в Галактике. Наиболее точные оценки представлены в работе [Lucke, 1978]. Найти болометрическую поправку можно из зависимости " $BC-T_{eff}$ ". Эти зависимости хорошо известны, благодаря моделям атмосфер. Также есть большое количество работ, в которых приведены калибровки для разных спектральных классов, например, в работе [Flower, 1996]. Основные проблемы точности определения светимости были описано выше: сложность в оценке расстояния до объектов и неправильный учет межзвездного поглощения. Характерная ошибка: если рассматривать наиболее близкие звезды (до 300-400 пк), то ошибка определения светимости будет составлять 20-30%.

Массу звезды можно оценить тремя способами: по наблюдениям двойных звезд; по зависимости "масса-светимость"; по эволюционным трекам. Первый способ дает наиболее точную и правильную оценку масс, так как связан с законами Кеплера. Однако, если известны данные лишь для одного объекта системы, то можно оценить только функцию масс, которая включает массу и второго компонента. В случае применения к химически пекулярным звездам, если они входят в состав двойных систем, то чаще всего являются широкими парами [Rastegaev et al, 2014]. Чтобы построить орбиту движения такой пары, нужно много лет.

Второй способ оценки массы – использовать зависимость "масса-светимость". Этот метод подходит лишь для предварительной оценки массы. Он эмпирический и сильно зависит от качества выборки звезд, то есть, какие спектральные классы, и классы светимости использовались для построения зависимости. Наиболее подробно этот метод изложен в монографии Сахибуллина [Сахибуллин, 2003].

Последний способ – это оценка массы из светимости и ускорения свободного падения. Независимыми методами оцениваем светимость, температуру и ускорение силы тяжести $\log g$ звезды. Далее, используя формулы (4.5) и (4.7):

$$g = G \frac{M}{R^2}. \quad (4.7)$$

Метод эволюционных треков на данный момент является наиболее точным и позволяет оценить не только массу, но и возраст звезды. Положение звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рессела можно найти по двум параметрам – светимости и температуре. Промоделировав эволюционный путь, можно создать треки для звезд различных масс. Тогда два параметра, которые определяют положение звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рессела, однозначно помогут выбрать нужный эволюционный трек, а значит определить массу исследуемой звезды, и по положению на этом треке – возраст. Самые распространенные эволюционные треки можно взять из работы [Girardi et al, 2000], а для химически пекулярных звезд – из работ Женевской группы [North, Cramer, 1984].

Радиусы звезд в отдельных редких случаях можно определить непосредственно из наблюдений, по покрытию звезд Луной. Подробности можно прочитать в монографии [Сахибуллин, 2003].

Другой метод – это определение радиуса звезды, при известных параметрах светимости и эффективной температуры, по формуле (4.5). Точность определения напрямую зависит от точности этих двух параметров.

И последний способ использовать различные эмпирические зависимости "радиус-эффективная температура" "радиус-масса" и т.д. Найти их можно в работах [Ковалева и др., 2002], или в более современных [Eker et al., 2015]. Средняя точность определения радиусов звезд, так же, как и для массы, составляет примерно 20-40%.

4.2 Результаты исследования фундаментальных параметров химически пекулярных звезд поля

Спектральный материал, полученный на ОЗСП БТА, имеет среднее спектральное разрешение ($R=15000$), которое позволяет определять фундаментальные параметры химически пекулярных звезд. Для выполнения такой работы использовались как ранее полученные спектры (начиная с 2009 года), так и новые. В данном разделе будут описаны результаты измерения фундаментальных параметров первой части выборки химически пекулярных звезд, для которых нет информации об их принадлежности к скоплениям. Итоговый каталог с параметрами для первой части выборки представлен в Приложении Б. В колонках таблицы дано название звезды, юлианская дата JD (+2450000), отношение сигнал/шум каждого спектра S/N , значение эффективного продольного магнитного поля, определенное разными методами: $V_e(z)$, Гс – методом центра тяжести, $V_e(r)$, Гс – методом регрессии, $V_e(h)$, Гс – по водородной линии H_β , проекция скорости вращения звезд $v_e \sin i$, км с⁻¹, лучевая скорость V_R , км с⁻¹, эффективная температура, определенная спектральным методом T_{eff} , К, ускорение силы тяжести $\log g$, светимость $\log L/L_\odot$, масса M/M_\odot , радиус R/R_\odot .

Для того чтобы понять точность оценок фундаментальных параметров, необходимо применить использованные методы, которые были описаны в предыдущем разделе для звезд-стандартов. Для этой процедуры были выбраны γ Eri, 53 Cam, α^2 CVn. Это хорошо изученные яркие звезды. В таблице 22 представлены результаты оценок параметров.

Таблица 22 — Оценка фундаментальных параметров для звезд-стандартов. В скобках указаны литературные данные: 53 Cam [Kochukhov et al, 2004], γ Equ [Shulyak et al, 2013], α^2 CVn [Kochukhov et al, 2002].

Звезда	T_{eff} , К	$\log g$	$\log L/L_{\odot}$	M/M_{\odot}	R/R_{\odot}
γ Equ	7500 (7550)	3.7 (4.0)	1.1 (1.4)	1.7 (1.8)	2.4 (2.1)
53 Cam	8100 (8400)	4.0 (3.7)	1.5 (1.4)	1.9 (2.1)	2.3 (2.4)
α^2 CVn	11300 (11600)	3.8 (4.02)	2.1 (2.0)	2.8 (3.0)	3.5 (2.8)

Ошибки определения параметров следующие:

- ошибка проекции скорости вращения $v_e \sin i$ зависит от самого значения:
 $v_e \sin i = 20-40 \rightarrow \sigma \sim 2-5 \text{ км с}^{-1}$; $v_e \sin i = 40-80 \rightarrow \sigma \sim 5-10 \text{ км с}^{-1}$; $v_e \sin i = 80-180 \rightarrow \sigma \sim 10-20 \text{ км с}^{-1}$;
- ошибки определения лучевой скорости в среднем $\sigma V_R \sim 3-5 \text{ км с}^{-1}$;
- ошибки определения эффективной температуры по фотометрическим данным $T_{eff}(ph) \sim 300-800 \text{ К}$, по спектроскопическим - $T_{eff}(sp) \sim 200-450 \text{ К}$;
- ошибки определения ускорения силы тяжести по спектроскопическим данным $\log g \sim 0.2-0.5$;
- ошибки определения светимости сильно зависят от точности оценки расстояния и учета межзвездного поглощения, но в целом они составляют $\log L/L_{\odot} \sim 0.2-0.6$;
- ошибки определения радиусов и масс звезд примерно одинаковы: $M \sim 0.6 - 1.0 M_{\odot}$, $R \sim 0.7 - 1.2 R_{\odot}$.

Определение параметров атмосферы (эффективная температура T_{eff} и логарифм ускорения силы тяжести $\log g$) звезд выполнялось в два этапа с использованием данных фотометрии и спектроскопии. На первом этапе применялся фотометрический метод, в частности использовались фотометрические индексы системы Стремгрена $uvby\beta$. Индексы были взяты из работы [Raunzen et al, 2005]. Для того чтобы найти параметры атмосферы, использовались калибровки, которые реализованы в программе UVBYBETA_NEW [Napiwotzki et al, 1993]. В этой программе задаются индексы Стремгрена ($b - y$, m_1 , c_1 , β), и

видимая звездная величина m_V . Далее, по формулам связи, описанным в работе [Moon et al, 1985; Napiwotzki et al, 1993] рассчитываются параметры атмосфер.

На втором этапе проводилось сравнение наблюдаемого профиля линии H_β с теоретическим в сетке синтетических спектров методом наименьших квадратов. Так как для анализа были выбраны химически пекулярные звезды Ap/Bp, то химическое содержание некоторых элементов было искусственно завышено при построении синтетических спектров. В частности, было выбрано среднее содержание элементов для химически пекулярных звезд [Любимков, 1995]: завышено содержание элементов железного пика на 1 dex, редкоземельных элементов на 2 dex по отношению к солнечному. Первый способ оценки параметров необходим для определения границ использования сетки из синтетических спектров. Итоговые значения температуры и ускорения силы тяжести, которые указаны в таблице Б.2, являются результатом спектроскопического определения.

Для определения скорости вращения звезд $v_e \sin i$ использовалась стандартная формула (4.4). Затем эта величина уточнялась при помощи моделей атмосфер. Если известен радиус и период вращения звезды, тогда можно по формуле (4.3) оценить экваториальную скорость. Для того чтобы исключить влияние магнитного поля на профиль линии, скорость вращения $v_e \sin i$ оценивалась по линиям с низким фактором Ланде ($z < 1.5$).

Светимость звезд рассчитывалась по формуле (4.6). Параллаксы для звезд преимущественно были взяты из каталога, полученного миссией HIPPARCOS [van Leeuwen, 2007], но для некоторых звезд использовались параллаксы, полученные миссией GAIA [Gaia Collaboration, 2016]. Межзвездное поглощение рассчитывалось по картам распределения межзвездного вещества из работы [Lucke, 1978], а болометрическая поправка методом интерполяции из работы [Flower, 1996].

Массы и радиусы звезд определялись по формулам (4.5), (4.7), а также использовались эмпирические зависимости из работы [Eker et al., 2015]. Итоговые величины этих параметров представляют собой арифметическое среднее этих двух способов.

Таким образом, всего были определены фундаментальные параметры для 106 звезд. Для этих объектов неизвестна принадлежность к скоплениям. Преимущественно, первая часть выборки состоит как из Ар- так и из Вр-звезд. Также в нее входят звезды стандарты магнитного поля: 53 Cam, γ Equ, 52 Her, α^2 CVn, β CrB.

Для описания полученной выборки были построены гистограммы распределения параметров: эффективной температуры (рис. 4.5), ускорения силы тяжести (рис. 4.6), светимости (рис. 4.7), массы (рис. 4.8), радиуса (рис. 4.9), скорости вращения (рис. 4.10, 4.11, 4.12). При построении гистограмм использовались стандартные статистические формулы: определялись границы гистограммы, количество интервалов рассчитывалось по правилу Стерджеса $n = 1 + 3.322 \cdot \log N$, устанавливались границы интервалов и подсчитывалось количество элементов выборки в пределах границ интервала. Для анализа распределений эта величина была отнормирована и отложена по оси Y, а по оси X откладывалось значение исследуемого параметра в логарифмической шкале: если распределение логарифма выборки обладает нормальным распределением, то сама выборка описывается лог-нормальным.

В качестве статистического метода сравнения был выбран критерий согласия Пирсона (χ^2), что является наиболее оптимальным при проверке принадлежности однородной выборки данных к некоторому теоретическому закону распределения, в качестве которого использовался лог-нормальный закон. На гистограммах указаны критерии сравнения: $\chi_{emp}^2 = \sum \frac{(n_i(nabl) - n_i(theor))^2}{n_i(nabl)}$ и χ_{crit}^2 , где χ_{emp}^2 – эмпирическое значение t-критерия, χ_{crit}^2 – критическое значение t-критерия, $n_i(nabl)$ – нормированная наблюдаемая частота распределения, $n_i(theor)$ – теоретическая частота распределения. Чем меньше χ_{emp}^2 , тем более точно описывается исследуемая выборка лог-нормальным законом распределения. Как видно из гистограмм, все параметры с хорошей степенью достоверности ($\alpha = 0.005$ для выборки более 100 объектов) имеют лог-нормальное распределение. В таблице 23 представлены данные гистограмм и функции распределения.

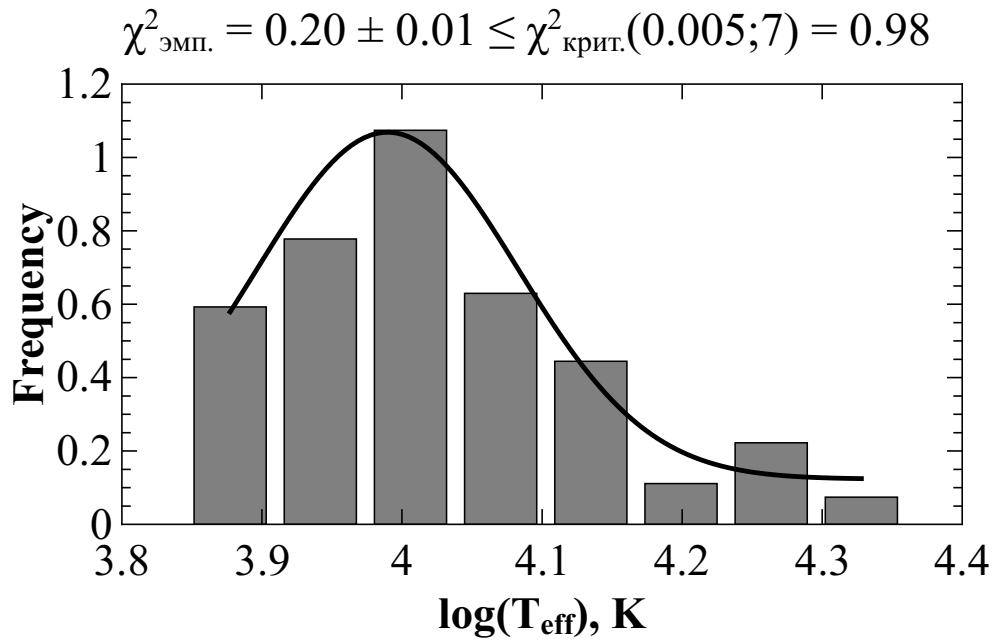


Рисунок 4.5 — Гистограмма распределения эффективных температур Ар/Вр-звезд поля.

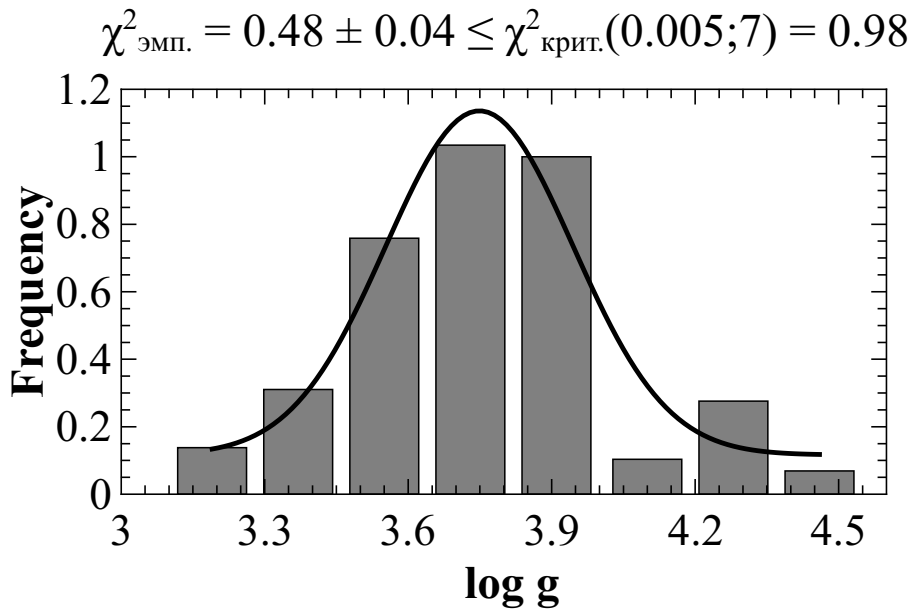


Рисунок 4.6 — Гистограмма распределения ускорения сил тяжести log g Ар/Вр-звезд поля.

Таблица 23 — Параметры гистограмм и функции распределения параметров для звезд поля.

Параметр	Значение центра интервала	Количество	Частота (нормированное количество) $n_i(\text{nabl.})$	Частота функции распределения $n_i(\text{theor.})$
$\log T_{eff}$	3.88	16	0.55	0.58
	3.94	21	0.72	0.96
	4.00	29	1.00	1.05
	4.07	17	0.59	0.76
	4.13	12	0.41	0.39
	4.20	3	0.11	0.19
	4.26	6	0.21	0.13
	4.33	2	0.07	0.13
$\log g$	3.19	4	0.13	0.13
	3.37	9	0.30	0.27
	3.55	22	0.73	0.74
	3.73	30	1.00	1.12
	3.91	29	0.97	0.85
	4.10	3	0.10	0.29
	4.26	8	0.27	0.14
	4.46	2	0.07	0.11
$\log L/L_{\odot}$	1.27	23	0.79	0.78
	1.62	29	1.00	1.03
	1.97	25	0.86	0.79
	2.32	9	0.31	0.39
	2.67	8	0.28	0.19
	3.02	6	0.21	0.15
	3.37	4	0.14	0.15
	3.72	2	0.07	0.14
$\log M/M_{\odot}$	0.16	6	0.18	0.24
	0.27	22	0.67	0.66
	0.37	33	1.00	0.98
	0.47	22	0.67	0.69
	0.57	12	0.36	0.28
	0.67	3	0.09	0.12
	0.77	6	0.18	0.11
	0.87	2	0.06	0.11
$\log R/R_{\odot}$	0.20	4	0.14	0.18
	0.31	11	0.39	0.43
	0.42	24	0.86	0.80
	0.53	28	1.00	0.99
	0.64	19	0.68	0.71
	0.75	12	0.43	0.35
	0.85	4	0.14	0.16
	0.96	4	0.14	0.11
$\log (v_e \sin i)$	1.49	12	0.80	0.74
	1.63	15	1.00	1.00
	1.78	15	1.00	0.96
	1.94	12	0.80	0.70
	2.08	5	0.33	0.35
	2.23	2	0.13	0.13
	2.38	1	0.07	0.06
	2.53	1	0.07	0.04

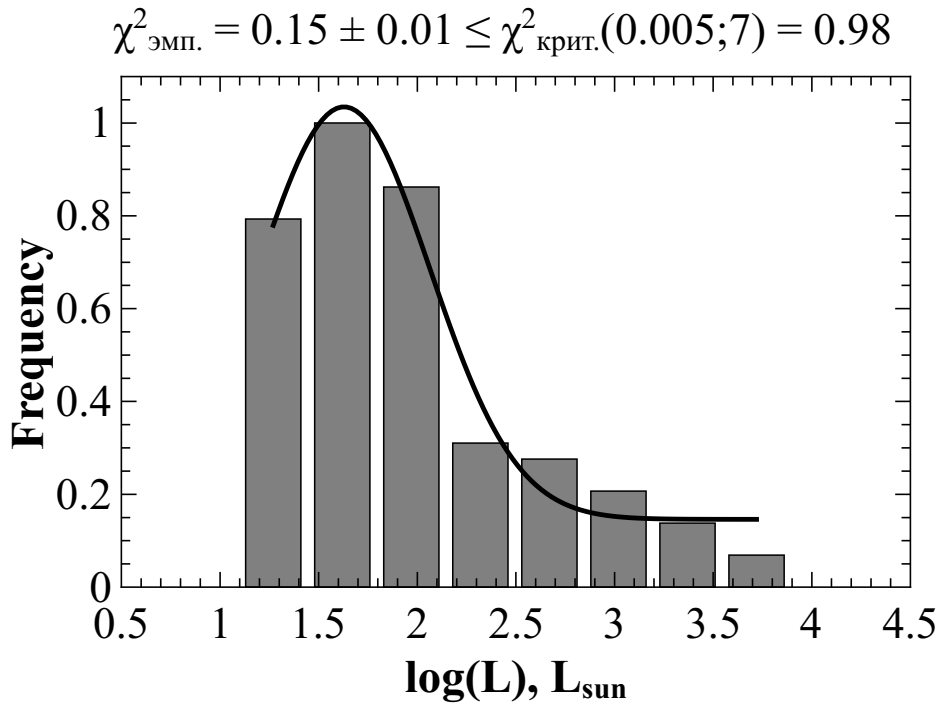


Рисунок 4.7 — Гистограмма распределения светимостей Ар/Вр-звезд поля.

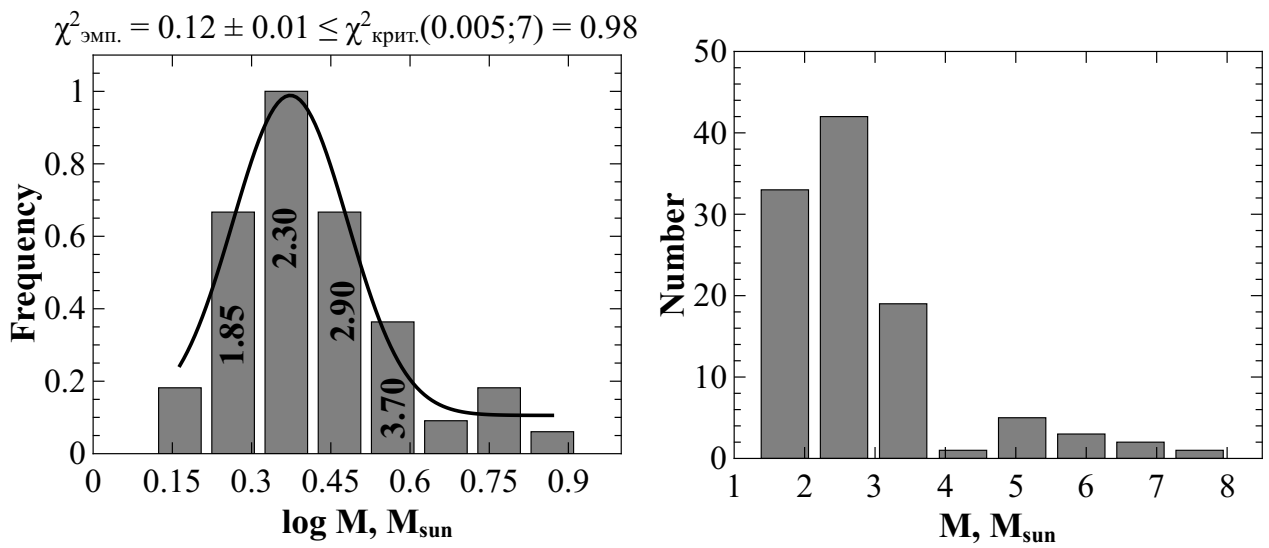


Рисунок 4.8 — Гистограмма распределения масс Ар/Вр-звезд поля.

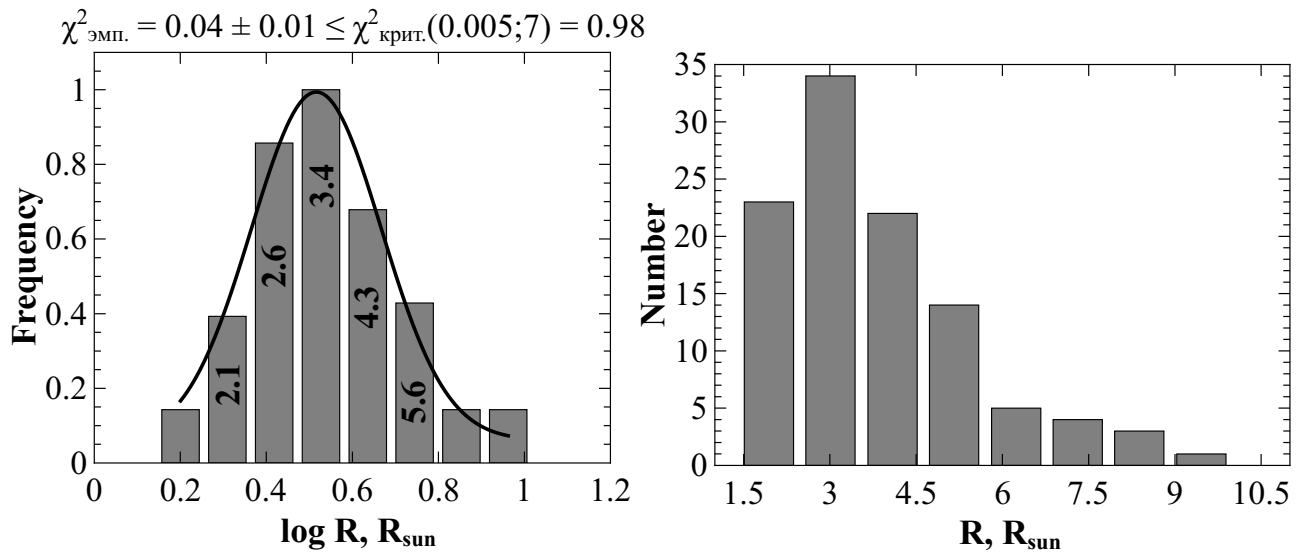


Рисунок 4.9 — Гистограмма распределения радиусов Ap/Bp-звезд поля.

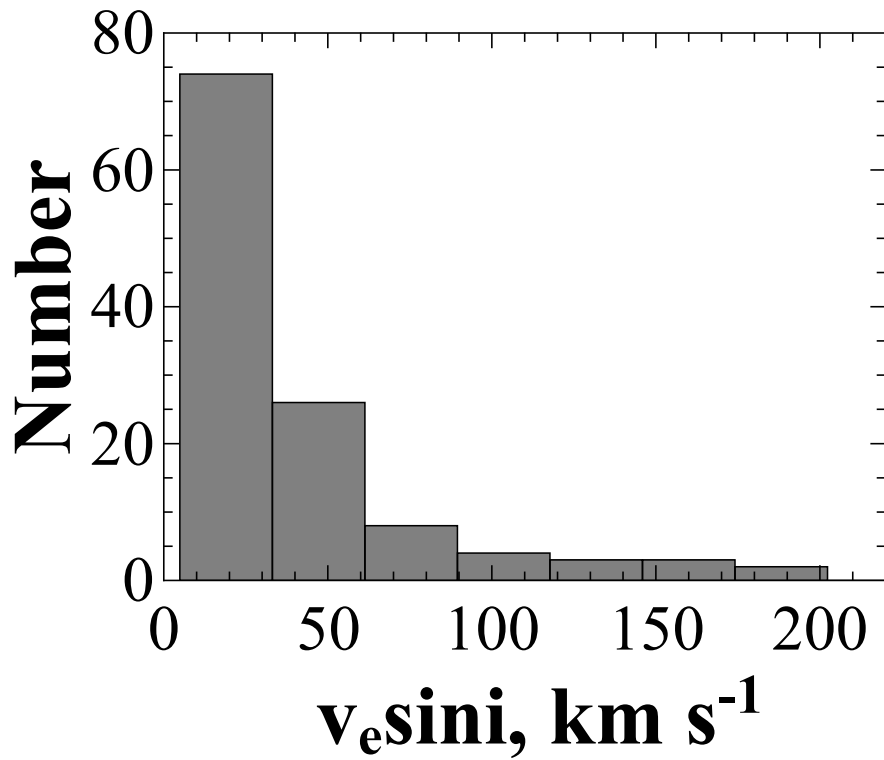


Рисунок 4.10 — Гистограмма распределения проекции скоростей вращения $v_e \sin i$ Ap/Bp-звезд поля.

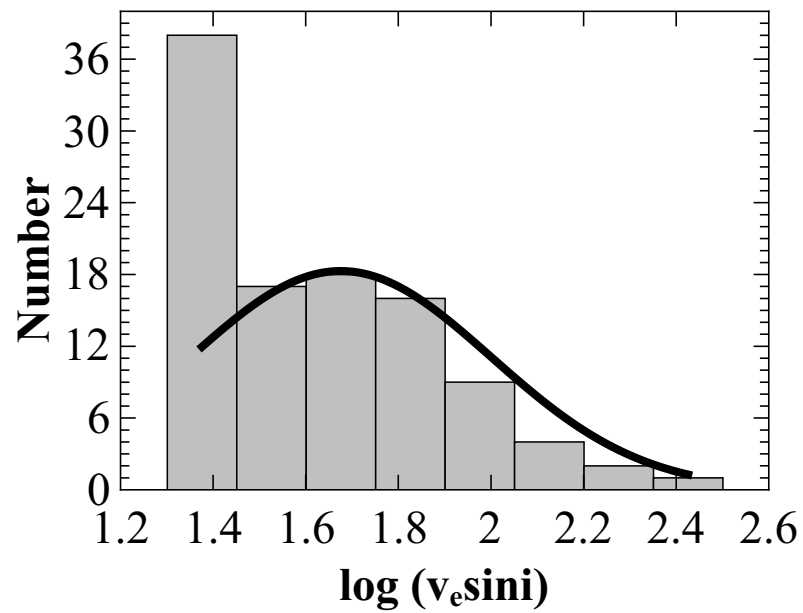


Рисунок 4.11 — Гистограмма распределения проекции скоростей вращения $\log(v_e \sin i)$ Ap/Bp-звезд поля.

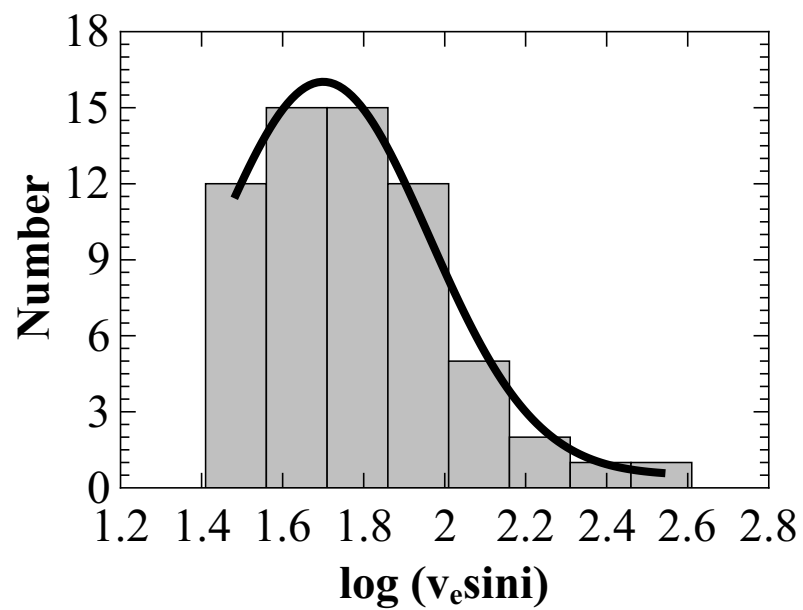


Рисунок 4.12 — Гистограмма распределения проекции скоростей вращения $\log(v_e \sin i)$ избранных Ap/Bp-звезд поля.

4.3 Резюме

В данном разделе были представлены результаты определения и анализа физических параметров: T_{eff} , $\log g$, $\log L/L_{\odot}$, M/M_{\odot} , R/R_{\odot} и $v_e \sin i$ (рис. 4.5) – (рис. 4.12), и скорости вращения для первой части выборки химически пеклярных звезд. Всего было обработано 373 спектра для 146 звезд. Для анализа были отобраны 106 магнитных или потенциально магнитных кандидата. Результаты определения фундаментальных параметров представлены в таблице Б.2. В качестве статистического метода сравнения использовался критерий Пирсона χ^2 . Этот критерий отлично подходит для описания гистограмм распределения параметров теоретическими законами распределения. В частности, в данном случае все параметры описывались лог-нормальным законом распределения (логарифмы параметров описываются нормальным распределением). Для выборки более чем 100 объектов степень значимости $\alpha = 0.005$ (99.995%). Мерой сравнения служит разница между χ_{emp}^2 и теоретической величиной χ_{crit}^2 . Как видно на рис. 4.5–4.12, все параметры имеют лог-нормальное распределение со степенью значимости $\alpha = 0.005$.

Анализ скоростей вращения отличается от исследований предыдущих параметров. На рис. 4.10 видно, что большинство звезд обладают низкими скоростями вращения, так как нижний предел обнаружения проекции скорости вращения звезд для спектрографа ОЗСП ~ 20 км с⁻¹. Соответственно, на рис. 4.11 можно увидеть искусственно завышенный пик в районе этой величины. Поэтому для анализа реального распределения параметра из первой части выборки были удалены все объекты, проекции скоростей которых меньше 30 км с⁻¹. Гистограмма для данного набора звезд показана на рис. 4.12. Распределение $\log(v_e \sin i)$ описывается нормальным законом с параметрами: $\chi_{emp}^2 = 0.03 \pm 0.01 < \chi_{crit}^2 = 0.98$.

Исходя из анализа, можно сделать следующие выводы:

- эффективная температура 63% исследуемых звезд находится в интервале $\log T_{eff}$: 3.94 (8700 K)-4.07 (11750 K), среднее значение $\log T_{eff} = 3.99(9770) \pm 0.19$ (ошибка рассчитывалась как σ/\sqrt{n} , где σ – среднеквадратичное отклонение, n – количество интервалов);
- ускорение силы тяжести 76% исследуемых звезд находится в интервале $\log g$: 3.55-3.91, среднее значение $\log g = 3.75 \pm 0.14$;
- светимости 73% исследуемых звезд находится в интервале $\log L/L_{\odot}$: 1.27-1.97, среднее значение $\log L/L_{\odot} = 1.63 \pm 0.27$;
- массы 72% исследуемых звезд находится в интервале $\log M/M_{\odot}$: 0.27 (1.9)-0.47 (2.9), среднее значение $\log M/M_{\odot} = 0.37 (2.3) \pm 0.08$;
- радиусы 67% исследуемых звезд находится в интервале $\log R/R_{\odot}$: 0.42 (2.6)-0.64 (4.4), среднее значение $\log R/R_{\odot} = 0.52 (3.3) \pm 0.11$;
- проекции скоростей вращения 87% из исследуемых 62 звезд находится в интервале $\log (v_e \sin i)$: 1.49 (30.9)-1.78 (60.3), среднее значение $\log (v_e \sin i) = 1.71 (51.3) \pm 0.18$;

4.4 Результаты исследования фундаментальных параметров химически пекулярных звезд в ассоциации Орион OB1

Исследование фундаментальных параметров звезд в рассеянных скоплениях имеет особое значение. Так как гипотеза группового рождения звезд в скоплениях хорошо обоснована и является общепринятой, то следует принять, что возраст звезды соответствует возрасту самого скопления и определяется с достаточно хорошей точностью. С другой стороны, возраст каждого объекта можно определить по эволюционным трекам и получить, таким образом, независимую оценку. Это позволяет совершенствовать модели звездной эволюции.

Для данной работы была выбрана ассоциация Орион OB1, которая насчитывает наибольшее количество химически пекулярных звезд (см. Глава 3).

Используемые методы и точности оценок были описаны в предыдущих разделах Главы 4. Результаты определения фундаментальных параметров выборки химически пекулярных звезд представлены в таблице В.3. В колонках таблицы: название звезды, в скобках указана принадлежность к подгруппе ассоциации, гелиоцентрическая юлианская дата HJD, проекция скорости вращения $v_e \sin i$, эффективная температура T_{eff} , ускорение силы тяжести $\log g$, светимость $\log L/L_\odot$, масса M/M_\odot , радиус R/R_\odot .

В работе [Brown et al, 1994] был проведен анализ принадлежности звезд к ассоциации Орион OB1. В общем итоге ассоциация насчитывает 814 объектов. Для каждой звезды, используя пятицветную фотометрическую систему Вальравена, были определены фундаментальные параметры. В статье [Romanyuk et al, 2013] авторы выделили из 814 объектов ассоциации все химически пекулярные звезды на основании их наличия в каталоге [Renson, Manfroid, 2009] (см. Главу 3). Отсюда следует, что оставшиеся звезды можно считать нормальными. Таким образом, в данном случае можно провести сравнение параметров нормальных звезд и химически пекулярных.

В работе [Romanyuk et al, 2013] было показано, что 23 Am-звезды из 85 химически пекулярных не являются членами ассоциации Орион OB1. Тогда основное население химически пекулярных звезд представляют горячие 59 Вр-звезд и 3 Ар-звезды.

Рассмотрим подробнее распределение звезд по подгруппам ассоциации и поведение фундаментальных параметров в них.

4.4.1 Поведение фундаментальных параметров в подгруппах

Для всех химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1 в период с 2009 по 2018 гг. был собран спектральный материал, полученный на ОЗСП. Процесс обработки и подготовки спектров к дальнейшему анализу подробно

изложен в Приложении А, а определение фундаментальных параметров в предыдущем разделе. Для описания и сравнения двух выборок (химически пекулярные и нормальные звезды ассоциации Орион OB1) были построены гистограммы. В качестве статистического метода сравнения с теоретическим распределением выбран критерий согласия Пирсона (χ^2). Для того чтобы сравнить средние величины выборок между собой использовался критерий Стьюдента (t-критерий). Данный критерий хорошо иллюстрирует значимость различий или сходства двух выборок между собой. Уровень значимости был выбран 0.05. Это означает, что если t_{emp} будет выше t_{crit} на уровне значимости 0.05 при соответствующей степени свободы, то исследуемые выборки различны. Данный критерий можно применять только для выборок, которые описываются нормальным распределением, поэтому в нашем случае сравниваться будут логарифмы параметров.

Проекция скорости вращения на луч зрения

Начнем анализ с проекции скорости вращения (см. рис. 4.13). К сожалению, в работе [Brown et al, 1994] нет данных о скоростях вращения нормальных звезд, поэтому сравнение проведем между подгруппами.

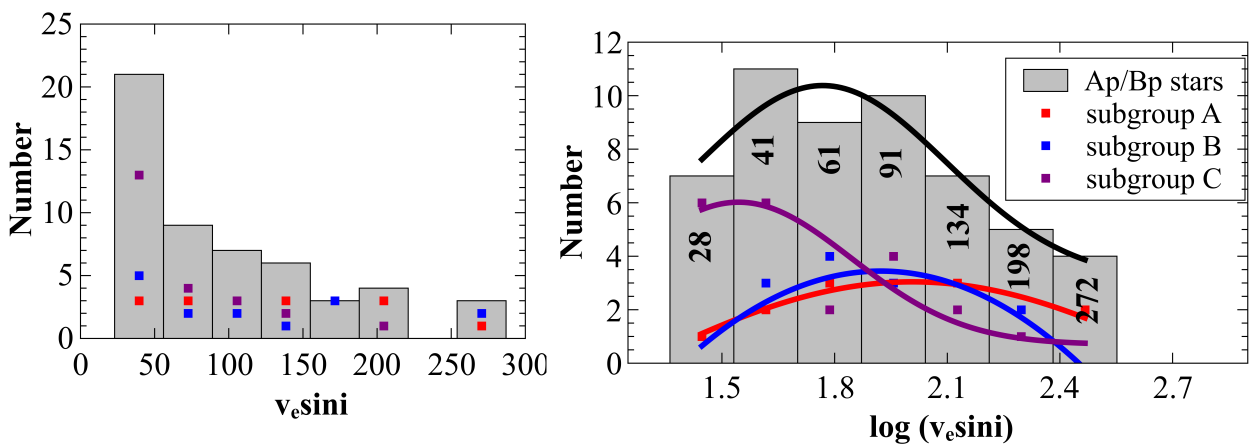


Рисунок 4.13 — Гистограмма распределения проекции скорости вращения $v_e \sin i$ Ap/Bp-звезд поля.

Левая гистограмма на рис. 4.13 показывает объединенное распределение скорости вращения для трех подгрупп А, В и С. Правая гистограмма на рис. 4.13, где по оси X отложен логарифм проекции скорости вращения, построена для статистического анализа. Данное распределение хорошо описывается нормальным законом с критериями $\chi_{emp}^2 = 0.07 \pm 0.01$ при $\chi_{crit}^2 = 0.68$ ($\alpha = 0.005$). Также на графике 4.13 нанесены функции распределения $\log(v_e \sin i)$ для каждой из подгрупп с критериями: $\chi_{emp}^2 = 0.08 \pm 0.01$, $\chi_{crit}^2 = 0.68$ ($\alpha = 0.005$) – А; $\chi_{emp}^2 = 0.35 \pm 0.04$, $\chi_{crit}^2 = 0.68$ ($\alpha = 0.005$) – В; $\chi_{emp}^2 = 0.56 \pm 0.08$, $\chi_{crit}^2 = 0.68$ ($\alpha = 0.005$) – С. По анализу функций распределения находим, что средние величины и среднеквадратичные отклонения в подгруппах следующие: $\log(v_e \sin i) = 2.01$ (102.3) ± 1.63 – А; $\log(v_e \sin i) = 1.92$ (83.2) ± 1.27 – В; $\log(v_e \sin i) = 1.54$ (34.7) ± 0.60 – С. Видно, что скорость вращения звезд в подгруппе С меньше, чем в подгруппах А и В. Для подтверждения используем критерий Стьюдента для подгрупп А и В: $t_{emp}(A, B) = 0.468 < t_{crit}(0.05; 98) = 1.985$. Это говорит о том, что различия величин между подгруппами А и В носят случайный характер и выборки можно считать одинаковыми. Для сравнения с подгруппой С усредним подгруппу А и В: $\log(v_e \sin i)(A+B) = 1.97$ (93.3) ± 1.45 . Применим критерий Стьюдента для усредненного значения и подгруппы С: $t_{emp}(A+B, C) = 2.627 > t_{crit}(0.05; 98) = 1.985$. Полученное значение больше, чем $t_{crit}(0.05; 98)$, значит различия не носят случайный характер и считаются достоверными на уровне значимости в 5%.

Причина такого поведения неизвестна: либо действительно звезды в подгруппе С вращаются медленнее, либо это связано с ориентацией осей вращения по отношению к наблюдателю. Поиск решения этой проблемы – задел на будущие исследования.

Эффективные температуры

Гистограммы распределения эффективных температур химически пекулярных и нормальных звезд ассоциации представлены на рисунке 4.14.

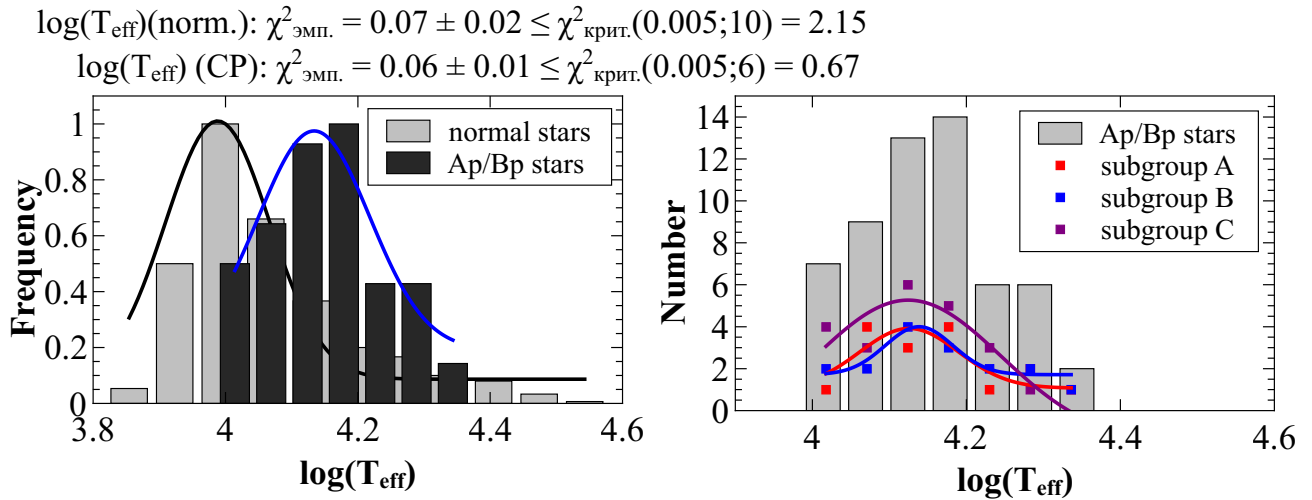


Рисунок 4.14 — Гистограммы распределения эффективной температуры нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график – отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации.

Из статистического анализа можно сделать следующие выводы.

- Полученные распределения с хорошей степенью достоверности ($\alpha = 0.005$) описываются нормальным распределением: $\log(T_{\text{eff}}(\text{norm.}))$: $\chi^2_{\text{эмп.}} = 0.07 \pm 0.02$, $\chi^2_{\text{крит.}} = 2.15$, $\log(T_{\text{eff}}(\text{CP}))$: $\chi^2_{\text{эмп.}} = 0.06 \pm 0.01$, $\chi^2_{\text{крит.}} = 0.67$.
- Максимум функции распределения и среднеквадратичное отклонение для нормальных звезд находятся на $\log(T_{\text{eff}}(\text{norm.})) = 3.99$ (9772 K) ± 0.16 , а для химически пекулярных – на $\log(T_{\text{eff}}(\text{CP})) = 4.13$ (13490 K) ± 0.17 .
- Критерий Стьюдента для сравнения средних значений логарифма эффективной температуры нормальных звезд и химически пекулярных: $t_{\text{эмп.}} = 5.937 > t_{\text{крит.}}(0.05; 98) = 1.985$. Выборки различны на уровне значимости 5%.

- Максимумы функций распределений и среднеквадратичные отклонения в подгруппах: $\log(T_{eff}(A)) = 4.13$ (13490 K) ± 0.13 ; $\log(T_{eff}(B)) = 4.14$ (13800 K) ± 0.09 ; $\log(T_{eff}(C)) = 4.12$ (13180 K) ± 0.09 .
- Критерий Стьюдента для подгрупп: $t_{emp}(A, B) = 0.626 < t_{crit}(0.05; 98) = 1.985$; $t_{emp}(A+B, C) = 1.045 < t_{crit}(0.05; 98) = 1.985$. Различия носят случайный характер, выборки между собой схожи.

Ускорение силы тяжести

Гистограммы распределения ускорения силы тяжести химически пекулярных и нормальных звезд ассоциации представлены на рис. 4.15.

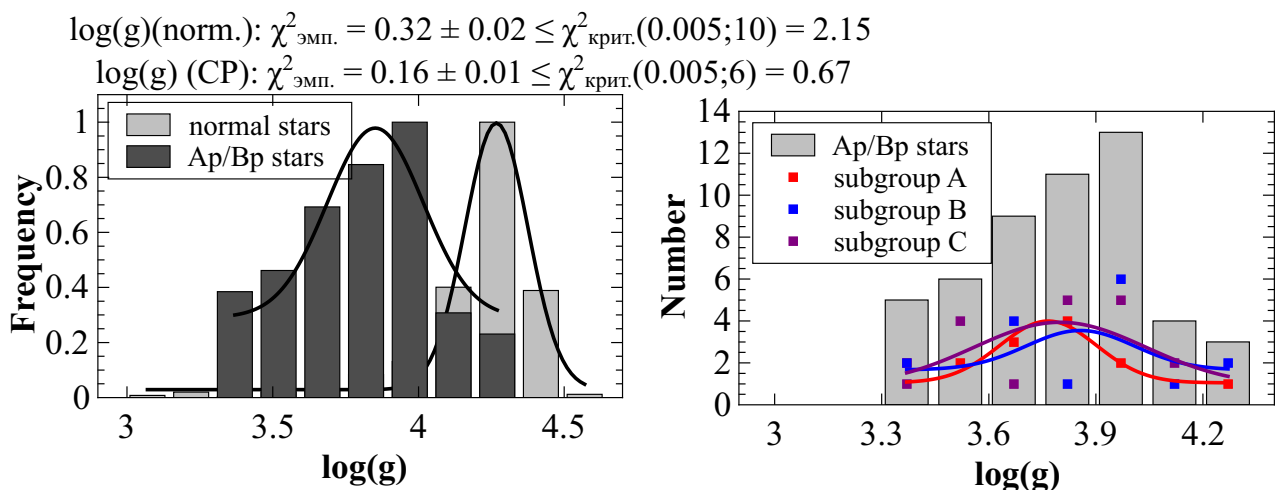


Рисунок 4.15 — Гистограммы распределения ускорения силы тяжести нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) звезд ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график – отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации.

Из статистического анализа можно сделать следующие выводы.

- Полученные распределения с хорошей степенью достоверности ($\alpha = 0.005$) описываются нормальным распределением: $\log g(\text{norm.}): \chi^2_{\text{эмп.}} = 0.32 \pm 0.02$, $\chi^2_{\text{крит.}} = 2.15$, $\log g(\text{CP}): \chi^2_{\text{эмп.}} = 0.16 \pm 0.01$, $\chi^2_{\text{крит.}} = 0.67$).

- Максимум функции распределения и среднеквадратичное отклонение для нормальных звезд находится на $\log g$ (norm.) = 4.27 ± 0.22 , а для химически пекулярных – на $\log g$ (CP) = 3.85 ± 0.23 .
- Критерий Стьюдента для сравнения средних значений $\log g$ нормальных звезд и химически пекулярных: $t_{emp.} = 13.063 > t_{crit.}(0.05; 98) = 1.985$. Выборки различны на уровне значимости 5%.
- Максимумы функций распределений и среднеквадратичные отклонения в подгруппах: $\log g$ (A) = 3.77 ± 0.27 ; $\log g$ (B) = 3.83 ± 0.31 ; $\log g$ = 3.80 ± 0.28 .
- Критерий Стьюдента для подгрупп: $t_{emp.}(B, C) = 0.711 < t_{crit.}(0.05; 98) = 1.985$; $t_{emp.}(B+C, A) = 1.114 < t_{crit.}(0.05; 98) = 1.985$. Различия носят случайный характер, выборки между собой схожи.

Светимость

Гистограммы распределения светимости химически пекулярных и нормальных звезд ассоциации представлены на рис. 4.16.

Подгруппа С наиболее подвержена межзвездному поглощению, так как некоторые звезды находятся в туманности Ориона.

Из статистического анализа можно сделать следующие выводы.

- Полученные распределения с хорошей степенью достоверности ($\alpha = 0.005$) описываются нормальным распределением: $\log L/L_{\odot}$ (norm.): $\chi_{emp}^2 = 0.57 \pm 0.02$, $\chi_{crit}^2 = 2.15$, $\log L/L_{\odot}$ (CP): $\chi_{emp}^2 = 0.04 \pm 0.01$, $\chi_{crit}^2 = 0.67$).
- Максимум функции распределения и среднеквадратичное отклонение для нормальных звезд находится на $\log L/L_{\odot}$ (norm.) = 1.59 ± 0.28 , а для химически пекулярных на $\log L/L_{\odot}$ (CP) = 2.18 ± 0.34 .

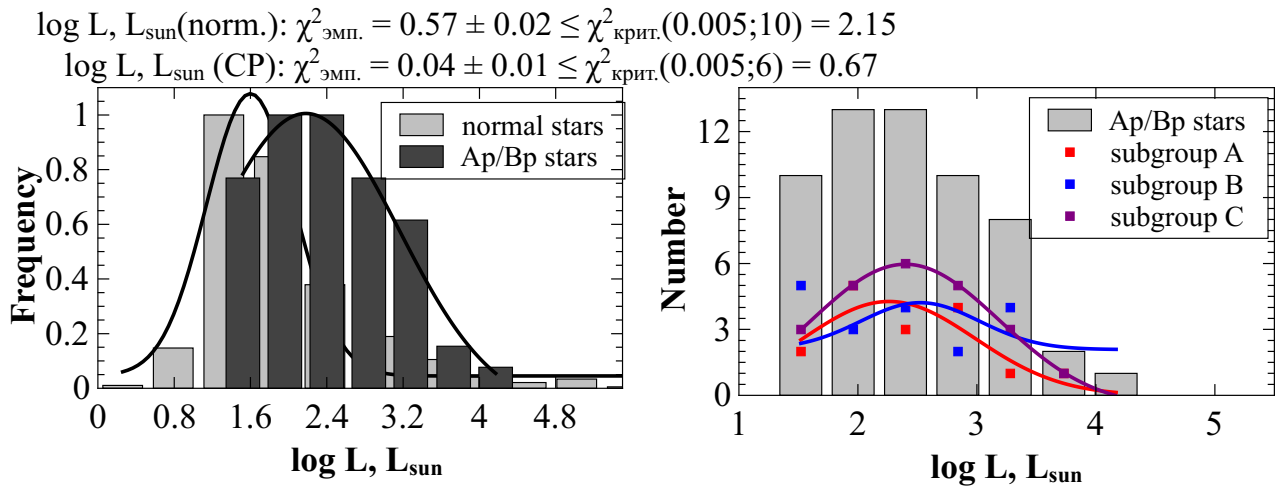


Рисунок 4.16 — Гистограммы распределения светимости нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) звезд ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график – отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации.

– Критерий Стьюдента для сравнения средних значений \log

$$L/L_{\odot}$$

нормальных звезд и химически пекулярных: $t_{\text{emp}} = 13.261 > t_{\text{crit}}(0.05; 98) = 1.985$. Выборки различны на уровне значимости 5%.

– Максимумы функций распределений в подгруппах и среднеквадратичные отклонения: $\log L/L_{\odot}$ (A) = 2.26 ± 0.54 ; $\log L/L_{\odot}$ (B) = 2.52 ± 0.81 ; $\log L/L_{\odot} = 2.39 \pm 0.59$.

– Критерий Стьюдента для подгрупп: $t_{\text{emp}}(\text{A, C}) = 1.609 < t_{\text{crit}}(0.05; 98) = 1.985$; $t_{\text{emp}}(\text{A+C, B}) = 1.971 < t_{\text{crit}}(0.05; 98) = 1.985$. Различия носят случайный характер, выборки между собой схожи.

Масса

Гистограммы распределения массы химически пекулярных и нормальных звезд ассоциации представлены на рис. 4.17.

Из статистического анализа можно сделать следующие выводы:

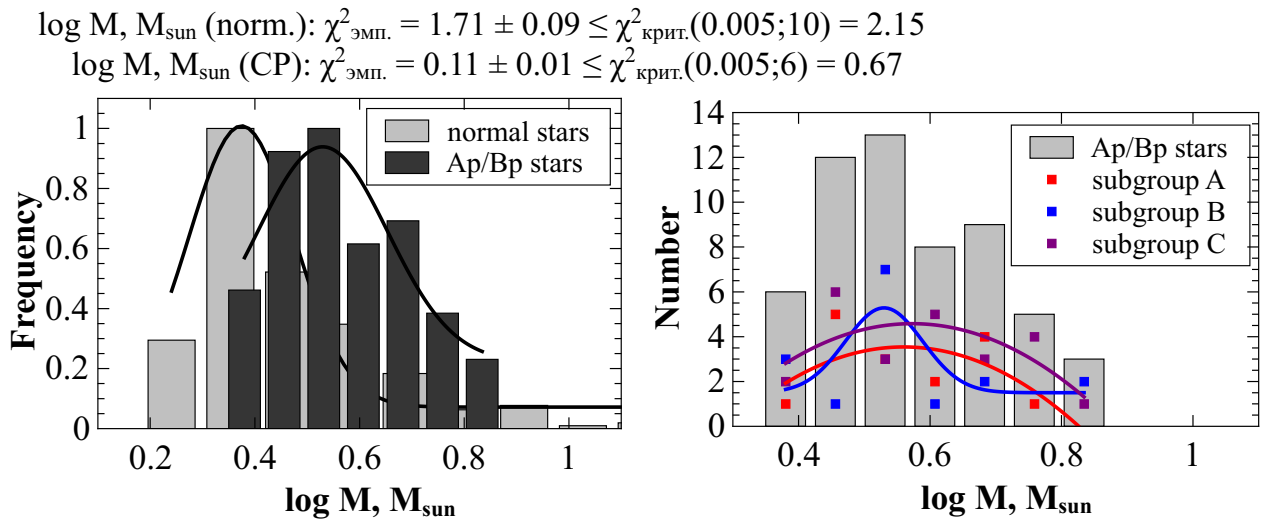


Рисунок 4.17 — Гистограммы распределения массы нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) звезд ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график – отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации.

- Полученные распределения с хорошей степенью достоверности ($\alpha = 0.005$) описываются нормальным распределением: $\log M/M_{\odot}$ (norm.): $\chi^2_{\text{emp}} = 1.71 \pm 0.09$, $\chi^2_{\text{crit}} = 2.15$, $\log M/M_{\odot}$ (CP): $\chi^2_{\text{emp}} = 0.11 \pm 0.01$, $\chi^2_{\text{crit}} = 0.67$.
- Максимум функции распределения для нормальных звезд находится на $\log M/M_{\odot}$ (norm.) = $0.38 (2.4) \pm 0.11$, а для химически пекулярных – на $\log M/M_{\odot}$ (CP) = $0.53 (3.4) \pm 0.14$.
- Критерий Стьюдента для сравнения средних значений $\log M/M_{\odot}$ нормальных звезд и химически пекулярных: $t_{\text{emp}} = 8.341 > t_{\text{crit}}(0.05; 98) = 1.985$. Выборки различны на уровне значимости 5%.
- Максимумы функций распределений в подгруппах: $\log M/M_{\odot}$ (A) = $0.56 (3.6) \pm 0.27$; $\log M/M_{\odot}$ (B) = $0.53 (3.4) \pm 0.12$; $\log M/M_{\odot}$ (C) = $0.57 (3.7) \pm 0.32$.
- Критерий Стьюдента для подгрупп: $t_{\text{emp}}(\text{A, C}) = 0.236 < t_{\text{crit}}(0.05; 98) = 1.985$; $t_{\text{emp}}(\text{A+C, B}) = 1.088 < t_{\text{crit}}(0.05; 98) = 1.985$. Различия носят случайный характер, выборки между собой схожи.

Радиус

Гистограммы распределения радиуса химически пекулярных и нормальных звезд ассоциации представлены на рис. 4.18.

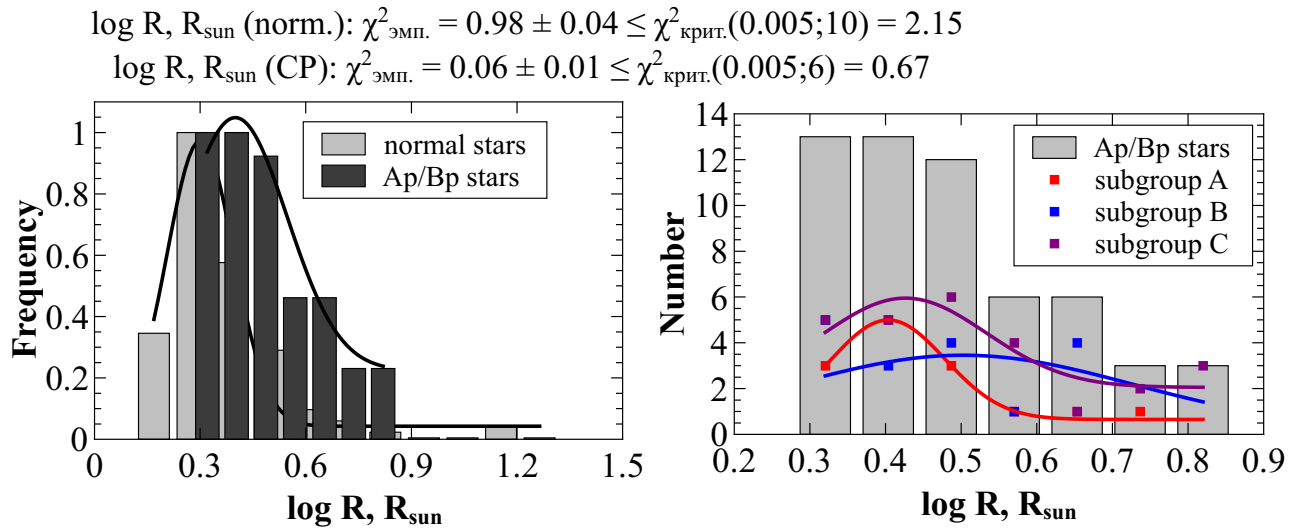


Рисунок 4.18 — Гистограммы распределения массы нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) звезд ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график — отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации.

Из статистического анализа можно сделать выводы:

- Полученные распределения с хорошей степенью достоверности ($\alpha = 0.005$) описываются нормальным распределением: $\log R/R_{\odot}$ (norm.): $\chi^2_{\text{эмп.}} = 0.98 \pm 0.04$, $\chi^2_{\text{крит.}} = 2.15$, $\log R/R_{\odot}$ (CP): $\chi^2_{\text{эмп.}} = 0.06 \pm 0.01$, $\chi^2_{\text{крит.}} = 0.67$.
- Максимум функции распределения для нормальных звезд находится на $\log R/R_{\odot}$ (norm.) = $0.31 (2.0) \pm 0.19$, а для химически пекулярных на $\log R/R_{\odot}$ (CP) = $0.44 (2.8) \pm 0.21$.
- Критерий Стьюдента для сравнения средних значений $\log R/R_{\odot}$ нормальных звезд и химически пекулярных: $t_{\text{эмп.}} = 4.544 > t_{\text{крит.}}(0.05; 98) = 1.985$. Выборки различны на уровне значимости 5%.

- Максимумы функций распределений в подгруппах: $\log R/R_{\odot}$ (A) = 0.41 (2.6) \pm 0.24; $\log R/R_{\odot}$ (B) = 0.48 (3.2) \pm 0.25; $\log R/R_{\odot}$ = 0.43 (2.7) \pm 0.23.
- Критерий Стьюдента для подгрупп: $t_{emp}(A, C) = 0.596 < t_{crit}(0.05; 98) = 1.985$; $t_{emp}(A+C, B) = 1.731 < t_{crit}(0.05; 98) = 1.985$. Различия носят случайный характер, выборки между собой схожи.

4.5 Резюме

Сравнение с общей выборкой нормальных звезд в ассоциации показывает, что среди химически пекулярных Ap/Vp-звезд нет холодных Ar-звезд. Таким образом, они имеют большие температуры, светимости, массы, радиусы, но меньшие ускорения силы тяжести на уровне значимости 5%. Не было найдено систематических различий между параметрами в подгруппах, кроме проекции скорости вращения: в подгруппе C средняя величина скорости меньше, чем в двух других (таблица 24).

Таблица 24 — Фундаментальные параметры выборок и значения t-критерия.

Параметр	Значение $\pm \sigma$	Значение $t_{emp.}$ ($t_{crit.}(0.05; 98) = 1.985$)
$\log T_{eff}(\text{norm.})$	$3.99 (9772 \text{ K}) \pm 0.16$	$t_{emp.} = 5.937$
$\log T_{eff}(\text{CP})$	$4.13 (13490 \text{ K}) \pm 0.17$	
$\log T_{eff}(\text{A})$	$4.13 (13490 \text{ K}) \pm 0.13$	$t_{emp.}(\text{A, B}) = 0.626$ $t_{emp.}(\text{A+B, C}) = 1.045$
$\log T_{eff}(\text{B})$	$4.14 (13800 \text{ K}) \pm 0.09$	
$\log T_{eff}(\text{C})$	$4.12 (13180 \text{ K}) \pm 0.09$	
$\log g (\text{norm.})$	4.27 ± 0.22	$t_{emp.} = 13.063$
$\log g (\text{CP})$	3.85 ± 0.23	
$\log g (\text{A})$	3.77 ± 0.27	$t_{emp.}(\text{B, C}) = 0.71$ $t_{emp.}(\text{B+C, A}) = 1.114$
$\log g (\text{B})$	3.83 ± 0.31	
$\log g (\text{C})$	3.80 ± 0.28	
$\log L/L_{\odot} (\text{norm.})$	1.59 ± 0.28	$t_{emp.} = 13.261$
$\log L/L_{\odot} (\text{CP})$	2.18 ± 0.34	
$\log L/L_{\odot} (\text{A})$	2.26 ± 0.54	$t_{emp.}(\text{A, C}) = 1.609$ $t_{emp.}(\text{A+C, B}) = 1.971$
$\log L/L_{\odot} (\text{B})$	2.52 ± 0.81	
$\log L/L_{\odot} (\text{C})$	2.39 ± 0.59	
$\log M/M_{\odot} (\text{norm.})$	$0.38 (2.4) \pm 0.11$	$t_{emp.} = 8.341$
$\log M/M_{\odot} (\text{CP})$	$0.53 (3.4) \pm 0.14$	
$\log M/M_{\odot} (\text{A})$	$0.56 (3.6) \pm 0.27$	$t_{emp.}(\text{A, C}) = 0.236$ $t_{emp.}(\text{A+C, B}) = 1.088$
$\log M/M_{\odot} (\text{B})$	$0.53 (3.4) \pm 0.12$	
$\log M/M_{\odot} (\text{C})$	$0.57 (3.7) \pm 0.32$	
$\log R/R_{\odot} (\text{norm.})$	$0.31 (2.0) \pm 0.19$	$t_{emp.} = 4.544$
$\log R/R_{\odot} (\text{CP})$	$0.44 (2.8) \pm 0.21$	
$\log R/R_{\odot} (\text{A})$	$0.41 (2.6) \pm 0.24$	$t_{emp.}(\text{A, C}) = 0.596$ $t_{emp.}(\text{A+C, B}) = 1.731$
$\log R/R_{\odot} (\text{B})$	$0.48 (3.2) \pm 0.25$	
$\log R/R_{\odot} (\text{C})$	$0.43 (2.7) \pm 0.23$	
$\log (v_e \sin i)(\text{A})$	$2.01 (102.3) \pm 1.63$	$t_{emp.}(\text{A, B}) = 0.468$ $t_{emp.}(\text{A+B, C}) = 2.627$
$\log (v_e \sin i)(\text{B})$	$1.92 (83.2) \pm 1.27$	
$\log (v_e \sin i)(\text{C})$	$1.54 (34.7) \pm 0.60$	

4.6 Выводы

В данной Главе были подробно описаны используемые в данной диссертационной работе методы определения фундаментальных параметров химически пекулярных звезд. Эти методы были применены для звезд стандартов: 53 Cam, γ Eri и α^2 CVn. Полученные параметры находятся в хорошем согласии с результатами определения другими авторами [Kochukhov et al, 2004; Shulyak et al, 2013; Kochukhov et al, 2002]. Также были приведены типичные ошибки определения фундаментальных параметров, при использовании спектрального материала, полученного на 6-м телескопе при помощи спектрографа ОЗСП, и литературных данных.

В итоге были проанализированы фундаментальные параметры большой выборки химически пекулярных звезд. Первая часть выборки состоит из 146 звезд. Наблюдательный материал был получен в 2009-2011 гг. на 6-м телескопе по программе поиска новых магнитных звезд среди объектов с сильными депрессиями в континууме. Из них 106 – химически пекулярные звезды поля, исследование которых было описано в Главе 3, и 40 – либо стандарты различных типов, либо известные члены скоплений, анализа которых не проводилось в рамках данной диссертационной работы. Результаты определения фундаментальных параметров представлены в таблице Б.2.

Для анализа распределения фундаментальных параметров и скорости вращения были построены гистограммы: эффективной температуры (рис. 4.5), ускорения силы тяжести (рис. 4.6), светимости (рис. 4.7), массы (рис. 4.8), радиуса (рис. 4.9), скорости вращения (рис. 4.10, 4.11, 4.12). При построении гистограмм использовались стандартные статистические формулы: определялись границы гистограммы; количество интервалов рассчитывалось по правилу Стерджеса $n = 1 + 3.322 \cdot \log N$; устанавливались границы интервалов и подсчитывалось количество элементов выборки в этих пределах. Для описания распределений эта величина была отнормирована и отложена по оси Y, а по

оси X откладывалось значение исследуемого параметра в логарифмической шкале: выборка описывается лог-нормальным распределением, если логарифм исследуемого параметра обладает нормальным распределением. В качестве статистического метода сравнения был выбран критерий согласия Пирсона (χ^2), что является наиболее оптимальным при проверке принадлежности однородной выборки данных к некоторому теоретическому закону распределения, в качестве которого использовался лог-нормальный закон.

В результате оказалось, что все исследуемые параметры описываются лог-нормальным законом распределения (логарифмы параметров имеют нормальное распределение. Исходя из анализа функций распределения параметров, можно сделать следующие выводы:

- эффективная температура 63% исследуемых звезд находится в интервале $\log T_{eff}$: 3.94 (8700 К)-4.07 (11750 К), среднее значение $\log T_{eff} = 3.99(9770) \pm 0.19$ (ошибка рассчитывалась как σ/\sqrt{n} , где σ – среднеквадратичное отклонение, n – количество интервалов);
- ускорение силы тяжести 76% исследуемых звезд находится в интервале $\log g$: 3.55-3.91, среднее значение $\log g = 3.75 \pm 0.14$;
- светимости 73% исследуемых звезд находится в интервале $\log L/L_{\odot}$: 1.27-1.97, среднее значение $\log L/L_{\odot} = 1.63 \pm 0.27$;
- массы 72% исследуемых звезд находится в интервале $\log M/M_{\odot}$: 0.27 (1.9)-0.47 (2.9), среднее значение $\log M/M_{\odot} = 0.37 (2.3) \pm 0.08$;
- радиусы 67% исследуемых звезд находится в интервале $\log R/R_{\odot}$: 0.42 (2.6)-0.64 (4.4), среднее значение $\log R/R_{\odot} = 0.52 (3.3) \pm 0.11$;
- проекции скоростей вращения 87% из исследуемых 62 звезд находится в интервале $\log (v_e \sin i)$: 1.49 (30.9)-1.78 (60.3), среднее значение $\log (v_e \sin i) = 1.71 (51.3) \pm 0.18$;

Другое направление исследований – изучение фундаментальных параметров полной выборки химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1. Она состоит из 60 объектов, из которых 59 – Вр-звезды и 1 – Ар, что находится в контрасте с выборкой звезд, имеющих большие депрессии, где больше Ар-звезд,

чем Вр. Спектральный материал является однородным и был получен на 6-м телескопе в период 2009-2018 гг. Обработка подробно описана в Приложении А и Главе 2. Методика определения фундаментальных параметров подробно описана в Разделе 4.1 данной Главы. Так как в работе [Brown et al, 1994] приведены фундаментальные параметры для нормальных звезд ассоциации, а в работе [Romanuyk et al, 2013] авторы выбрали все химически пекулярные звезды, то в данном случае будет уместно провести сравнение этих двух рядов (фундаментальных параметров нормальных звезд с химически пекулярными).

Как и для предыдущей части выборки, для анализа распределения фундаментальных параметров были построены гистограммы (эффективные температуры на рис. 4.14, ускорения силы тяжести на рис. 4.15, светимости на рис. 4.16, массы на рис. 4.17, радиуса на рис. 4.18, скорости вращения на рис. 4.13). Для описания полученных распределений привлекался критерий Пирсона χ^2 . Все параметры, в том числе и у нормальных звезд, подчиняются лог-нормальному закону распределения. Для сравнения средних величин двух выборок использовался критерий Стьюдента. Так как условием его использования является наличие нормального распределения выборки, то анализ сделан для логарифмов параметров.

В результате, были сделаны следующие выводы:

- не было найдено холодных Ар-звезд среди химически пекулярных объектов;
- параметры химически пекулярных Ар/Вр-звезд отличаются от нормальных на уровне значимости в 5% (таблица 24);
- не замечено систематических различий между параметрами в подгруппах А, В, С;
- исключение составляет проекции скоростей вращения $v_e \sin i$: в подгруппе С со степенью значимости 5% $v_e \sin i$ меньше на 78%, чем в подгруппе А и В.

Заключение

В ходе диссертационной работы были решены все поставленные задачи и достигнуты поставленные цели.

Для их выполнения был обработан уже имевшийся наблюдательный материал (373 спектра циркулярно-поляризованного излучения), полученный для звезд с аномалиями в распределении энергии в континууме (3%), по программе поиска новых магнитных звезд. Этот материал представляет собой первую часть выборки. Всего она состоит из 146 звезд, из которых 106 – химически пекулярные звезды поля, для которых нет сведений о принадлежности к скоплениям; 40 – либо стандарты различных типов, либо члены различных скоплений. Особое внимание было уделено анализу выборки из 106 Ар/Вр звездам.

Кроме того, были получены новые спектры (134 спектра циркулярно-поляризованного излучения) пекулярных звезд ассоциации Орион OB1. Этот материал является второй частью выборки, состоящей из 60 химически пекулярных звезд, в том числе 57 – Вр-звезд и 3 – Ар-звезд. Весь спектральный материал выборки химически пекулярных звезд был обработан по стандартной методике в системе MIDAS (Приложение А).

Таким образом, все выводы диссертационного исследования получены на основании обработки и анализа более 500 спектров высокого качества, полученных на 6-м телескопе БТА при помощи спектрографа ОЗСП.

Для всех звезд обеих выборок были измерены продольные компоненты магнитного поля. Для двух звезд, HD 5601 и HD 19712, построены магнитные модели и найдены фундаментальные параметры, а также проведено сравнение с другими представителями звезд с сильными депрессиями (5% и выше).

Для 11 звезд ассоциации Орион OB1 проведены детальные исследования. Для двух объектов из них построены магнитные модели. Периоды вращения получены из анализа периодограмм, построенных по фотометрии спутника HIPPARCOS. За исключением одной звезды HD 37058, имеющей период враще-

ния около 14 суток, все остальные являются быстрыми ротаторами с периодами вращения от 0.5 до 5 суток.

Почти все кривые V_e описываются в первом приближении синусоидой, что свидетельствует о дипольной структуре магнитных полей. Исследования рассмотренных звезд показали, что HD 36668 по результатам была заподозрена в недипольной структуре магнитного поля. Можно отметить, что из 29 известных магнитных звезд в ассоциации Орион OB1 только две имеют явную недипольную структуру: HD 34736 [Semenko et al, 2014], HD 37776 [Thompson et al., 1985].

Таким образом, несмотря на молодой возраст ассоциации Орион OB1, доля магнитных химически пекулярных звезд со сложными конфигурациями магнитного поля не превышает 10%. Исходя из реликтовой теории, можно было ожидать большее число подобных объектов.

В результате данного исследования открыто 30 новых магнитных звезд: 21 – из анализа архивного материала, полученного на ОЗСП БТА в период 2009-2011 гг. и 9 объектов – из анализа спектров пекулярных звезд ассоциации Орион OB1. Таким образом, 6-м телескоп по прежнему является одним из главных поставщиков наблюдательного материала для изучения магнитных полей звезд разных типов. В частности, впервые магнитные поля были обнаружены на БТА у более 150 химически пекулярных звезд, что составляет примерно 35% от всех известных в настоящее время.

Для всех звезд обеих выборок были найдены фундаментальные параметры (эффективные температуры, ускорения силы тяжести, массы, светимости, радиусы), проекции скоростей вращения и лучевые скорости. Сформирован и опубликован однородный каталог фундаментальных параметров химически пекулярных Ap/Bp-звезд. С его созданием количество химически пекулярных звезд с надежно определенными фундаментальными параметрами увеличилось в 2-3 раза.

По исследованию функций распределения параметров звезд поля, было найдено, что:

- эффективная температура 63% исследуемых звезд находится в интервале $\log T_{eff}$: 3.94 (8700 K)-4.07 (11750 K), среднее значение $\log T_{eff} = 3.99(9770) \pm 0.19$ (ошибка рассчитывалась как σ/\sqrt{n} , где σ – среднеквадратичное отклонение, n – количество интервалов);
- ускорение силы тяжести 76% исследуемых звезд находится в интервале $\log g$: 3.55-3.91, среднее значение $\log g = 3.75 \pm 0.14$;
- светимости 73% исследуемых звезд находится в интервале $\log L/L_{\odot}$: 1.27-1.97, среднее значение $\log L/L_{\odot} = 1.63 \pm 0.27$;
- массы 72% исследуемых звезд находится в интервале $\log M/M_{\odot}$: 0.27 (1.9)-0.47 (2.9), среднее значение $\log M/M_{\odot} = 0.37 (2.3) \pm 0.08$;
- радиусы 67% исследуемых звезд находится в интервале $\log R/R_{\odot}$: 0.42 (2.6)-0.64 (4.4), среднее значение $\log R/R_{\odot} = 0.52 (3.3) \pm 0.11$;
- проекции скоростей вращения 87% из исследуемых 62 звезд находится в интервале $\log (v_e \sin i)$: 1.49 (30.9)-1.78 (60.3), среднее значение $\log (v_e \sin i) = 1.71 (51.3) \pm 0.18$;

Результаты анализа функций распределения нормальных и химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1 следующие:

- среди химически пекулярных звезд нет холодных Ap-звезд, хотя среди нормальных звезд A-звезды имеются в большом количестве;
- параметры химически пекулярных Ap/Vp-звезд отличаются от нормальных на уровне значимости в 5% (таблица 24);
- не замечено систематических различий между параметрами в подгруппах;
- исключение составляет проекции скоростей вращения $v_e \sin i$: в подгруппе C со степенью значимости 5% $v_e \sin i$ меньше на 78%, чем в подгруппе A и B.

Таким образом, в ассоциации молодых звезд Орион OB1 практически все пекулярные звезды являются горячими Vp-звездами с эффективной температурой более 13000 K. В то же время среди нормальных звезд ассоциации более холодные A-звезды составляют половину. Причина этого неясна и это будет

предметом дальнейших исследований. Также было обнаружено, что в ассоциации доля магнитных звезд относительно немагнитных падает с возрастом в интервале от 1 млн до 10 млн лет. Это вывод поддерживает реликтовую теорию образования магнитных полей этих объектов.

В будущих планах предполагается продолжение исследований магнитных полей и фундаментальных параметров химически пекулярных звезд с целью поиска связи между ними. Только при помощи анализа статистически большой выборки звезд с надежно определенными фундаментальными параметрами (включая возраст) можно найти закономерности, позволяющие сделать выбор между различными сценариями образования и эволюции магнитных полей химически пекулярных звезд.

Благодарности

Автор диссертационной работы приносит огромную благодарность своему научному руководителю И. И. Романюку за всестороннюю поддержку и помощь; семье, особенно мужу; близким друзьям; коллегам лаборатории; администрации обсерватории САО РАН за возможность реализовать свой научный потенциал, поддержку и помощь.

Список литературы

- Adelman, 2000. Adelman, S.J. VizieR Online Data Catalog: ubvy Photometry of magnetic CP stars (Adelman+, 2000) // VizieR Online Data Catalog. - 2000. - volume 335
- Alexeeva et al, 2018. Alexeeva, Sofya. NLTE Line Formation for Mg I and Mg II in the Atmospheres of B-A-F-G-K Stars. Alexeeva, Sofya; Ryabchikova, Tatiana; Mashonkina, Lyudmila; Hu, Shaoming // The Astrophysical Journal. - 2018. - volume 866. -issue 2. - page 18
- Alonso et al, 2003. Alonso, M.S. Elemental abundance studies of CP stars. The helium-weak stars HD 19400, HD 34797 and HD 35456*. Alonso, M. S.; López-García, Z.; Malaroda, S.; Leone, F. // Astronomy and Astrophysics. - 2003. - volume 402. - page 331-334
- Auriere et al, 2007. Auriere, M. , Weak magnetic fields in Ap/Bp stars. Evidence for a dipole field lower limit and a tentative interpretation of the magnetic dichotomy. Aurière, M.; Wade, G. A.; Silvester, J.; Lignières, F.; Bagnulo, S.; Bale, K.; Dintrans, B.; Donati, J. F.; Folsom, C. P.; Gruberbauer, M.; and 15 coauthors. // Astronomy and Astrophysics. - 2007. - volume 475. - page 1053-1065
- Babcock, 1947. Babcock, H.W. Zeeman Effect in stellar spectra // Astrophysical Journal. -vol. 105. -p.105
- Babcock, 1947. Babcock, H.W. Magnetic Fields of Astronomical Bodies // Physical Review. - 1947. - volume 72 . - page 83-83
- Babcock, 1953. Babcock, H.W. The Solar Magnetograph. // Astrophysical Journal. - 1953. - volume 118. - page 387
- Babcock, 1960. Babcock, H.W. A The 34-KILOGAUSS Magnetic Field of HD 215441 // Astrophysical Journals. - 1960. - volume 132. - page 521

- Bagnulo et al, 2002. Bagnulo, S. A statistical analysis of the magnetic structure of CP stars. Bagnulo, S.; Landi Degl'Innocenti, M.; Landolfi, M.; Mathys, G. // *Astronomy and Astrophysics*. -2002. - volume 394. - page 1023-1037
- Bagnulo et al, 2002. Bagnulo, S. Measuring magnetic fields of early-type stars with FORS1 at the VLT. Bagnulo, S.; Szeifert, T.; Wade, G. A.; Landstreet, J. D.; Mathys, G. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2002. - volume 389. - page 191-201
- Bagnulo et al, 2002. Bagnulo, S. Spectropolarimetry of Hydrogen Balmer lines with FORS1 at the VLT. Bagnulo, S.; Szeifert, T.; Mathys, G.; Wade, G. A.; Landstreet, J. D. // *Observed HR Diagrams and Stellar Evolution, ASP Conference Proceedings*. -2002. -vol.274. -p. 610
- Bagnulo et al, 2003. Bagnulo, S. Discovery of a 14.5 kG magnetic field in the NGC 2516 star HD 66318. Bagnulo, S.; Szeifert, T.; Mathys, G.; Wade, G. A.; Landstreet, J. D. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2003. - volume 403. - page 645-651
- Bagnulo et al, 2004. Bagnulo, S. Discovery of a huge magnetic field in the very young star NGC 2244-334 in the Rosette Nebula cluster. Bagnulo, S.; Hensberge, H.; Landstreet, J. D.; Szeifert, T.; Wade, G. A. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2004. - volume 416. - page 1149-1158
- Bagnulo et al, 2006a. Bagnulo, S. Exploring the surface properties of transneptunian objects and Centaurs with polarimetric FORS1/VLT observations. Bagnulo, S.; Boehnhardt, H.; Muinonen, K.; Kolokolova, L.; Belskaya, I.; Barucci, M. A. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2006. - volume 450. - page 1239-1248
- Bagnulo et al, 2006b. Bagnulo, S. Searching for links between magnetic fields and stellar evolution. I. A survey of magnetic fields in open cluster A- and B-type stars with FORS1. Bagnulo, S.; Landstreet, J. D.; Mason, E.; Andretta, V.; Silaj, J.; Wade, G. A. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2006. - volume 450. -issue 2. - page 777-791

- Balega et al, 2013. Balega, Y.Y. VizieR Online Data Catalog: Speckle interferometry of Ap stars (Balega+, 2013). Balega, I. I.; Balega, Yu. Yu.; Gasanova, L. T.; Dyachenko, V. V.; Maksimov, A. F.; Malogolovets, E. V.; Rastegaev, D. A.; Shkhagosheva, Z. U. // VizieR Online Data Catalog (other). - 2013. - volume 330
- Baudrand et al, 1992. Baudrand, J. A fiber-fed spectrograph for multi-site observations. Baudrand, J.; Bohm, T. // *Astronomy and Astrophysics*/ -1992. - volume 259. - no. 2. - page 711-719
- Blaauw, 1964. Blaauw, A. The O Associations in the Solar Neighborhood // *Annual Review of Astron and Astrophys.* - 1964. - volume 2. - page 213
- Borra et al, 1979. Borra, E.F. The magnetic field of the helium-strong stars. Borra, E. F.; Landstreet, J. D. // *Astrophysical Journal.* - 1979, - volume 228. - page 809-816
- Borra, 1973. Borra, E.F. High-Resolution Zeeman Polarimetry / Borra, E.F., Landstreet, J.D., Vaughan, Jr., A.H. // *Astrophysical Journal, Letters.* - 1973. - volume 185. - p. 145
- Borra, 1973. Borra, E. F. A Search for Weak Stellar Magnetic Fields / Borra, E. F., Landstreet, J.D. // *Astrophysical Journal, Letters.* - 1973. - volume 185. - p. 139
- Borra et al, 1980. Borra, E. F. The magnetic fields of the AP stars. Borra, E. F.; Landstreet, J. D. // *Astrophysical Journal Supplement Series.* - 1980, - volume 42. - page 421-445
- Borra, 1981. Borra, E.F. Decaying stellar magnetic fields, magnetic braking: evidence from magnetic observations in Orion OB1. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* - 1981. - volume 75. - page 245

- Brown et al, 1994. Brown A.G.A. The Orion OB1 association. 1: Stellar content. Brown, A. G. A.; de Geus, E. J.; de Zeeuw, P. T. // *Astronomy and Astrophysics*. - 1994. - volume 289. - page 101-120
- Brown et al, 1994a. Brown, A.G.A. VizieR Online Data Catalog: Orion OB1 association. I. (Brown+, 1994). Brown, A. G. A.; de Geus, E. J.; de Zeeuw, P. T. // *VizieR Online Data Catalog*. - 1994. - volume 328.
- Bychkov et al, 2003. Bychkov, V.D. Catalogue of averaged stellar effective magnetic fields. I. Chemically peculiar A and B type stars. Bychkov, V. D.; Bychkova, L. V.; Madej, J. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2003. - volume 407. - page 631-642
- Bychkov et al, 2016. Bychkov, V.D. Periods of magnetic field variations in the Ap star γ Equulei (HD 201601). Bychkov, V. D.; Bychkova, L. V.; Madej, J. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. - 2016. - volume 455. - issue 3. - page 2567-2572
- Chountonov, 2004. Chountonov, G.A. New equipment for measuring stellar magnetic fields at the 6 m telescope // *Magnetic Stars*. - 2004. - page 286-291
- Cramer, Maeder, 1980. Cramer, N., Maeder, A. Relation between surface magnetic field intensities and Geneva photometry // *Astronomy and Astrophysics*. - 1980. - volume 88. - page 135-140
- Dobler, 2005. Dobler, W. Stellar dynamos - theoretical aspects // *Astronomische Nachrichten*. - 2005. - volume 326. - page 254-264
- Donati, 1997. Donati, J.F. Spectropolarimetric observations of active stars / Donati, J.F., Semel, M., Carter, B.D., Rees, D.E., Collier Cameron, A. // *Monthly Notices of the RAS*. - 1997. - volume 291. - p. 658
- Eker et al., 2015. Eker, Z. Main-Sequence Effective Temperatures from a Revised Mass-Luminosity Relation Based on Accurate Properties. Eker, Z.; Soydogan,

F.; Soyduğan, E.; Bilir, S.; Yaz Gökçe, E.; Steer, I.; Tüysüz, M.; Şenyüz, T.; Demircan, O. // *Astronomical Journal*. -volume 149

Flower, 1996. Flower, P.J. Transformations from Theoretical Hertzsprung-Russell Diagrams to Color-Magnitude Diagrams: Effective Temperatures, B-V Colors, and Bolometric Corrections // *Astrophysical Journal*. - 1996. - volume 469. - page 355

Fossati, 2007. Fossati, L. et al. Late stages of the evolution of A-type stars on the main sequence: comparison between observed chemical abundances and diffusion models for 8 Am stars of the Praesepe cluster // *Astronomy and Astrophysics*. - 2007. - volume 476. - page 911-925

Gaia Collaboration, 2016. Gaia Collaboration, Brown, A.G.A. et al Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties // *Astronomy and Astrophysics*. - 2016. - volume 595. - page 2

Girardi et al, 2000. Girardi, L. 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. Girardi, L.; Bressan, A.; Bertelli, G.; Chiosi, C. // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. -2000. -volume 141. - page 371

Glagolevskii, 1966. Glagolevskii, Yu.V. Some Results of Observations of the Continuous Spectra of Magnetic , Peculiar Stars // *Astronomicheskii Zhurnal*. -1966. -page 73

Glagolevskij et al, 1985. Glagolevskii, Yu.V. et al. Magnetic Field Geometry of ALPHA-2-CANUM-VENATICORUM Derived from Circular Polarization Profiles of Metal Lines // *Soviet Astronomy Letters*. -1985. - volume 11. -page 371-377

Glagolevskij et al, 1987. Glagolevskii, Yu.V. The investigation of the magnetic fields of chemically peculiar stars of different ages. Glagolevskij, Yu. V.; Klochkova,

- V. G.; Kopylov, I. M. // *Astronomicheskii Zhurnal*. -1987. - volume 64. -page 360-366
- Glagolevskij, 1994. Glagolevskii, Yu.V. A new list of effective temperatures of chemically peculiar stars. II. // *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory*. -1994. - volume 38. -page 152 - 168
- Glagolevskij, 2008. Glagolevskij, Yu.V. *VizieR Online Data Catalog: Magnetic field in CP stars* // *VizieR Online Data Catalog*. - 2008. - volume 330.
- Glagolevskij, 2013. Glagolevskij, Yu.V. Evolution of the Magnetic Fields of Main-Sequence CP-Stars. I // *Astrophysics*. - 2013. - volume 56. - page 173-190
- Glagolevskij, 2015. Glagolevskij, Yu.V. Evolution of the Magnetic Fields of Main-Sequence CP-Stars. V // *Astrophysics*. - 2015. - volume 58. - page 29-45
- Glagolevskij, 2018. Glagolevskij, Yu.V. Progress in Studies of the Evolution of the Magnetic Fields of CP-Stars. I // *Astrophysics*. - 2018. - volume 61. - page 413-434
- Gonzales, 2014. Gonzales, J.F. HD 161701 a chemically peculiar binary with HgMn primary and an Ap secondary // *Astronomy & Astrophysics*. - 2014. - volume 561. - page 12
- Hale, 1908. Hale, G.E. The Zeeman Effect in the Sun // *Publications of the ASP*. - 1908. - volume 20. - page 287
- Hensberge et al, 1981. Hensberge, H. A photoelectric investigation of light variability in AP stars. Hensberge, H.; Maitzen, H. M.; Deridder, G.; Gerbaldi, M.; Delmas, F.; Renson, P.; Doom, C.; Weiss, W. W.; Morguleff, N. // *Astronomy and Astrophysics, Supplement*. - 1981. - volume 46. - page 151-170
- Hubrig et al, 2004. Hubrig, S. New measurements of magnetic fields of roAp stars with FORS 1 at the VLT. Hubrig, S.; Szeifert, T.; Schöller, M.; Mathys, G.; Kurtz, D. W. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2004. - volume 415. - page 685-689

- Hubrig et al, 2005. Hubrig, S. Detection of an extraordinarily large magnetic field in the unique ultra-cool Ap star HD 154708. Hubrig, S.; Nesvacil, N.; Schöller, M.; North, P.; Mathys, G.; Kurtz, D. W.; Wolff, B.; Szeifert, T.; Cunha, M. S.; Elkin, V. G. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2005. - volume 440. - page 37-40
- Hubrig, 2006. Hubrig, S. Evolution of magnetic fields in stars across the upper main sequence: I. Catalogue of magnetic field measurements with FORS 1 at the VLT. Hubrig, S.; North, P.; Schöller, M.; Mathys, G. // *Astronomische Nachrichten*. - 2006. - volume 327. - page 289-297
- Hubrig et al, 2014. Hubrig, S. Magnetic fields of Herbig Ae/Be stars. Hubrig, S.; Ilyin, I.; Schöller, M.; Cowley, C. R.; Castelli, F.; Stelzer, B.; Gonzalez, J.-F.; Wolff, B. // *Astronomische Nachrichten*. - 2014. - volume 334. - page 1093
- Hubrig et al, 2018. Hubrig, S. Observations of magnetic fields in Herbig Ae/Be stars. Hubrig, S.; Jarvinen, S. P.; Schöller, M.; Carroll, T. A.; Ilyin, I.; Pogodin, M. A. // eprint arXiv:1812.04482. - 2018.
- Johns-Krull et al, 2013. Johns-Krull, Christopher M. HARPS Spectropolarimetry of the Classical T Tauri Stars GQ Lup and TW Hya. Johns-Krull, Christopher M.; Chen, W.; Valenti, J. A.; Jeffers, S. V.; Piskunov, N. E.; Kochukhov, O.; Makaganiuk, V.; Stempels, H. C.; Snik, F.; Keller, C.; Rodenhuis, M. // *American Astronomical Society, AAS Meeting # 221*. -2013. - id.256.14
- Joshi et al, 2009. Joshi, S. The Nainital-Cape survey. III. A search for pulsational variability in chemically peculiar stars. Joshi, S.; Mary, D. L.; Chakradhari, N. K.; Tiwari, S. K.; Billaud, C. // *Astronomy and Astrophysics*. -2009. -volume 507. - page 1763-1784
- Kemp et al, 1970. Kemp, James C. Discovery of Circularly Polarized Light from a White Dwarf. Kemp, James C.; Swedlund, John B.; Landstreet, J. D.; Angel, J. R. P. // *Astrophysical Journal*. - 1970. - volume 161. - page L77

- Khokhlova, 1976. Khokhlova, V. L. Formalization of the inverse problem of obtaining local profiles from observations of AP stellar spectra // *Astronomische Nachrichten*. - 1976. - volume 297. -no.4. - page 203-206
- Kholtygin et al, 2019. Kholtygin A. et al. New insights from magnetic studies of massive OB stars. // *ASP Conference Series*, San Francisco, USA. - 2019. - (in print)
- Klochkova et al, 2008. Klochkova, V.G. Radial velocity measurements with stellar spectrographs of the 6-m telescope. Klochkova, V. G.; Panchuk, V. E.; Yushkin, M. V.; Nasonov, D. S. // *Astrophysical Bulletin*. - 2008. - volume 63. - page 386-394
- Klochkova, 1985. Klochkova, V.G. The BP stars in the Orion OB 1 association // *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*. - 1985. - volume 11. - page 502-510
- Kochukhov et al, 2002. Kochukhov, O. Doppler Imaging of stellar magnetic fields. III. Abundance distribution and magnetic field geometry of α^2 CVn. Kochukhov, O.; Piskunov, N.; Ilyin, I.; Ilyina, S.; Tuominen, I. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2002. - volume 389. - page 420-438
- Kochukhov et al, 2004. Kochukhov, O. Magnetic Doppler imaging of 53 *Camelopardalis* in all four Stokes parameters. Kochukhov, O.; Bagnulo, S.; Wade, G. A.; Sangalli, L.; Piskunov, N.; Landstreet, J. D.; Petit, P.; Sigut, T. A. A. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2004. - volume 414. - page 613-632
- Kochukhov et al, 2006. Kochukhov, O. Evolutionary state of magnetic chemically peculiar stars. Kochukhov, O.; Bagnulo, S. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2006. - volume 450. - page 763-775
- Kochukhov et al, 2011. Kochukhov, O. The Extraordinary Complex Magnetic Field of the Helium-strong Star HD 37776. Kochukhov, Oleg; Lundin, Andreas; Romanyuk, Iosif; Kudryavtsev, Dmitry. // *The Astrophysical Journal*. - 2011. - volume 726. - issue 1. - page 8

- Kochukhov et al, 2013. Kochukhov, O. Discovery of new rapidly oscillating Ap pulsators in the UVES survey of cool magnetic Ap stars. Kochukhov, O.; Alentiev, D.; Ryabchikova, T.; Boyko, S.; Cunha, M.; Tsymbal, V.; Weiss, W. // Monthly Notices of the RAS. - 2013. - volume 431. - page 2808-2819
- Kochukhov, 2008. Kochukhov, O. Magnetic fields, spots and weather in chemically peculiar stars // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. - 2008. - volume 38. - page
- Kochukhov, 2018. Kochukhov, O. BinMag: Widget for comparing stellar observed with theoretical spectra // Astrophysics Source Code Library. - 2018
- Kochukhov, 2007. Kochukhov, O.P. Spectrum synthesis for magnetic, chemically stratified stellar atmospheres // Physics of Magnetic Stars. - 2007. - page 109-118
- Kochukhov et al, 2015. Kochukhov, O.P. Magnetic field topology and chemical spot distributions in the extreme Ap star HD 75049. Kochukhov, O.; Rusomarov, N.; Valenti, J. A.; Stempels, H. C.; Snik, F.; Rodenhuis, M.; Piskunov, N.; Makaganiuk, V.; Keller, C. U.; Johns-Krull, C. M. // Astronomy and Astrophysics. - 2015. - volume 547. -id.A79. - page 12
- Kopylova, Romanyuk, 1992. Kopylova, F.G., Romanyuk, I.I. The extremely large complex magnetic field of the He-rich star HD37776 // Physics and Evolution of Stars: Stellar Magnetism. -1992. - page 54
- Korotin et al, 2018. Korotin, S. A. Non-LTE Effects of Helium Lines in Late-B and A Stars. Korotin, S. A.; Ryabchikova, T. A. // Astronomy Letters. - 2018. - volume 44. -issue 10. - page 621-628
- Krause, 1984. Krause, F. Simple nonlinear recursions and the mean-field concept // Astronomische Nachrichten. - 1984. - volume 305. -no. 6. - page 281-288
- Kudryavtsev et al, 2004. Kudryavtsev, D.O. New magnetic CP stars. Kudryavtsev, D. O.; Romanyuk, I. I.; Elkin, V. G. // Magnetic Stars. - 2004. - page 93-100

- Kudryavtsev et al, 2006. Kudryavtsev, D.O. New magnetic chemically peculiar stars. Kudryavtsev, D. O.; Romanyuk, I. I.; Elkin, V. G.; Paunzen, E. // Monthly Notices of the RAS. - 2006. - volume 372. - page 1804-1828
- Kudryavtsev et al, 2007. Kudryavtsev, D.O. Radial and rotational velocities for a sample of magnetic CP stars. Kudryavtsev, D. O.; Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Solov'ev, G. A. // Astrophysical Bulletin. - 2007. - volume 62. - page 147-161
- Kudryavtsev et al, 2008. Kudryavtsev, D.O. Magnetic CP stars with a large depression in the continuum. Kudryavtsev, D. O.; Romanyuk, I. I. // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. - 2008. - volume 38. - page 229-234
- Kudryavtsev et al, 2012. Kudryavtsev, D.O. Magnetic field measurements of CP stars from hydrogen line cores. Kudryavtsev, D. O.; Romanyuk, I. I. // Astronomische Nachrichten. - 2012. - volume 333. - page 41
- Kudryavtsev, 2000. Kudryavtsev, D.O. Reduction of echelle and long-slit Zeeman spectra in MIDAS // Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars. - 2000. - page 84-88
- Kurucz, 1993. Kurucz, R.L. A New Opacity-Sampling Model Atmosphere Program for Arbitrary Abundances // IAU Colloq. 138: Peculiar versus Normal Phenomena in A-type and Related Stars. - 1993. - series Astronomical Society of the Pacific Conference Series. - volume 44. - page 87
- Landstreet et al, 2007. Landstreet, J.D. Searching for links between magnetic fields and stellar evolution: II. The evolution of magnetic fields as revealed by observations of Ap stars in open clusters and associations. Landstreet, J. D.; Bagnulo, S.; Andretta, V.; Fossati, L.; Mason, E.; Silaj, J.; Wade, G. A. // Astronomy and Astrophysics. - 2007. - volume 470. - page 685-698

- Landstreet, 1970. Landstreet, J.D. The Orientation of Magnetic Axes in the Magnetic Variables // *Astrophysical Journal*. - 1970. - volume 159. -page 1001
- Levato et al, 1996. Levato, H. Radial velocities and axial rotation for a sample of chemically peculiar stars. Levato, H.; Malaroda, S.; Morrell, N.; Solivella, G.; Grosso, M. // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. - 1970. - volume 118. -page 231-238
- Lucke, 1978. Lucke, P.B. The distribution of color excesses and interstellar reddening material in the solar neighborhood // *Astronomy and Astrophysics*. -volume 64. -page 367-377
- Maitzen, 1976. Maitzen, H.M. Photoelectric filter photometry of the flux depression at 5200 Å in Ap-stars // *Astronomy and Astrophysics*. -1976. -volume 51. -page 223-233
- Martinez et al, 1994. Martinez, P. The Cape rapidly oscillating Ap star survey. III. Null results of searches for high-overtone pulsation. Martinez, P.; Kurtz, D. W. // *Monthly Notices of the RAS*. - 1994. - volume 271. - p. 129-154
- Mathys et al, 1997. Mathys, G. Spectropolarimetry of magnetic stars. VI. Longitudinal field, crossover and quadratic field: New measurements. Mathys, G.; Hubrig, S. // *A & A Supplement series*. - 1997. - volume 124. - page 475-497
- Mathys et al, 2019. Mathys, G. et al. // *Astronomy and Astrophysics*. -2019. - (in print)
- Medvedev et al, 2017. Medvedev, A. S. Statistics of magnetic field measurements in OBA stars and the evolution of their magnetic fields. Medvedev, A. S.; Kholtygin, A. F.; Hubrig, S.; Schöller, M.; Fabrika, S.; Valyavin, G. G.; Chountonov, G. A.; Milanova, Yu. V.; Tsiopa, O. A.; Yakovleva, V. A. // *Astronomische Nachrichten*. - 2017. - volume 338. -issue 338. - page 910-918

- Medvedev et al, 2018. Medvedev, A. S. Evolution of magnetic field of massive stars. Medvedev, A. S.; Kholtygin, A. F.; Hubrig, S.; Fabrika, S. N.; Valyavin, G. G.; Schöller, M.; Tsiopa, O. A. // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso - 2018. - volume 48. -no. 1. - page 223-227
- Medvedev, 2019. Evolution of the magnetic field of OBA stars at MS and beyond // ASP Conference Series, San Francisco, USA. - 2019. - (in print)
- Mestel, 2001. Mestel, L. Magnetic Fields across the H-R Diagram // Magnetic Fields Across the Hertzsprung-Russell Diagram, ASP Conference Proceedings. -2001. - volume 248. -p. 3
- Moss, 2001. Moss, D. Magnetic Fields in the Ap and Bp Stars: a Theoretical Overview //Magnetic Fields Across the Hertzsprung-Russell Diagram, ASP Conference Proceedings. -2001. - volume 248. -p. 305
- Michaud, 1970. Michaud, G. Diffusion Processes in Peculiar a Stars // Astrophysical Journal. - 1970. - volume 160. - page 641
- McDonald, 2017. McDonald, I. et al. Fundamental parameters and infrared excesses of Tycho-Gaia stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2017. - volume 471. -issue 1. - page 770-791
- Moon et al, 1985. Moon, T.T. Grids for the determination of effective temperature and surface gravity of B, A and F stars using uvby-beta photometry. Moon, T. T.; Dworetzky, M. M. // Monthly Notices of the RAS. - 1985. - volume 217. - page 305-315
- Napiwotzki et al, 1993. Napiwotzki, R. On the determination of effective temperature and surface gravity of B, A, and F stars using Stromgren UVBY beta photometry. Napiwotzki, R.; Schoenberner, D.; Wenske, V. // Astronomy and Astrophysics. - 1993. - volume 268. - page 653-666

- Netopil et al, 2017. Netopil, Martin. An investigation of the rotational properties of magnetic chemically peculiar stars. Netopil, Martin; Paunzen, Ernst; Hümmerich, Stefan; Bernhard, Klaus // Monthly Notices of the RAS. - 2017. - volume 468. - page 2745-2756
- North, 1984. North, P. The rotation of AP stars // Astronomy and Astrophysics. - 1984. - volume 141. - page 328-340
- North, Cramer, 1984. North, P., Cramer, N. Evidence of decay of the magnetic fields of AP stars // Astronomy and Astrophysics, Supplement. - 1984. - volume 58,. - page 387-403
- North, Cramer, 1985. North, P., Cramer, N. Evidence of decay of the magnetic fields of AP stars // Astronomy and Astrophysics, Supplement. - 1984. - volume 60,. - page 353
- Panchuk et al, 2017. Panchuk, V. E. The high-resolution Echelle Spectrograph of the 6-m telescope of the special astrophysical observatory. Panchuk, V. E.; Klochkova, V. G.; Yushkin, M. V. // Astronomy Reports. - 2017. - volume 61. - page 820-831
- Panchuk et al, 2011. Panchuk, V. E. High-resolution fiber-fed spectrographs. Panchuk, V. E.; Yushkin, M. V.; Yakopov, M. V. // Astrophysical Bulletin. - 2011. - volume 66. - page 355-370
- Panchuk et al, 2014. Panchuk, V. E. Main stellar spectrograph of the 6-meter telescope. Analysis, reconstruction, and operation. Panchuk, V. E.; Chuntunov, G. A.; Naidenov, I. D. // Astrophysical Bulletin. - 2014. - volume 69. - page 339-355
- Panchuk et al, 2006. Panchuk, V.E. Analysis of the accuracy characteristics of spectroscopic observations. Panchuk, V. E.; Yushkin, M. V. // Journal of Optical Technology. - 2006. - volume 73. - page 265-268

- Parenago, 1954. Parenago, P.P. Untersuchung der Sterne im Gebiet des Orion-Nebels. Tabelle III: Katalog der genauen Positionen. (Bestimmung von photographischen Beobachtungen) // Trudy Gosudarstvennogo Astronomicheskogo Instituta. - 1954. - volume 25. - page 393-437
- Paunzen et al, 2005. Paunzen, E. VizieR Online Data Catalog: CCD photometry in 6 open clusters (Paunzen+, 2005). Paunzen, E.; Netopil, M.; Iliev, I. K.; Maitzen, H. M.; Claret, A.; Pintado, O. I. // VizieR Online Data Catalog. - 2005. - volume 344
- Piskunov et al, 1983. Piskunov, N. Numerical modeling of circular-polarization profiles for magnetic AP stars. Piskunov, N. E.; Khokhlova, V. L. // Pisma v Astronomicheskii Zhurnal. - 1983. - volume 9. -page 346-349
- Piskunov et al, 1984. Piskunov, N. Linear-polarization line profiles as an indicator of the magnetic field geometry of AP stars. Piskunov, N. E.; Khokhlova, V. L. // Pisma v Astronomicheskii Zhurnal. - 1984. - volume 10. -page 187-189
- Piskunov, 1985. Piskunov, N. The Magnetic Field Geometry of Ap-Stars - a Solution Algorithm // Soviet Astronomy Letters. - 1985. - volume 11. -page 18-21
- Piskunov et al, 2003. Piskunov, N. Modelling of Stellar Atmospheres. Piskunov, N.; Weiss, W. W.; Gray, D. F // Modelling of Stellar Atmospheres. - 2003. - series IAU Symposium. - volume 210
- Piskunov et al, 2011. Piskunov, N. HARPSpol - The New Polarimetric Mode for HARPS. Piskunov, N.; Snik, F.; Dolgopolov, A.; Kochukhov, O.; Rodenhuis, M.; Valenti, J.; Jeffers, S.; Makaganiuk, V.; Johns-Krull, C.; Stempels, E.; Keller, C. // The Messenger. - 2011. -vol. 143. -pp 7-10
- Pojmanski, 1997. Pojmanski, G. The All Sky Automated Survey // Acta Astronomica. - 1997. -vol. 47. -p. 467

- Pogodin et al, 2017. Pogodin, M. A. Spectroscopic Peculiarity of the Herbig Be Star HD 259431. Pogodin, M. A.; Pavlovskij, S. E.; Drake, N. A.; Beskrovnaya, N. G.; Kozlova, O. V.; Alekseev, I. Yu.; Borges Fernandes, M.; Pereira, C. B.; Valyavin, G. // Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016. Edited by Yu. Yu. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. - 2017. -pp 157
- Preston, 1974. Preston, G.W. The chemically peculiar stars of the upper main sequence // Annual Review of Astron and Astrophys. - 1974. - volume 12. - page 257-277
- Rastegaev et al, 2014. Rastegaev, D. Binary and multiple magnetic Ap/Bp stars. Rastegaev, Denis; Balega, Yuri; Dyachenko, Vladimir; Maksimov, Alexander; Malogolovets, Evgenij. // Magnetic Fields throughout Stellar Evolution. - 2014. - series IAU Symposium. - volume 302. - page 317-319
- Renson, Manfroid, 2009. Renson, P., Manfroid, J. Catalogue of Ap, HgMn and Am stars // Astronomy and Astrophysics. - 2009. - volume 498. - page 961-966
- Romanyuk, 1984. Romanyuk, I.I. On Some Manifestations of Magnetic Intensification of Absorption Lines in Spectra of Peculiar Stars // Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii. -1984. -vol.18. -p. 37
- Romanyuk, 1997. Romanyuk, I.I. The Zeeman effect in stellar spectra // Stellar Magnetic Fields, Proceedings of the International Conference, held in the Special Astrophysical Observatory of the Russian AS, May 13-18, 1996, Eds.: Yu. Glagolevskij, I. Romanyuk, Special Astrophysical Observatory Press. -1997. -p. 11-25

- Romanyuk, 2004. Romanyuk, I.I. Magnetic field of CP stars. Observational aspects // Magnetic Stars: Glagolevskij, Y.V. , Kudryavtsev, D.O. , Romanyuk, I.I. - Arkhiz, N., 2004. -page. 33-63
- Romanyuk, 2007. Romanyuk, I.I. et al Physics of Magnetic Stars. Proceedings of the International Conference // Physics of Magnetic Stars. - 2007.
- Romanyuk, 2007. Romanyuk, I.I. Main-sequence magnetic CP stars: II. Physical parameters and chemical composition of the atmosphere // Astrophysical Bulletin. - 2007. - volume 62. - page 62-89
- Romanyuk et al, 2008. Romanyuk, I.I. Magnetic fields of chemically peculiar stars. I. The catalog of magnetic CP stars. Romanyuk, I. I.; Kudryavtsev, D. O. // Astrophysical Bulletin. - 2008. - volume 63. - page 139-155
- Romanyuk, 2010. Romanyuk, I.I. Main-sequence magnetic CP stars III. Results of magnetic field measurements // Astrophysical Bulletin. - 2010. - volume 65. - issue 4. - page 347-380
- Romanyuk et al, 2012. Romanyuk, I.I. Magnetic B-type stars of the main sequence. I. Problem formulation and selection of objects for observations. Romanyuk, I. I.; Yakunin, I. A. // Astrophysical Bulletin. - 2012. - volume 67. - page 177-206
- Romanyuk et al, 2013. Romanyuk, I.I. Chemically peculiar stars in the orion OB1 association. I. Occurrence frequency, spatial distribution, and kinematics. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A.; Kudryavtsev, D. O. // Astrophysical Bulletin. - 2013. - volume 68. - page 300-337
- Romanyuk et al, 2014. Romanyuk, I.I. Bp stars in Orion OB1 association. Romanyuk, Iosif I.; Yakunin, Ilya A. // Magnetic Fields throughout Stellar Evolution. - 2014. - series IAU Symposium. - volume 302. - page 276-279
- Romanyuk et al, 2014a. Romanyuk, I.I. Results of magnetic field measurements of CP stars carried out with the Russian 6-m telescope. I. Observations in 2007.

- Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Kudryavtsev, D. O. // *Astrophysical Bulletin*. - 2014. - volume 69. - page 427-438
- Romanyuk et al, 2015a. Romanyuk, I.I. Magnetic CP stars in Orion OB1 association. Romanyuk, Iosif I.; Semenko, Eugene A. // *New Windows on Massive Stars*. - 2015. - series IAU Symposium. - volume 307. - page 393-394
- Romanyuk, 2015b. Romanyuk, I.I. Magnetic fields of chemically peculiar and related stars. I. Main results of 2014 and near-future prospects // *Astrophysical Bulletin*. - 2014. - volume 70. - issue 2. - page 191-205
- Romanyuk et al, 2015c. Romanyuk, I.I. Magnetic field monitoring of the very slowly rotating CP star HD 965. Romanyuk, I. I.; Kudryavtsev, D. O.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A. // *Astrophysical Bulletin*. - 2015. - volume 70. - issue 4. - page 456-459
- Romanyuk et al, 2015d. Romanyuk, I.I. Magnetic Stars in Young Clusters and Associations. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A. // *Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars, ASP Vol. 494 Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia, 25-31 August 2014*. Edited by Yu. Yu. Balega, I. I. Romanyuk, and D. O. Kudryavtsev. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. - 2015. - page 15
- Romanyuk et al, 2016. Romanyuk, I.I. Magnetic stars with wide depressions in the continuum. 1. The Ap star with strong silicon lines HD5601. Romanyuk, I. I.; Kudryavtsev, D. O.; Semenko, E. A.; Moiseeva, A. V. // *Astrophysical Bulletin*. - 2016. - volume 71. - page 447-452
- Romanyuk et al, 2016a. Romanyuk, I.I. Magnetic field of CP stars in the Ori OB1 association. I. HD35456, HD35881, HD36313 A, HD36526. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A.; Kudryavtsev, D. O.; Moiseeva, A. V. // *Astrophysical Bulletin*. - 2016. - volume 71. - page 436-446

- Romanyuk et al, 2015b. Romanyuk, I.I. Results of the magnetic field measurements of CP stars carried out with the Russian 6-m telescope. II. Observations in 2008. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Kudryavtsev, D. O. // *Astrophysical Bulletin*. - 2015. - volume 70. - page 444-455
- Romanyuk et al, 2016b. Romanyuk, I.I. Results of magnetic field measurements of CP-stars performed with the 6-m telescope. III. Observations in 2009. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Kudryavtsev, D. O.; Moiseeva, A. V. // *Astrophysical Bulletin*. - 2016. - volume 71. - page 302-313
- Romanyuk et al, 2017. Romanyuk, I.I. Results of magnetic field measurements performed with the 6-m telescope. IV. Observations in 2010. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Kudryavtsev, D. O.; Moiseeva, A. V.; Yakunin, I. A. // *Astrophysical Bulletin*. - 2017. - volume 72. - page 391-410
- Romanyuk et al, 2017. Romanyuk, I.I. Magnetic chemically peculiar stars in the Orion OB1 association. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A.; Kudryavtsev, D. O.; Moiseeva, A. V. // *Astronomische Nachrichten*. - 2017. - volume 338. - page 919-925
- Romanyuk et al, 2017. Romanyuk, I.I. Magnetic field of CP stars in the Ori OB1 association. II. HD36540, HD36668, HD36916, HD37058. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Yakunin, I. A.; Kudryavtsev, D. O.; Moiseeva, A. V. // *Astrophysical Bulletin*. - 2017. - volume 72. - page 165-177
- Romanyuk et al, 2018. Romanyuk, I.I. Results of magnetic field measurements performed with the 6-m telescope. IV. Observations in 2011. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Moiseeva, A. V.; Kudryavtsev, D. O.; Yakunin, I. A. // *Astrophysical Bulletin*. - 2018. - volume 73. - page 185
- Romanyuk et al, 2019. Romanyuk, I.I. Massive Magnetic CP Stars In The Orion OB1 Association. Subgroup A. Romanyuk, I. I.; Semenko, E. A.; Moiseeva, A. V.;

- Kudryavtsev, D. O.; Yakunin, I. A. // ASP Conference Series, San Francisco, USA. - 2019. - (in print)
- Ryabchikova et al, 2003. Ryabchikova, T. et al Observational Evidence for the Stratification of Chemical Abundances in Stellar Atmospheres // Modelling of Stellar Atmospheres. - 2003. - series IAU Symposium. - volume 210. - page 301
- Ryabchikova et al, 2006. Ryabchikova, T. HD 178892 - a cool Ap star with extremely strong magnetic field. Ryabchikova, T.; Kochukhov, O.; Kudryavtsev, D.; Romanyuk, I.; Semenko, E.; Bagnulo, S.; Lo Curto, G.; North, P.; Sachkov, M. // Astronomy and Astrophysics. - 2006. - volume 445. - issue 3. - page L47-L50
- Ryabchikova et al, 2015. Ryabchikova, T. A. major upgrade of the VALD database. Ryabchikova, T. A.; Piskunov, N.; Kurucz, R. L.; Stempels, H. C.; Heiter, U.; Pakhomov, Yu.; Barklem, P. S. // Physica Scripta. - 2015. - volume 90. - page 054005
- Sargent, 1967. Sargent, W.L.W. et al The Existence of Magnetic Fields in Two Peculiar B Stars in Orion // Astrophysical Journal. - 1967. - volume 147. - page 1185
- Semenko et al, 2008. Semenko, E.A. Comprehensive study of the magnetic stars HD 5797 and HD 40711 with large chromium and iron overabundances. Semenko, E. A.; Yakunin, I. A.; Kuchaeva, E. Yu. // Astronomy Letters. - 2008. - volume 37. - issue 1. - page 20-29
- Semenko et al, 2008. Semenko, E.A. HD 45583—a chemically peculiar star with an unusual curve of longitudinal magnetic field variations. Semenko, E. A.; Kudryavtsev, D. O.; Ryabchikova, T. A.; Romanyuk, I. I. // Astrophysical Bulletin. - 2008. - volume 63. - issue 2. - page 128-138
- Semenko et al, 2011. Semenko, E.A. Binaries Among Magnetic CP Stars: Some Observational Results. // Magnetic Stars. - 2011. - page 419-425

- Semenko et al, 2014. Semenko, E.A. et al On discovery of strong magnetic field in the binary system HD34736. Semenko, E. A.; Rastegaev, D. A.; Dyachenko, V. V.; Kuchaeva, E. Yu.; Malogolovets, E. V.; Yakunin, I. A. // *Astrophysical Bulletin*. - 2014. - volume 69. - page 191-197
- Semenko et al, 2017. Semenko, E.A. Magnetic stars with wide depressions in the continuum. 2. The silicon star with a complex field structure HD 27404. Semenko, E. A.; Romanyuk, I. I.; Semenova, E. S.; Moiseeva, A. V.; Kudryavtsev, D. O.; Yakunin, I. A. // *Astrophysical Bulletin*. - 2017. - volume 72. - page 384-390
- Severny, 1969. Severny, A. Is the Sun a Magnetic Rotator? // *Nature*. - 1969. - volume 224. -issue 5214. - page 53-54
- Shorlin et al, 2002. Shorlin, S.L.S. A highly sensitive search for magnetic fields in B, A and F stars. Shorlin, S. L. S.; Wade, G. A.; Donati, J.-F.; Landstreet, J. D.; Petit, P.; Sigut, T. A. A.; Strasser, S. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2002. - volume 392. - page 637-652
- Shulyak et al, 2013. Shulyak, D. Fundamental parameters of bright Ap stars from wide-range energy distributions and advanced atmospheric models. Shulyak, D.; Ryabchikova, T.; Kochukhov, O. // *Astronomy and Astrophysics*. - 2013. - volume 551. -id. A14. - page 10
- Sitnova et al, 2018. Sitnova, T. NLTE abundances of C, O, Ca, Ti, and Fe in the reference BAF-type stars. Sitnova, Tatyana; Ryabchikova, Tatyana; Alexeeva, Sofya; Mashonkina, Lyudmila. // *Rediscovering our Galaxy, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*. - 2018. - volume 334. - page 360-361
- Stepien, 1994. Stepien, K. Properties and position of CP2 stars on the HR diagram // *Chemically Peculiar and Magnetic Stars*. - 1994. - page 8

- Stevens et al, 2017. Stevens, Daniel J. Empirical Bolometric Fluxes and Angular Diameters of 1.6 Million Tycho-2 Stars and Radii of 350,000 Stars with Gaia DR1 Parallaxes. Stevens, Daniel J.; Stassun, Keivan G.; Gaudi, B. Scott. // The Astronomical Journal. - 1994. -vol. 154. -issue 6. - page 21
- Stibbs, 1950. Stibbs, D.W.N. A study of the spectrum and magnetic variable star HD 125248 // Monthly Notices of the RAS. - 1950. - volume 110. - page 395
- Thompson et al., 1985. Thompson, I. B. The extraordinary magnetic variation of the helium-strong star HD 37776 - A quadrupole field configuration. Thompson, I. B.; Landstreet, J. D. // Astrophysical Journal. - 1985. - volume 289. - page L9-L13
- Topilskaya, 1993. Topilskaya, G.P. Evolutionary status and chemical composition of the atmospheres of He-weak stars. // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. - 1993. - volume 36. - page 52-71
- van Leeuwen, 2007. van Leeuwen, F. Validation of the new Hipparcos reduction // Astronomy and Astrophysics. - 2007. - volume 474. - page 653-664
- Wade et al, 2000. Wade, G.A. Spectropolarimetric measurements of magnetic Ap and Bp stars in all four Stokes parameters. Wade, G. A.; Donati, J.-F.; Landstreet, J. D.; Shorlin, S. L. S. // Monthly Notices of the RAS. - 2000. - volume 313. - page 823-850
- Wade, 1998. Wade, G.A. Linear spectropolarimetry of AP stars: a new degree of constraint on magnetic structure / Wade, G.A., Donati, J.F., Mathys, G., Piskunov, N. // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. - 1998. -volume 27. - p. 436-440
- Wade, the MiMes Collab., 2015. Wade, G.A., the MiMes Collab. Review: Magnetic Fields of O-Type Stars // Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars, ASP. - 2015. -volume 494. - p. 30

- Warren et al, 1977. Warren, Jr. A photometric study of the Orion OB 1 association. 2: Photometric analysis. Warren, W. H., Jr.; Hesser, J. E. // *Astrophysical Journals*. - 1977. - volume 34. - page 207-231
- Weiss et al, 2000. Weiss, W.W. Spectroscopic Survey of Rapidly Oscillating Ap Stars. Weiss, W. W.; Ryabchikova, T. A.; Kupka, F.; Lueftinger, T. R.; Savanov, I. S.; Malanushenko, V. P. // *IAU Colloq. 176: The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research*. - 2000. - series *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. - volume 203. - page 487-488
- Wolff et al, 1978. Wolff, S.C. Late B-type stars - Rotation and the incidence of HgMn stars. Wolff, S. C.; Preston, G. W. // *Astrophysical Journals*. - 1978. - volume 37. - page 371-392
- Ельяшевич, 1999. М. А. Ельяшевич Зеемана эффект // *Физическая энциклопедия* : [в 5 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. - М.: Советская энциклопедия. -1999
- Ковалева и др., 2002. Ковалева, Д. и др. // *Астрономический журнал*. -2000. -том 79. - стр. 259
- Любимков, 1995. Любимков Л.С. Химический состав звезд: метод и результаты анализа // "Астропринт". - 1995. – Одесса
- Сахибуллин, 2003. Сахибуллин Н.А. Методы моделирования в астрофизике. II. Определение фундаментальных параметров звезд // «Фэн». - 2003. – Казань
- Сивухин, т.4, стр.564, 2002. Сивухин Д.В. / *Общий курс физики. Т.4 Оптика* // М.: Наука. -1980. - стр. 564-768
- Хохлова и др., 2000. Хохлова и др. // *Письма в АЖ*. -2000. -том 26. - стр. 177
- диссертационная работа: Якунин, 2014. Якунин И.А. Поиск и исследование магнитных V_p звезд Главной последовательности: дис. ... канд. физ. -мат. н.: 01.03.02; [Место защиты: Спец. астрофиз. обсерватория РАН] - Нижний Архызю - 2014. - 166 с.

Список рисунков

1.1	Простой эффект Зеемана. Поперечный (а) и продольный (б) эффект	19
1.2	Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля V_e для химически пекулярной звезды Cam [Romanyuk et al, 2014a].	36
1.3	Модель наклонного ротатора.	36
2.1	Общий вид стойки Нэсмит-2	53
2.2	Схема анализатора круговой поляризации: 1 - поворотная ахроматическая $\lambda/4$ пластинка, 2 - диафрагма, 3 - синтетический кристалл со свойствами двулучепреломления, 4 - двойной резатель изображения, 5 - щель спектрографа, 6 - основа конструкции блока.	54
3.1	Кривая блеска видимой звездной величины H_r для звезды HD 5601, построенная с периодом $P = 1.756$ суток.	65
3.2	Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 5601, построенная с периодом $P = 1.756$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).	66
3.3	Кривая блеска видимой звездной величины H_r для звезды HD 19712, построенная с периодом $P = 2.2042$ суток.	69
3.4	Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 19712, построенная с периодом $P = 2.2042$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).	70
3.5	Химическое содержание элементов относительно солнечного для звезд сравнения и исследуемых звезд HD 5601, HD 19712.	71

- 3.6 Диаграмма Герцшпрунга-Рассела для звезд с сильными депрессиями. 74
- 3.7 Ассоциация Орион OB1. Пространственное распределение подгрупп А, В, С, D. 78
- 3.8 Пространственное распределение магнитных и немагнитных звезд [Romanyuk et al, 2013] 82
- 3.9 Частота встречаемости химически пекулярных звезд относительно нормальных тех же спектральных классов (1), частота встречаемости магнитных звезд относительно химически пекулярных (2). 84
- 3.10 Кривая блеска видимой звездной величины для звезды HD 34859, построенная с периодом $P = 1.0462002$ суток. 86
- 3.11 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 34859, построенная с периодом $P = 2.0924179$ суток. 86
- 3.12 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 34859, построенная с периодом $P = 1.0462002$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод). 87
- 3.13 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 34859, построенная с периодом $P = 2.0924179$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод). 87
- 3.14 Кривая блеска изменения видимой звездной величины H_r для звезды HD 35456, построенная с периодом $P = 4.9506$ суток. 89
- 3.15 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 35456, построенная с периодом $P = 4.9506$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод). 90

- 3.16 Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 35456 (черный) в области спектральной линии $H\beta$ 90
- 3.17 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 35177, построенная с периодом $P = 0.5496000$ суток. 91
- 3.18 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 35177, построенная с периодом $P = 0.5496000$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – по измерениям, полученным по спектральной линии $H\beta$, нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод). 92
- 3.19 Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 35881 (черный) в области спектральной линии $H\beta$ 93
- 3.20 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 35881, построенная с периодом $P = 0.6998$ суток. 94
- 3.21 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 35881, построенная с периодом $P = 0.6998$ суток: верхний график по измерениям, полученным по спектральной линии $H\beta$, нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод). 95
- 3.22 Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36313 (черный) в области спектральной линии $H\beta$ 96
- 3.23 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36313, построенная с периодом $P = 1.17862$ суток. 98
- 3.24 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36313, построенная с периодом $P = 1.17862$ суток, по измерениям, полученным по спектральной линии $H\beta$ 98
- 3.25 Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36526 (черный) в области спектральной линии $H\beta$ 99

- 3.26 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36526, построенная с периодом $P = 3.081$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – методом регрессии (дифференциальный метод), нижний график – по измерениям, полученным по спектральной линии $H\beta$ 100
- 3.27 Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36540 (черный) в области спектральной линии $H\beta$ 102
- 3.28 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36540, построенная с периодом $P = 1.8437$ суток. 103
- 3.29 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36540, построенная с периодом $P = 2.172$ 103
- 3.30 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36540, построенная с периодом $P = 1.8437$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – по измерениям, полученным по спектральной линии $H\beta$, нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод). 104
- 3.31 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36540, построенная с периодом $P = 2.172$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – по измерениям, полученным по спектральной линии $H\beta$, нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод). 105
- 3.32 Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36668 (черный) в области спектральной линии $H\beta$ 106
- 3.33 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36668, построенная с периодом $P = 2.11884$ суток. 107

- 3.34 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36668, построенная с периодом $P = 2.11884$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – методом регрессии (дифференциальный метод), нижний график – по измерениям, полученным по спектральной линии H_{β} 108
- 3.35 Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 36916 (черный) в области спектральной линии H_{β} 109
- 3.36 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 36916, построенная с периодом $P = 1.5652386$ суток. 110
- 3.37 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 36916, построенная с периодом $P = 1.5652386$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – методом регрессии (дифференциальный метод), нижний график – по измерениям, полученным по спектральной линии H_{β} 111
- 3.38 Сравнение теоретического (серый) спектра с наблюдаемым для HD 37058 (черный) в области спектральной линии H_{β} 112
- 3.39 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 37058, построенная с периодом $P = 14.6590$ суток. 113
- 3.40 Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 37058, построенная с периодом $P = 14.6590$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – методом регрессии (дифференциальный метод), нижний график – по измерениям, полученным по спектральной линии H_{β} 114
- 3.41 Кривая блеска изменения видимой звездной величины для звезды HD 294046, построенная с периодом $P = 0.8985767$ суток. 115

3.42	Фазовая кривая переменности эффективного продольного магнитного поля для звезды HD 294046, построенная с периодом $P = 0.8985767$ суток: верхний график по измерениям методом центра тяжести (интегральный метод), средний график – по измерениям, полученным по спектральной линии H_{β} , нижний график – методом регрессии (дифференциальный метод).	116
4.1	Пример искажения спектральной линии при наличии пятна на поверхности звезды.	122
4.2	Сравнение синтетических спектров с магнитным полем (серый) и без (черный). Величина поверхностного магнитного поля 1 кГс.	133
4.3	Сравнение синтетических спектров с магнитным полем (серый) и без (черный). Величина поверхностного магнитного поля 5 кГс.	133
4.4	Сравнение синтетических спектров с магнитным полем (серый) и без (черный). Величина поверхностного магнитного поля 10 кГс.	134
4.5	Гистограмма распределения эффективных температур Ap/Vp-звезд поля.	141
4.6	Гистограмма распределения ускорения сил тяжести $\log g$ Ap/Vp-звезд поля.	141
4.7	Гистограмма распределения светимостей Ap/Vp-звезд поля.	143
4.8	Гистограмма распределения масс Ap/Vp-звезд поля.	143
4.9	Гистограмма распределения радиусов Ap/Vp-звезд поля.	144
4.10	Гистограмма распределения проекции скоростей вращения $v_e \sin i$ Ap/Vp-звезд поля.	144
4.11	Гистограмма распределения проекции скоростей вращения $\log (v_e \sin i)$ Ap/Vp-звезд поля.	145
4.12	Гистограмма распределения проекции скоростей вращения $\log (v_e \sin i)$ избранных Ap/Vp-звезд поля.	145
4.13	Гистограмма распределения проекции скорости вращения $v_e \sin i$ Ap/Vp-звезд поля.	149

- 4.14 Гистограммы распределения эффективной температуры нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график – отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации. 151
- 4.15 Гистограммы распределения ускорения силы тяжести нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) звезд ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график – отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации. 152
- 4.16 Гистограммы распределения светимости нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) звезд ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график – отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации. 154
- 4.17 Гистограммы распределения массы нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) звезд ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график – отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации. 155
- 4.18 Гистограммы распределения массы нормальных (normal stars) и химически пекулярных (Ap/Bp stars) звезд ассоциации Орион OB1: левый график показывает общее распределение нормальных и химически пекулярных звезд, правый график – отдельно распределение химически пекулярных звезд и долю каждой подгруппы ассоциации. 156

Список таблиц

1	Наиболее распространенные комбинации для параметров Стокса	25
2	Результаты измерения магнитного поля V_e и лучевой скорости V_R для HD 5601.	64
3	Содержание химических элементов в атмосфере звезды HD 5601.	67
4	Результаты измерений магнитного поля V_e и лучевой скорости V_R для HD 19712.	68
5	Содержание химических элементов в атмосфере звезды HD 19712.	71
6	Фундаментальные параметры звезд с сильными депрессиями.	72
7	Содержание химических элементов в атмосферах звезд с сильными депрессиями. Содержание дано в единицах $\log \frac{N}{N_{total}}$	73
8	Оценки параметров из работы Клочковой [Klochkova, 1985] и Брауна [Brown et al, 1994]. ([Klochkova, 1985]/ [Brown et al, 1994])	79
9	Список магнитных химически пекулярных звезд ассоциации Орион OB1.	83
10	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 34859	85
11	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 35456	88
12	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 35177	91
13	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 35881	94
14	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 36313	97
15	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 36526	99
16	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 36540	102
17	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 36668	107
18	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 36916	110
19	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 37058	113
20	Результаты измерений магнитного поля V_e для HD 294046	115

- 21 Список используемых линий для оценки параметров: проекция скорости вращения $v_e \sin i$ и V_R 132
- 22 Оценка фундаментальных параметров для звезд-стандартов. В скобках указаны литературные данные: 53 Cam [Kochukhov et al, 2004], γ Equ [Shulyak et al, 2013], α^2 CVn [Kochukhov et al, 2002]. . . . 138
- 23 Параметры гистограмм и функции распределения параметров для звезд поля. 142
- 24 Фундаментальные параметры выборок и значения t-критерия. 158

Приложение А

Первичная редукция спектральных данных Основного звездного спектрографа

Обработка спектров проводится в системе ESO MIDAS с использованием контекста Zeeman и ряда других программ, написанных Д.О. Кудрявцевым.

Название файлов, как правило, имеет префикс, содержащий сведения о дате наблюдения, например Bo20130313_001.fts. Для дальнейшей работы названия файлов нужно поменять, дополнительно преобразовав их во внутренний формат MIDAS - .bdf.

Предполагается, что работа ведется в каталоге, содержащем исходные данные в формате FITS. Преобразование делается из командной строки:

```
for i in Bo*.fts; do mv $i `echo $i | sed -e s/Bo20130313_/o/`;
done
```

Данная процедура переименовывает все файлы в текущем каталоге, начинающиеся с Bo и имеющие расширение .fts. Таким образом, что префикс Bo20130313_ меняется на o. Преобразование формата FITS в BDF выполняется также в командной строке:

```
for i in o*.fts; do drs indis/fits $i `echo $i | sed -e s/.fts/.
bdf/`; done
```

Далее выполняем вход в систему MIDAS и загружаем контекст Zeeman:

```
inmidas
set/context zeeman
wri/key zeemode zeeman - контекст, для работы со спектрополяриметр
ическими данными
wri/key spectrum long - спектры получены с длинной щелью
5 wri/key caltab thar - для калибровки используем ThAr лампу
```

Создаем MIDAS-каталог, содержащий все файлы с изображениями, включая и калибровочные:

```
| create/icat All o*.bdf
```

Результатом будет создание текстового файла All.cat, который будет содержать название и размеры каждого изображения.

Далее выполняем обращение изображений по оси Y:

```
| exec/cat flip/ima All.cat y
```

Указанная операция позволяет сразу получить правильный знак поляризации, при условии, что в положении пластинки "ОТЖАТО" был получен первый спектр, а второй - после поворота пластинки "НАЖАТО".

После этого создаем аналогичный каталог для файлов с током смещения (bias) - Bias.cat и каталог для файлов с вычтенным masterbias - Allb.cat.

```
| cre/icat Bias.cat - оставляем только файлы с bias
| cre/icat Allb.cat
```

Из файлов All.cat и Allb.cat удаляем все bias и после каждого названия изображения в файле Allb.cat добавляем префикс -b: o013b.bdf.

Теперь создаем masterbias:

```
| combine/long Bias.cat bias
```

В результате выполнения этой операции будет создан файл bias.bdf, который потом надо вычесть из всех остальных ПЗС-кадров. Вычитание можно сделать отдельно для каждого файла, но можно и пакетно:

```
| exec/cat comp/ima Allb.cat = All.cat - bias.bdf
```

В итоге появятся файлы, в названиях которых будет стоять суффикс b.

На следующем этапе необходимо провести вычитание рассеянного света. Для этого создадим два дисплея:

```
| cre/gra 0 1400,600
| cre/dis 0 1400,600
```

Строим на графическом дисплее сечение спектра яркой звезды, лучше стандарта поля, в направлении поперек дисперсии:

```
| plot/col спектр яркой звезды.bdf 100:4000
```

На графическом дисплее четырьмя отметками выделяем две области, где не содержится спектр звезды (две отметки с одного края, две с другого):

```
| get/gcurs
```

Отметки ставятся левой кнопкой мыши. После завершения процедуры в окне графического дисплея, выполнить нажатие правой кнопкой мыши в любом месте. В терминале появится таблица, где будут показаны данные положения четырех точек. Нам понадобится только столбец с названием Line. Но прежде чем перейти к вычитанию рассеянного света, необходимо внести правки в файл Allb.cat: удалить все файлы калибровочной лампы ThAr. Далее можно начать процедуру вычитания рассеянного света:

```
| exec/cat backlon/zee Allb.cat line1,line2,line3,line4 1.92 3.7
```

Эта процедура занимает много времени, если необходимо учесть рассеянный свет у одного изображения, то это можно сделать этой же командой, но убрать exec/cat и вместо Allb.cat написать название файла. В этой команде числа 1.92 - множитель ПЗС (gain фактор), 3.7 - шум считывания.

Следующий этап - это калибровка спектра сравнения по длинам волн и построение дисперсионной кривой, по которой будет проводиться калибровка изображений:

```
| ref/zee спектр ThAr.bdf
```

На графическом дисплее вначале будет изображено сечение спектра поперек дисперсии, где мышкой нужно выделить слева и справа четвертый по счету слева срез. Затем, в том же окне, появится изображение спектра сравнения. отмечая отдельные линии спектра сравнения левой кнопкой мыши, каждый раз будет необходимо вводить его длину волны в терминале. Ввод подтверждается нажатием клавиши Enter. После этого курсор снова выведет на графический экран, где необходимо выбрать следующую спектральную линию. После того, как закончено с отметками линий, нажимаем правую кнопку мыши на графическом дисплее. На экране появится построенная дисперсионная кривая. Для

построения хорошей кривой нужно отметить как минимум 7-10 линий. Критерий хорошей дисперсионной кривой - это малый разброс значений по оси Y: в идеале, этот разброс должен измеряться в десятый или сотых. Итоговая кривая будет сохранена в виде таблицы с названием: спектр ThAr_c.bdf.

Далее необходимо построить маску положения отдельных срезов на двумерном изображении:

```
|mask/slicer спектр яркой звезды.bdf mask.tbl 14
```

Здесь mask.tbl - это таблица, где будет храниться маска, 14 - количество срезов в изображении (по 7 для каждой поляризации). На графическом дисплее будет отображено сечение кадра поперк дисперсии и на нем левой кнопкой мыши нужно отметить 14 срезов, выделяя каждый с двух сторон. Эту процедуру необходимо проводить аккуратно и тщательно, надо следить за тем, чтобы не захватить лишний фон или наоборот, не вырезать полезную информацию.

Поскольку между отдельными срезами возможны сдвиги по длинам волн, необходимо перед их сложением провести ребиннинг, то есть переразбивку с новым шагом дискретизации:

```
|rebparr/slicer спектр ThAr.bdf mask.tbl rebparr.tbl 3.7 1.92 4. 3 5
```

Здесь rebparr.tbl - итоговая таблица ребиннинга, 4 - номер опорного среза, 3 - максимальное смещение срезов относительно опорного, 5 - степень аппроксимирующего полинома. После запуска команды на графическом дисплее появится изображение участка спектра сравнения, на котором надо выделить с двух сторон яркую эмиссионную линию с двух сторон. После этого будут последовательно показаны результаты аппроксимации отдельных порядков. Если результат устраивает, нажимаем Enter, если нет, то выходим правой кнопкой мыши и запускаем процедуру повторно, изменив например степень аппроксимации. Если это не улучшает картину, то тогда следует вернуться к шагу определения маски и повторить ее, отмечая срезы более аккуратно.

Заключительный этап первичной обработки - экстракция одномерных спектров. Для этого нужно отредактировать файл Allb.cat. После процедуры уче-

та рассеянного света, к названиям изображений добавился суффикс t, но в файл каталога мы этого не занесли. Если пропустить эту процедуру, то экстракция будет тех изображений, у которых есть только суффикс b, то есть с вычтенным masterbias, но без учета рассеянного света. Поэтому в файле Allb.cat к названию каждого изображения добавляем суффикс t после b: o013bt.bdf. После этого можно производить экстракцию спектров:

```
| exec/cat extrac/slicer Allb.cat mask.tbl rebpar.tbl 3.7 1.92 спект  
p ThAr_c.tbl
```

В итоге, для каждого исходного изображения будет получено по два спектра с суффиксами _1 - правоориентированная циркулярная поляризация и _2 - левоориентированная. Далее работа ведется с этими наборами данных. Так как мы получаем два набора данных для одной и той же звезды (глава 2), то чтобы избавиться от инструментальной поляризации и повысить сигнал/шум итоговых спектров, надо сложить одинаковые поляризации и получить среднее значение:

```
| comp/ima название звезды_1 = (спектр01_1 + спектр02_2) / 2  
| comp/ima название звезды_2 = (спектр01_2 + спектр02_1) / 2
```

После этого, для итоговых спектров надо учесть гелиоцентрическую поправку за движение Земли. Эта очень важная процедура, так как неправильный учет этой величины привнесет большую ошибку в определение лучевой скорости звезды:

```
| correct/rv спектр звезды_1
```

Процедура начнет запрашивать данные по этой звезде: ее координаты, время середины экспозиции в UT (то есть время начала экспозиции второго спектра в положении "НАЖАТО"), начальную эпоху. После этого, на графическом экране появятся два спектра звезды, сдвинутые на гелиоцентрическую поправку.

После этого можно провести нормировку спектров:

```
| norm/zee спектр звезды_1.bdf
```

На графическом экране будет загружен спектр. Сперва надо определить границы положения континуума звезды, сделать это можно двумя нажатиями на экран

левой кнопкой мыши выше и ниже континуума. После этого, этот участок увеличится и будет предложено провести континуум. Для этого равномерно ставим точки на континууме звезды. При этом не надо уходить в крайность, достаточно 10-15 точек. Когда процедура будет закончена, жмем правую кнопку мыши на графическом дисплее и программа проведет через точки кривую. Если она удовлетворяет континууму звезды, то жмем Yes и произойдет нормировка спектра, если результат проведения континуума не устраивает, тогда жмем No и прерываем эту процедуру заново.

Нормировка спектров - это заключительный этап. Для дальнейшего анализа необходимо из внутреннего формата .bdf вернуться в формат .fits:

```
| outd/fits спектр звезды_1.bdf спектр звезды_1.fits
```

После этого выходим из MIDAS:

```
| bye
```

Приложение Б

**Результаты измерений магнитных полей и фундаментальных параметров
магнитных химически пекулярных звезд**

Звезда	JD (+2450000)	S/N	$B_e(z) \pm \sigma$, Гс	$B_e(r) \pm \sigma$, Гс	$B_e(h)$, Гс	$v_e \sin i$, км с ⁻¹	V_R , км с ⁻¹	T_{eff} , K	$\log g$	$\log \frac{L}{L_\odot}$	$\frac{M}{M_\odot}$	$\frac{R}{R_\odot}$
⊛HD 653	5488.445	200	-30 ± 110(z)	-100 ± 140(r)	-550 (h)	80 ± 13	+30.2 ± 2.6	10000	3.8	1.4	2.4	3.2
	5554.220	220	+130 ± 110(z)	+320 ± 80(r)	-800 (h)	70 ± 10	-17.0 ± 3.4					
⊛HD 965	5017.511	200	-150 ± 40(m)		+400 (h)	20.3 ± 3.5	-3.5 ± 1.7	8000	3.6	1.4	1.8	3.5
	5075.438	200	+240 ± 50(m)		-700 (h)	21.2 ± 2.6	9.8 ± 2.9					
	5431.458	170	-70 ± 20(z)				-1.0 ± 1.8					
	5459.492	200	-240 ± 50(z)				-4.5 ± 2.6					
	5461.462	230	-140 ± 50(z)				-3.4 ± 2.9					
	5553.174	200	-340 ± 20(z)	-330 ± 40(r)			-1.3 ± 1.0					
	5555.139	140	-360 ± 30(z)	-330 ± 20(r)			-3.2 ± 2.4					
	5583.148	120	-390 ± 32 (z)	-359 ± 26 (r)			+1.5 ± 2.8					
	5842.411	120	-688 ± 35 (z)	-624 ± 23 (r)	-2500 (h)		+1.4 ± 2.3					
	5843.397	120	-617 ± 37 (z)	-643 ± 23 (r)			-1.7 ± 2.2					
5871.176	120	-484 ± 50 (z)	-470 ± 29 (r)			-1.8 ± 2.6						
⊛HD 2453		320			+630 ± 170(h)		-16.4 ± 2.2	8600	4.0	1.8	2.0	4.2
⊛HD 2887	4955.521	230	+20 ± 70(m)			42.2 ± 3.4	-7.8 ± 1.2	8500	3.9	1.7	2.0	2.6
	5015.475	230	+350 ± 80(m)			47.9 ± 3.1	-5.8 ± 2.4					
⊛HD 5441*	5019.508	240	-410 ± 50(m)			20.7 ± 2.2	18.3 ± 1.2	8000	3.8	1.4	1.8	2.04
	5136.350	250	-420 ± 50(m)		+1900 (h)	21.1 ± 2.9	37.1 ± 2.3					
	5488.479	190	-440 ± 20(z)	-450 ± 20(r)	+150 (h)	21 ± 3	+43.6 ± 2.4					
⊛HD 5458	5584.175	190	-956 ± 1870 (z)	+318 ± 235 (r)	-70 (h)	97.0 ± 6.8	-18.8 ± 2.6	20000	4.3	3.3	6.6	4.0
⊛HD 5797	4955.508	180	+780 ± 50(m)		-140 (h)	21.5 ± 3.9	-10.5 ± 1.9	7500	3.8	1.4	1.7	2.7
	5077.521	200	+850 ± 50(m)		-150 (h)	20.3 ± 1.9	-5.6 ± 1.5					
	5171.367	200				20.0	-					
	5255.218	200	-70 ± 50(z)			20.0	-3.3 ± 1.1					
⊛HD 6757	5075.400	400	+2820 ± 90(m)		-380 (h)	25.6 ± 3.3	2.8 ± 1.6	9500	3.8	1.7	2.3	3.1
	5431.550	330	+2800 ± 90(z)		-400 (h)	28 ± 5	-9.4 ± 2.4					
	5764.468	290	+2767 ± 90 (z)	+2209 ± 31 (r)	+1110 ± 130(h)	21.2 ± 2.6	-7.1 ± 2.9					
⊛HD 8441	5764.482	350	+124 ± 14 (z)	+133 ± 15 (r)		23.4 ± 2.8	-19.6 ± 2.7	9000	3.5	2.1	2.1	3.8
⊛HD 11529	5583.167	430	-20 ± 147 (z)	-19 ± 118 (r)		45.7 ± 5.3	-44.1 ± 2.8	13000	3.5	2.7	3.4	5.4
	5584.145	400	-108 ± 102 (z)	-98 ± 94 (r)		50.0 ± 6.7	-36.7 ± 2.7					
	5765.429	640	-161 ± 112 (z)	-98 ± 49 (r)	-200 (h)	47.9 ± 4.9	-16.3 ± 3.1					
⊛HD 16705	5553.192	350	-3720 ± 1660(z)	+720 ± 200(r)		100 ± 8	-12.2 ± 2.9	12000	3.8	2.1	3.1	3.6
⊛HD 17330*	5553.225	300	+150 ± 320(z)	-420 ± 30(r)	+590 ± 160(h)	20.0	-13.6 ± 2.8	13000	3.5	2.4	3.4	5.4
	5841.483	520	-508 ± 21 (z)	-410 ± 20 (r)		25.0 ± 3.2	-9.0 ± 2.4					

	5871.209	220	-958 ± 52 (z)	-813 ± 61 (r)	+250 (h)	23.3 ± 2.9	-13.0 ± 2.9						
*HD 19712	5075.556	330	+1710 ± 140(m)			45.4 ± 3.7	+20.7 ± 2.2	10200	4.0	1.4	2.5	2.6	
*HD 22326	5015.529	300	-10 ± 50(m)			22.7 ± 3.2	+16.8 ± 1.8						
*HD 23924	5136.596	250	-350 ± 180(m)			42.1 ± 4.3	-42.4 ± 1.7	7700	4.2	1.3	1.7	1.7	
*HD 23964	5555.475	250	-10 ± 30(z)		+110 ± 160(h)	20 ± 3	+10.2 ± 1.9	10000	3.7	1.5	2.4	3.6	
	5584.394	230	+50 ± 44 (z)	-70 ± 63 (r)		24.5 ± 2.4	+42.2 ± 3.4						
*HD 25999	5139.575	450	-1290 ± 310(m)			41.8 ± 3.8	-7.4 ± 2.2	7400	3.8	1.4	1.6	2.7	
*HD 27404	5075.568	280	+1470 ± 120(m)			40.6 ± 3.8	+18.4 ± 1.4	11300	3.9	1.9	2.8	3.1	
HD 29762	5555.456	250	+300 ± 50(z)	+190 ± 60(r)	+18 (h)	32 ± 4	-9.2 ± 1.7	8000	3.7	1.4	1.8	8.0	
	5584.437	220	+562 ± 64 (z)	+465 ± 39 (r)	-30 (h)	23.2 ± 2.6	-5.9 ± 2.1						
*HD 32549	5136.625	400	+160 ± 390(m)		+50 (h)	43.3 ± 3.6	+31.1 ± 1.9	10800	3.6	2.9	2.7	4.3	
	5488.619	600	+140 ± 80(z)	+60 ± 70(r)	-80 (h)	61 ± 6	+24.3 ± 2.8						
	5554.495	800	-250 ± 120(z)	+280 ± 150(r)			+10.0 ± 2.9						
HD 33256	5202.267	500	+20 ± 20(z)			29.3 ± 3.4	-21.2 ± 2.4	6000	4.0	0.7	1.2	1.8	
	5488.571	400	-10 ± 10(z)	-10 ± 10(r)		23.3 ± 2.7	+14.6 ± 2.5						
	5554.253	500	-50 ± 10(z)	-50 ± 10(r)			+3.6 ± 1.5						
	5555.245	800	0 ± 10(z)	+10 ± 10(r)			+6.0 ± 3.1						
	5582.267	410	-5 ± 8 (z)	-21 ± 25 (r)	-950 (h)		+19.7 ± 2.3						
	5583.267	350	-7 ± 10 (z)	-6 ± 21 (r)	+2500 (h)		+13.0 ± 2.6						
	5584.213	230	+43 ± 16 (z)	+36 ± 21 (r)	+1650 (h)		+16.6 ± 2.3						
	5873.485	380	-27 ± 9 (z)	-34 ± 42 (r)	+3500 (h)		+18.4 ± 2.6						
*HD 34307	5553.313	300	-50 ± 90(z)	+160 ± 180(r)	+3700 (h)	40 ± 4	+29.8 ± 2.8	13000	4.5	2.5	3.4	1.7	
*HD 35100	5139.623	150	+1200 ± 140(m)		-4000 (h)	29.8 ± 3.3	-23.4 ± 1.4	7500	3.7	1.4	1.7	3.0	
*HD 35101	5553.577	400	+600 ± 950(z)	-30 ± 190(r)	-2730 (h)	110 ± 30	-18.9 ± 2.8	10600	4.0	1.7	2.6	2.7	
	5554.592	400	+740 ± 530(z)	-430 ± 190(r)			-25.7 ± 2.5						
HD 35298	5554.300	400	-6090 ± 300(z)	-3440 ± 150(r)		50 ± 7	+20.9 ± 3.4	14500	3.7	2.5	4.0	4.6	
	5582.378	230	-7594 ± 990 (z)	-1424 ± 158 (r)		60.0 ± 9.1	+30.6 ± 2.7						
	5583.337	350	+2871 ± 355 (z)	+1638 ± 162 (r)		50.0 ± 8.6	+19.8 ± 2.5						
	5584.362	230	+3911 ± 1124 (z)	+281 ± 198 (r)		50.0 ± 8.4	+43.0 ± 2.9						
	5842.443	350	+4301 ± 379 (z)	+2923 ± 197 (r)	-150 (h)	57.8 ± 8.6	+18.4 ± 2.8						
	5842.594	320	+3783 ± 486 (z)	+2689 ± 142 (r)	+150 (h)	60.0 ± 9.2	+17.6 ± 2.6						
	5843.459	320	-5090 ± 362 (z)	-2884 ± 108 (r)		55.0 ± 7.7	+28.6 ± 2.7						
	5873.545	320	-7195 ± 739 (z)	-1938 ± 123 (r)		60.0 ± 9.8	+27.8 ± 2.3						
*HD 35379	5552.565	300	-200 ± 110(z)	-250 ± 120(r)		45 ± 5	+3.7 ± 2.8	11100	3.5	1.7	2.8	4.9	
*HD 35456	5554.338	400	+650 ± 70(z)	+640 ± 80(r)	+1700 (h)	22 ± 2	+11.0 ± 2.8	13200	3.2	2.7	3.5	7.7	

⊛HD 35548	5553.294	500	-10 ± 20(z)	+20 ± 60(r)	+900 (h)	20.0	-9.3 ± 2.4	12000	4.0	2.0	3.1	2.9
HD 35575	5553.304	500	-200 ± 490(z)	+310 ± 270(r)		150 ± 10	+24.2 ± 2.9	15000	3.7	2.6	3.2	4.8
HD 35730	5553.238	400	+150 ± 320(z)	-30 ± 220(r)		54 ± 6	+22.7 ± 2.7	17000	3.8	2.6	5.0	4.7
	5841.581	360	-450 ± 300 (z)	-88 ± 78 (r)		71.3 ± 10.4	+21.0 ± 2.8					
	5842.594	300	-409 ± 202 (z)	-25 ± 92 (r)		65.9 ± 9.2	+18.4 ± 2.9					
HD 35881	5553.258	500	-1070 ± 590(z)	-1130 ± 370(r)		205 ± 20	+19.5 ± 3.7	14000	3.8	2.3	3.8	4.0
⊛HD 36032	5553.454	300	-900 ± 200(z)	-110 ± 230(r)		205 ± 16	+29.6 ± 3.4	10800	4.0	1.6	2.7	2.7
HD 36313	5554.320	400	+120 ± 120(z)	+560 ± 180(r)	-2550 (h)	27 ± 2	+43.0 ± 2.9	12000	4.0	2.1	3.1	2.9
	5842.501	280	+64 ± 161 (z)	+481 ± 193 (r)	-2650 (h)	40.0 ^a ± 8, 170.0 ^b ± 2	-12.4 ^a ± 2, +25.0 ^b ± 3.1					
	5843.542	280	+41 ± 131 (z)	+252 ± 170 (r)		30.0 ^a ± 6, 160.0 ^b ± 2	+60.6 ^a ± 4, +29.5 ^b ± 4.1					
HD 36485	5553.247	400	-2350 ± 250(z)	-2310 ± 120(r)		40+-3	+22.1 ± 3.5	17000	3.8	3.5	5.0	4.7
	5553.480	400	-2330 ± 220(z)	-2210 ± 190(r)	-2700 (h)							
	5554.263	400	-2400 ± 210(z)	-2270 ± 120(r)			+15.7 ± 2.6					
	5554.481	400	-2700 ± 230(z)	-2570 ± 180(r)	-100 (h)							
	5555.254	400	-2830 ± 260(z)	-2470 ± 160(r)	-2500 (h)		+16.4 ± 2.4					
	5555.485	300	-2830 ± 320(z)	-2370 ± 120(r)								
	5582.279	370	-2313 ± 241 (z)	-2346 ± 115 (r)	-1350 (h)	45.0 ± 4.2	+27.1 ± 2.9					
	5583.279	320	-3035 ± 261 (z)	-2245 ± 122 (r)	-3300 (h)	45.0 ± 3.8	+21.1 ± 2.7					
	5873.499	320			-1800 (h)		+13.9 ± 2.1					
HD 36526	5553.338	400	+2730 ± 320(z)	+2180 ± 170(r)		45 ± 5	+21.5 ± 3.4	15000	3.7	1.7	4.2	4.8
	5842.531	310	-1506 ± 396 (z)	-287 ± 212 (r)	-500 (h)	50.1 ± 5.2	+26.6 ± 2.8					
HD 36540	5553.367	400	+400 ± 250(z)	+650 ± 300(r)		80 ± 15	+14.0 ± 2.9	14500	3.9	2.0	4.0	3.7
	5873.553	300	-547 ± 418 (z)	-402 ± 162 (r)		70.0 ± 8.1	+30.8 ± 2.9					
⊛HD 36627	5843.567	360	+1970 ± 3440 (z)	-704 ± 377 (r)		300.0 ± 55.1	+12.5 ± 6.7	12200	3.9	2.2	3.1	3.3
HD 36629	5553.385	400	+80 ± 50(z)	+70 ± 100(r)		23 ± 5	+35.0 ± 3.7	18800	3.8	3.3	5.9	5.1
HD 36668	5582.359	240	-1043 ± 252 (z)	-540 ± 142 (r)		60.0 ± 8.4	+32.9 ± 2.7	12500	3.9	1.7	3.2	3.3
	5583.306	310	-1537 ± 220 (z)	-1428 ± 153 (r)		73.2 ± 7.6	+29.1 ± 2.9					
	5842.474	310	-1172 ± 348 (z)	-1137 ± 48 (r)		59.3 ± 6.7	+38.5 ± 3.4					
HD 36916	5554.347	400	-950 ± 150(z)	-660 ± 220(r)	-1040 (h)	42 ± 5	+12.7 ± 2.9	15000	4.0	2.4	4.2	3.4
	5842.548	320	-572 ± 227 (z)	-355 ± 149 (r)	-900 (h)		+12.4 ± 3.7					
HD 36982	5554.368	300	+170 ± 330(z)	+200 ± 100(r)	-600 (h)		+16.2 ± 3.7	19500	3.8	2.8	6.3	5.2
HD 37058	5582.301	230	-1251 ± 66 (z)	-1097 ± 67 (r)	-4300 (h)	35.0 ± 4.2	+30.6 ± 2.3	17000	3.7	2.9	5.0	5.2
	5583.461	270	-1142 ± 50 (z)	-1131 ± 62 (r)		30.4 ± 3.8	+29.8 ± 2.4					

	5842.618	300	-119 ± 41 (z)	-105 ± 45 (r)	+5300 (h)	30.0 ± 3.2	+26.9 ± 2.7						
	5843.506	420	-443 ± 44 (z)	-324 ± 86 (r)	+250 (h)	33.0 ± 2.9	+29.0 ± 2.6						
	5873.586	230	-945 ± 78 (z)	-799 ± 55 (r)	+4100 (h)	35.0 ± 3.2	+26.9 ± 2.7						
HD 37140	5555.298	400	-580 ± 90 (z)	-350 ± 90 (r)		25 ± 2	+23.4 ± 2.4	13500	3.7	1.7	3.6	4.4	
HD 37151	5555.503	400	9 ± 85 (z)	+32 ± 49 (r)	0 (h)	30 ± 3	+18.2 ± 2.7	13000	4.1	1.9	3.4	2.7	
HD 37479	5555.325	400	-1050 ± 1080 (z)	+140 ± 330 (r)		100 ± 25	+15.0 ± 2.9	21500	3.4	3.6	7.8	10.4	
	5582.343	310	+4349 ± 539 (z)	+1631 ± 274 (r)		163.0 ± 24.1	+32.8 ± 4.1						
	5583.356	280	-3333 ± 1086 (z)	-708 ± 388 (r)		153.0 ± 16.8	+29.8 ± 3.7						
HD 37525	5555.342	400	+670 ± 1670 (z)	+20 ± 290 (r)	-110 ± 210 (h)	150 ± 30	+39.0 ± 3.4	14600	3.9	2.2	4.0	3.4	
HD 37642	5582.314	220	+1777 ± 686 (z)	+2111 ± 307 (r)	+100 ± 280 (h)	120.0 ± 16.4	+29.1 ± 3.7	15000	3.8	2.6	4.2	4.2	
	5583.369	260	+1941 ± 556 (z)	+964 ± 217 (r)	+20 (h)	114.5 ± 13.9	+28.8 ± 3.9						
	5873.602	220	+1523 ± 731 (z)	+1730 ± 343 (r)	-70 (h)	120.0 ± 14.9	+29.4 ± 3.2						
HD 37687	5555.507	400	+580 ± 40 (z)	+490 ± 40 (r)	-820 ± 170(h)	22 ± 3	+18.1 ± 2.3	13000	3.4	2.2	3.4	6.1	
	5843.517	400	+562 ± 38 (z)	+537 ± 46 (r)	+430 ± 160(h)	24.9 ± 2.9	+28.5 ± 2.7						
HD 37776	5171.497	800	-2980 ± 840(m)		-1980 ± 250(h)	79.2 ± 5.3	+23.2 ± 2.4	20500	3.3	3.4	6.9	9.7	
	5282.183	600	+8600 ± 1700 (z)	+2090 ± 170 (r)	-280 ± 150 (h)		+26.5 ± 3.1						
	5284.233	500	-6200 ± 7100 (z)	-130 ± 290 (r)	+300 (h)		+23.6 ± 3.7						
⊛HD 38104	5202.600	700	+160 ± 110 (z)			35 ± 5	+3.8 ± 1.1	8300	3.7	1.7	1.9	3.2	
	5288.306	500	0 ± 50 (z)		-150 (h)		-2.4 ± 1.4						
⊛HD 38129*	5584.482	150	-174 ± 78 (z)	-189 ± 66 (r)	-200 (h)	25.6 ± 2.8	+15.1 ± 2.9	8700	3.4	1.8	2.0	4.7	
	5873.639	220	-246 ± 52 (z)	-159 ± 187 (r)	-300 (h)	32.3 ± 3.8	+16.4 ± 2.8						
⊛HD 38823	4903.246	300	-920 ± 80(m)		-200 (h)	21.2 ± 3.7	-6.8 ± 2.5	7700	4.3	1.5	1.7	1.4	
	5136.569	300	+1230 ± 80(m)		-2100 ± 210(h)	22.5 ± 3.5	-10.9 ± 1.7						
	5139.498	300	-2310 ± 80(m)		+2080 ± 350(h)	26.8 ± 3.3	-10.9 ± 1.2						
	5202.600	300	-220 ± 80 (z)		-1650 ± 260 (h)	36 ± 3	+3.6 ± 1.2						
⊛HD 38979	5674.250	220	+1546 ± 1160 (z)	+157 ± 134 (r)		70.3 ± 9.4	-5.7 ± 2.4	12000	3.7	2.1	3.1	4.1	
⊛HD 39317	5554.500	500	+10 ± 110 (z)	+50 ± 160 (r)		70 ± 15	-12.1 ± 2.6	9500	3.7	1.9	2.3	3.5	
⊛HD 43112	5582.485	300	-114 ± 21 (z)	-110 ± 33 (r)		25.0 ± 3.4	+39.8 ± 2.9	22000	3.4	3.7	7.8	9.2	
	5583.395	300	-3 ± 26 (z)	-21 ± 51 (r)		25.0 ± 3.7	+38.5 ± 2.6						
⊛HD 44700	5582.422	310	+100 ± 94 (z)	-3 ± 76 (r)		30.0 ± 4.1	+31.2 ± 2.9	16500	4.0	2.9	4.8	3.6	
	5583.395	300	-3 ± 26 (z)	-21 ± 51 (r)	-3100 (h)	26.2 ± 3.1	+27.9 ± 3.1						
⊛HD 45583	4903.285	560	-2250 ± 360(m)			67.2 ± 10.6	+26.4 ± 1.6	13000	4.0	2.4	2.9	5.0	
	5139.533	560	+3850 ± 490(m)			68.4 ± 6.5	+31.5 ± 2.3						
	5202.348	400	-2400 ± 200 (z)				+21.4 ± 2.8						
	5284.272	300	+5320 ± 470 (z)	+2700 ± 100 (r)		80 ± 10	+24.8 ± 3.8						

	5488.592	500	+5710 ± 620 (z)	+2160 ± 170 (r)			+32.3 ± 2.7						
	5552.485	400	+2770 ± 290 (z)	+2650 ± 190 (r)			+23.4 ± 2.8						
	5553.425	500	+4807 ± 403 (z)	+2670 ± 190 (r)	+200 (h)		+30.0 ± 2.9						
⊗HD 47152*	5553.425				+200 (h)			12000	4.5	2.1	3.1	1.6	
	5584.511	130	-631 ± 291 (z)	-283 ± 125 (r)		32.0 ± 3.9	+11.8 ± 2.7						
⊗HD 48331	4901.311	240	-1490 ± 1500(m)			27.6 ± 3.3	-7.9 ± 2.7						
	4903.202	280	<2000			25.6 ± 3.8	-7.5 ± 2.6						
⊗HD 49884*	5283.302	300	-100 ± 50 (z)	-180 ± 30 (r)		20.0	-6.9 ± 2.7	8000	3.3	1.6	1.7	4.8	
	5284.297	400	-190 ± 40 (z)	-125 ± 10 (r)			+0.3 ± 0.1						
	5552.625	200	-310 ± 40 (z)	-290 ± 30 (r)	+600 (h)		-5.5 ± 2.7						
⊗HD 50169	5282.238	300	+130 ± 50 (z)	+80 ± 15 (r)	-500 (h)	20.0	+14.6 ± 2.4	9200	3.8	1.7	2.2	3.1	
⊗HD 50341*	5666.281	200	+50 ± 290 (z)	+45 ± 83 (r)		45.0 ± 3.9	-6.7 ± 2.8	9500	3.5	1.5	2.3	4.4	
	5674.277	200	+587 ± 215 (z)	+250 ± 70 (r)		43.7 ± 4.9	-7.2 ± 2.5						
⊗HD 50461	5554.418	400	+1550 ± 770 (z)	+290 ± 220 (r)		80 ± 15	+29.5 ± 3.4	11000	3.5	1.8	2.7	4.9	
⊗HD 51418	5281.438	300	+520 ± 50 (z)			28 ± 5	-28.3 ± 2.6	9500	3.7	1.4	2.3	3.5	
	5282.306	700	-460 ± 70 (z)	-520 ± 40 (r)			-33.2 ± 2.7						
	5283.318	400	+360 ± 60 (z)	+320 ± 30 (r)	-320 (h)		-30.7 ± 3.1						
	5284.354	500	-250 ± 40 (z)	-200 ± 20 (r)	-160 (h)		-25.1 ± 2.4						
⊗HD 52559	5582.443	250	-10 ± 50 (z)	+81 ± 57 (r)	+90 (h)	20.0 ± 2.6	+50.7 ± 2.9	17500	3.5	2.6	5.3	6.8	
	5583.459	260	-38 ± 43 (z)	-1 ± 66 (r)		19.8 ± 2.9	+45.2 ± 2.7						
HD 52711	4903.162	280	+40 ± 10(m)			20.9 ± 3.2	24.9 ± 1.6	6000	4.3	0.6	1.2	1.3	
	5288.294	400	-40 ± 20 (z)		-600 (h)	33 ± 5	+30.9 ± 2.7						
⊗HD 54824*	5283.279	300	-690 ± 180 (z)	-482 ± 50 (r)	-700 (h)	50 ± 10	+27.0 ± 2.8	9000	4.0	1.9	2.1	2.4	
	5552.604	350	+470 ± 120 (z)	+200 ± 160 (r)	+800 (h)		+29.7 ± 2.9						
	5553.598	300	-630 ± 70 (z)	-470 ± 110 (r)	+1100 (h)		+35.5 ± 2.9						
⊗HD 58599	5581.504	210	+222 ± 341 (z)	-118 ± 105 (r)		40.0 ± 5.1	+29.6 ± 3.1	13000	3.5	2.8	3.0	4.4	
	5583.467	320	+460 ± 186 (z)	+126 ± 122 (r)	-1590 ± 250(h)	40.0 ± 4.8	+36.9 ± 3.4						
⊗HD 60325	5582.406	260	+303 ± 565 (z)	+138 ± 182 (r)	+1980 ± 160(h)	140.0 ± 16.2	+22.1 ± 2.8	17500	3.1	3.2	6.0	9.5	
⊗HD 62512	5553.545	300	-80 ± 50 (z)	-100 ± 50 (r)	-2460 ± 270(h)	22 ± 5	+12.0 ± 2.8	11300	4.2	2.2	2.8	2.2	
	5554.518	300	-180 ± 40 (z)	-200 ± 70 (r)	+2480 ± 180(h)		+4.2 ± 3.6						
⊗HD 63347*	5666.267	140	-1000 ± 190 (z)	-590 ± 60 (r)	-2410 ± 210(h)	33.7 ± 3.6	-2.1 ± 2.1	10400	4.0	1.8	2.5	2.6	
	5673.411	130	-1380 ± 120 (z)	-830 ± 59 (r)	-930 ± 260(h)	36.2 ± 3.4	+6.5 ± 2.4						
	5674.324	200	+790 ± 80 (z)	+644 ± 36 (r)	+2560 ± 250(h)	33.2 ± 3.8	+0.0 ± 2.1						
	5784.506	360	+1363 ± 70 (z)	+1319 ± 41 (r)		37.4 ± 3.7	+5.3 ± 2.9						
⊗HD 65339 (53 Cam)	4901.338	300	-5190 ± 170(m)		+2280 ± 180(h)	28.4 ± 3.3	+19.3 ± 4.3	8100	4.0	1.5	1.9	2.3	

	4903.304	250	-2180 ± 190(m)		+2740 ± 300 (h)	26.3 ± 3.7	-3.7 ± 1.7					
	4955.303	330	+3690 ± 100(m)			25.8 ± 3.7	-1.9 ± 1.3					
	5015.242	310	-4780 ± 180(m)			28.4 ± 3.5	-7.1 ± 1.4					
	5075.537	500	+4280 ± 130(m)			25.3 ± 3.3	-2.8 ± 1.3					
	5077.529	320	-5400 ± 160(m)			23.7 ± 2.6	10.5 ± 1.9					
	5136.331	300	-510 ± 160(m)		-3630 ± 250 (h)	24.4 ± 3.4	-3.2 ± 2.5					
	5139.421	250	+3840 ± 120(m)		+2450 ± 250 (h)	22.6 ± 3.3	-3.5 ± 1.4					
	5171.385	500	+3610 ± 100(m)			23.9 ± 2.9	-3.4 ± 1.6					
	5171.523	500	+3490 ± 100(m)			24.7 ± 3.3	-6.7 ± 1.9					
	5202.608	600	+3740 ± 100 (z)		-790 (h)	25 ± 5	-1.2 ± 1.0					
	5281.451	600	+2340 ± 190 (z)		-2700 (h)		-2.4 ± 1.7					
	5282.285	600	-3190 ± 120 (z)	-3080 ± 50 (r)	+700 (h)		-5.7 ± 2.4					
	5283.330	500	+3520 ± 170 (z)	+3350 ± 40 (r)	+500 (h)		-8.6 ± 3.7					
	5284.329	500	+3460 ± 170 (z)	+3030 ± 50 (r)	-3500 (h)		-2.4 ± 2.1					
	5311.318	500	-6450 ± 150 (z)				-7.7 ± 2.9					
	5315.335	400	+3990 ± 90 (z)		-170 ± 290(h)		-2.1 ± 2.0					
	5348.260	400	+4050 ± 120 (z)	+3700 ± 40 (r)	-60 ± 360(h)		-3.2 ± 1.3					
	5552.638	400	-5580 ± 190 (z)		+3 ± 330(h)		-11.7 ± 2.9					
	5582.522	240	-1027 ± 200 (z)	-1131 ± 66 (r)	-2 ± 360(h)	24.9 ± 4.5	-4.5 ± 2.3					
	5583.523	350	-6063 ± 191 (z)	-4573 ± 54 (r)	-190 ± 310(h)	22.4 ± 3.1	-5.3 ± 2.1					
	5666.281	220	+340 ± 136 (z)	+500 ± 50 (r)		21.7 ± 2.8	-5.1 ± 2.2					
	5674.295	300	+550 ± 150 (z)	+275 ± 45 (r)	+40 ± 350(h)	23.4 ± 3.1	-7.5 ± 2.1					
	5873.633	250	-5386 ± 175 (z)	-4089 ± 51 (r)	+600 (h)	21.6 ± 3.4	-4.2 ± 2.2					
HD 71369	4901.343	700	-30 ± 6(m)			24.3 ± 2.9	+30.5 ± 2.4	5200	4.4	0.5	0.9	1.0
	4955.297	1400	-14 ± 6(m)		-260 ± 240 (h)	24.3 ± 2.3	+15.7 ± 1.6					
	5015.235	1000	-51 ± 4(m)			26.7 ± 2.5	+8.8 ± 2.4					
	5077.533	1400	-5 ± 4(m)			27.2 ± 2.8	+18.6 ± 3.4					
	5136.338	1300	-11 ± 4(m)			25.5 ± 3.3	+14.1 ± 2.1					
	5139.440	1200	-27 ± 8(m)			-	+18.8 ± 2.5					
	5171.393	1200	-41 ± 4(m)		+150 ± 290(h)	25.5 ± 2.9	+22.9 ± 1.7					
	5171.530	1600	+12 ± 7(m)		-30 ± 310 (h)	26.3 ± 2.3	+24.8 ± 2.3					
⊗HD 79976	5674.221	80	+136 ± 270 (z)	+169 ± 89 (r)		40.9 ± 3.9	-0.7 ± 2.1	9000	3.5	1.6	2.1	4.3
⊗HD 89069*	5202.658	400	-400 ± 50 (z)			20.0	-2.5 ± 1.1	8000	3.8	1.4	1.8	2.8
	5311.381	300	-720 ± 30 (z)		-300 (h)		-12.7 ± 2.8					
	5315.395	200	-250 ± 20 (z)	-260 ± 30 (r)	-300 (h)		-7.8 ± 2.9					

⊛HD 90763	5552.668	400	+180 ± 80 (z)	-40 ± 60 (r)		50 ± 5	-26.0 ± 3.8	9500	4.0	1.3	2.3	2.5
	5553.592	500	-120 ± 110 (z)	+100 ± 100 (r)			-25.5 ± 3.4					
	5554.625	500	+170 ± 70 (z)	-220 ± 130 (r)			-32.7 ± 3.6					
HD 93294	5171.564	300	+50 ± 50(m)			25.1 ± 2.8	+19.7 ± 1.7	5600	4.5	0.7	1.1	1.0
	5202.560	400	-40 ± 50 (z)			20.0	+25.7 ± 2.6					
	5348.248	300	-90 ± 20 (z)	-80 ± 20 (r)			+21.3 ± 2.1					
⊛HD 96003*	5345.256	600	-210 ± 20 (z)		-700 (h)	20.0	-13.7 ± 2.4	9200	3.8	1.6	2.2	3.1
	5674.394	300	-150 ± 14 (z)	-136 ± 8 (r)	-340 (h)	21.3 ± 2.9	-10.0 ± 2.4					
	5702.235	320	-182 ± 15 (z)	-220 ± 10 (r)	+20 (h)	22.5 ± 2.8	-3.6 ± 2.7					
⊛HD 97633	5552.675	1500	+40 ± 20 (z)	-30 ± 70 (r)		25 ± 5	-4.9 ± 2.5	9500	3.5	1.4	2.3	4.4
	5553.673	1000	+13 ± 20 (z)	-20 ± 40 (r)	+620 ± 150(h)		-1.0 ± 2.9					
	5554.640	1500	+120 ± 30 (z)	+40 ± 50 (r)	-870 ± 90(h)		-7.5 ± 2.6					
⊛HD 108506	5553.708	400	+370 ± 510 (z)	-560 ± 330 (r)	-850 ± 100(h)	150 ± 20	0.0 ± 1.6	7500	4.0	1.1	1.3	1.9
	5554.633	500	+160 ± 250 (z)	+50 ± 230 (r)	+1000 ± 70(h)		-16.2 ± 3.4					
	5555.566	400	-60 ± 510 (z)	-580 ± 250 (r)	-680 ± 70 (h)		-5.0 ± 3.9					
	5582.588	100	+386 ± 511 (z)	+117 ± 274 (r)		145.7 ± 15.6	+5.0 ± 2.3					
	5582.604	170	+100 ± 411 (z)	+206 ± 244 (r)		145.8 ± 12.9	+4.7 ± 2.9					
⊛HD 109030	5702.383	200	-65 ± 225 (z)	+140 ± 60 (r)	+800 (h)	54.8 ± 4.8	+12.3 ± 2.9	10800	4.3	1.8	2.7	1.9
⊛HD 110066	5345.244	500	-220 ± 10 (z)			20.0	-13.9 ± 2.7	8900	4.1	1.6	2.1	2.1
⊛HD 112413 α ² CVn	4903.408	600	+1070 ± 70(m)			26.1 ± 2.8	+8.8 ± 2.5	11300	3.8	2.1	2.8	3.5
	4955.314	1600	-980 ± 50(m)			25.5 ± 2.6	-3.4 ± 1.3					
	5015.248	1600	-990 ± 50(m)		-470 (h)	25.6 ± 2.8	-3.6 ± 1.5					
	5171.545	1500	+1470 ± 70(m)			26.6 ± 3.3	-3.1 ± 0.8					
	5202.581	3000	-880 ± 50 (z)				+7.1 ± 2.4					
	5281.468	3000	+860 ± 80 (z)				+1.9 ± 0.8					
	5345.230	2000	-820 ± 59 (z)				-1.7 ± 1.3					
	5702.405	500	+1252 ± 50 (z)	+1009 ± 36 (r)	-430 (h)							
⊛HD 113894*	5553.645	300	+990 ± 40 (z)	+900 ± 30 (r)	-300 (h)	23 ± 3	+8.2 ± 2.4	9500	4.0	1.5	2.3	2.5
	5554.650	300	+840 ± 40 (z)	+870 ± 30 (r)			+1.6 ± 2.6					
	5555.579	300	+760 ± 30 (z)	+690 ± 60 (r)			+4.6 ± 2.1					
	5582.638	250	-1189 ± 44 (z)	-1109 ± 44 (r)		31.2 ± 3.8	+9.6 ± 2.4					
HD 114125	5282.42	400	+20 ± 80 (z)	-50 ± 40 (r)	+850 (h)	25 ± 5	-56.1 ± 3.1	6700	4.1	1.2	1.4	1.8
	5345.279	300	+20 ± 50 (z)		-550 ± 120(h)		-59.7 ± 2.4					
⊛HD 118054*	5553.658	300	-420 ± 190 (z)	0 ± 140 (r)	-210 ± 100(h)	65 ± 5	-10.4 ± 2.5	10000	3.8	1.9	2.4	2.9
	5554.662	350	-580 ± 130 (z)	-890 ± 210 (r)	+270 ± 70 (h)		-17.8 ± 2.6					

	5582.618	290	-544 ± 144 (z)	+362 ± 240 (r)	-500 (h)	85.0 ± 9.1	-8.8 ± 2.7						
⊛HD 118478	5583.550	270	-578 ± 390 (z)	-339 ± 159 (r)	-250 (h)	60.3 ± 5.8	-54.9 ± 2.7	19500	4.0	3.3	6.3	4.2	
⊛HD 135297	5282.405	500	+50 ± 50 (z)	+70 ± 30 (r)		27 ± 5	-44.5 ± 2.9	9800	3.6	1.6	2.4	4.0	
	5345.324	400	-170 ± 30 (z)				-41.3 ± 2.6						
⊛HD 135679*	5555.591	410	+1122 ± 41 (z)	+960 ± 24 (r)		20.0	+0.8 ± 2.1	11100	3.4	2.0	2.8	5.5	
	5582.660	160	+1185 ± 42 (z)	+1048 ± 49 (r)	+250 (h)	30.1 ± 3.7	+4.3 ± 2.7						
⊛HD 137909 β CrB	4955.322	1000	-940 ± 50(m)			23.4 ± 3.3	-20.5 ± 1.8	8000	3.8	1.5	1.8	2.8	
	5015.26	1000	-300 ± 50(m)			24.5 ± 2.1	-20.5 ± 1.7						
	5202.590	1800	+430 ± 50 (z)		+800 (h)	20.0	+9.2 ± 1.1						
	5674.379	300	-600 ± 27 (z)	-545 ± 15 (r)	+1050 (h)	22.0 ± 2.9	-26.9 ± 2.9						
	5765.280	450	-104 ± 188 (z)	-142 ± 18 (r)	+540 (h)	21.6 ± 2.7	-26.4 ± 2.3						
⊛HD 138633*	5282.470	300	+310 ± 30 (z)	+350 ± 20 (r)	-150 (h)	20.0	-14.6 ± 2.8	8200	4.0	1.9	1.8	2.2	
	5287.489	300	-290 ± 20 (z)	-210 ± 370 (h)	-500 (h)		-4.7 ± 2.1						
⊛HD 138777*	5348.300	250	+2150 ± 60 (z)	+2000 ± 40 (r)		25 ± 5	-46.3 ± 2.7	8300	3.7	1.4	1.9	3.2	
⊛HD 144999	5583.589	150	+120 ± 20 (z)	+109 ± 18 (r)	-110 (h)	20.0 ± 2.3	-20.1 ± 2.4	7500	3.8	1.3	1.7	2.7	
⊛HD 149046	5345.335	250	-105 ± 150 (z)		+120 (h)	25 ± 5	-28.3 ± 3.8	10000	3.7	1.7	2.4	3.6	
⊛HD 152107 52 Her	5287.450	1000	+1180 ± 40 (z)	+290 ± 300 (h)		30 ± 5	+7.2 ± 2.1	8800	3.8	1.4	2.1	3.0	
	5673.434	470	+966 ± 42 (z)	+768 ± 16 (r)	-2320 ± 420 (h)	25.0 ± 4.6	+2.8 ± 2.4						
	5788.391	650	+1602 ± 57 (z)	+1306 ± 25 (r)		31.1 ± 3.7	-7.7 ± 2.3						
	5843.149	600	+398 ± 62 (z)	+214 ± 40 (r)		24.0 ± 2.8	-6.2 ± 2.4						
⊛HD 152127	5583.656	360	-194 ± 95 (z)	-173 ± 100 (r)		55.0 ± 4.9	-17.6 ± 2.9	9500	4.0	1.8	2.3	2.5	
⊛HD 153759	5583.662	180	+311 ± 178 (z)	-41 ± 139 (r)		54.0 ± 6.1	-7.3 ± 2.3	7900	4.0	1.5	1.8	2.8	
⊛HD 157740	5555.669	300	+130 ± 70 (z)	+130 ± 60 (r)	+60 ± 460 (h)	25 ± 5	+6.5 ± 3.1	10000	3.9	1.7	2.4	2.9	
	5582.669	200	-143 ± 79 (z)	-69 ± 53 (r)		38.3 ± 5.2	+13.6 ± 2.7						
	5583.649	320	-78 ± 42 (z)	+36 ± 42 (r)		36.4 ± 4.1	+22.3 ± 2.9						
⊛HD 158450	5015.360	250	-4350 ± 130(m)		+50 (h)	21.6 ± 3.5	-19.3 ± 1.8	9500	3.8	1.5	2.3	3.1	
	5287.518	300	-4280 ± 110 (z)		-30 (h)	27 ± 5	-12.7 ± 2.4						
	5315.420	250	-4430 ± 150 (z)	-3640 ± 40 (r)	-50 (h)		-16.4 ± 2.8						
	5345.367	300	-100 ± 65 (z)		-150 (h)		-19.6 ± 2.7						
	5348.435	250	-4480 ± 130 (z)	-3900 ± 50 (r)	-400 (h)		-18.2 ± 2.4						
HD 158974	5021.268	320	+70 ± 12(m)		+250 (h)	24.3 ± 2.3	-30.6 ± 1.7	5700	4.3	0.7	1.1	1.2	
	5287.458	400	+20 ± 10 (z)			25 ± 5	-23.6 ± 2.7						
	5345.385	600	-20 ± 10 (z)		-70 ± 280 (h)		-34.3 ± 3.4						
	5406.468	400	-10 ± 10 (z)		-250 ± 180 (r)		-30.3 ± 2.9						
	5673.478	400	+44 ± 5 (z)	+49 ± 2 (r)		28.3 ± 3.4	-30.2 ± 2.7						

	5765.293	420	-1 ± 5 (z)	-11 ± 18 (r)		28.6 ± 3.6	-20.0 ± 2.2						
	5843.158	350	-18 ± 5 (z)	-18 ± 15 (r)		23.4 ± 2.8	-34.6 ± 3.1						
	5871.115	450	-19 ± 5 (z)	-14 ± 11 (r)	-170 (h)	26.9 ± 2.9	-24.7 ± 3.8						
⊗HD 161480	5702.440	120	-55 ± 150 (z)	-55 ± 55 (r)		32.1 ± 3.9	$+37.5 \pm 3.9$	14500	4.0	2.0	4.0	3.3	
	5842.159	300	-23 ± 133 (z)	$+56 \pm 85$ (r)	-100 (h)	30.0 ± 4.1	$+4.9 \pm 3.2$						
⊗HD 168856	5015.373	320	$+70 \pm 320$ (m)		-100 (h)	72.8 ± 5.7	-17.9 ± 1.4	12300	3.6	2.1	3.2	4.7	
	5287.581	300	$+360 \pm 190$ (z)		$+60$ (h)		-21.8 ± 2.6						
	5315.562	400	-1110 ± 320 (z)										
HD 169191	5460.252	500	-20 ± 10 (z)			20.0	-17.0 ± 2.8	5300	4.5	0.6	0.9	0.9	
	5461.284	500	$+142 \pm 10$ (z)				-22.0 ± 2.9						
	5553.102	500	0 ± 10 (z)	$+10 \pm 10$ (r)	$+5390 \pm 410$ (h)		-14.0 ± 2.8						
	5785.265	550	-35 ± 5 (z)	-65 ± 9 (r)	$+830 \pm 200$ (h)	20.0 ± 3.7	-19.0 ± 3.1						
⊗HD 170860	5015.408	350	$+390 \pm 700$ (m)			28.1 ± 2.2	$+14.9 \pm 1.6$	14100	3.3	2.8	3.8	7.2	
⊗HD 174959	5674.400	490	-240 ± 50 (z)	-52 ± 120 (r)		63.0 ± 6.7	-22.9 ± 3.7	14000	4.0	2.7	3.8	3.2	
	5843.170	490	-17 ± 28 (z)	$+47 \pm 70$ (r)		69.8 ± 7.2	-34.1 ± 3.1						
⊗HD 176304	5765.367	310	$+83 \pm 239$ (z)	$+56 \pm 106$ (r)	-500 (h)	60.0 ± 6.8	-15.2 ± 3.7	17000	3.2	2.9	5.0	9.7	
⊗HD 178308	5021.300	270	-210 ± 180 (m)		$+300$ (h)	68.3 ± 5.2	-21.7 ± 1.1	11100	3.4	2.4	2.8	5.5	
	5348.348	400	$+20 \pm 120$ (z)	-140 ± 160 (r)	$+1300$ (h)	75 ± 10	-24.8 ± 2.9						
	5554.125	400	$+240 \pm 260$ (z)	$+130 \pm 130$ (r)	$+500$ (h)		-25.7 ± 2.6						
⊗HD 178892	4955.423	300	$+7700 \pm 380$ (m)			27.9 ± 3.7	-10.6 ± 2.6	7700	4.0	1.5	2.3	2.2	
	5015.335	300	$+2830 \pm 230$ (m)			27.4 ± 4.3	-14.7 ± 2.1						
	5021.289	250	$+6490 \pm 290$ (m)		$+320 \pm 220$ (h)	28.2 ± 3.3	-16.5 ± 1.9						
	5460.235	400	$+4580 \pm 200$ (z)		$+550 \pm 140$ (h)	30 ± 5	-10.9 ± 2.7						
	5461.268	300	$+2790 \pm 170$ (z)		-1800 (h)		-17.2 ± 3.8						
⊗HD 178993	5784.300	200	-121 ± 300 (z)	-311 ± 111 (r)	-200 (h)	54.9 ± 5.1	-9.6 ± 2.8	14000	3.5	2.1	3.8	5.7	
	5842.254	220	-280 ± 337 (z)	$+214 \pm 150$ (r)	$+30$ (h)	60.0 ± 8.3	-19.5 ± 2.9						
	5843.220	210	$+614 \pm 336$ (z)	$+163 \pm 163$ (r)	-500 (h)	57.4 ± 6.8	-12.4 ± 2.9						
⊗HD 182032	5765.387	370	$+332 \pm 325$ (z)	$+318 \pm 103$ (r)	-100 (h)	70.0 ± 8.2	-24.3 ± 2.8	19000	3.7	3.8	6.0	5.1	
⊗HD 182180	5348.500	500	-4000 ± 1200 (z)	-750 ± 310 (r)		200 ± 30	$+5.4 \pm 2.8$	12200	3.4	2.3	3.1	5.8	
⊗HD 182255	5021.312	800	-50 ± 120 (m)			22.1 ± 3.7	-30.4 ± 2.3	12600	4.0	2.3	3.3	3.0	
⊗HD 184471	4955.335	250	$+810 \pm 50$ (m)		-350 ± 300 (h)	18.1 ± 2.7	-17.7 ± 2.8	10000	3.9	2.0	2.4	2.9	
	5015.275	250	$+320 \pm 50$ (m)		$+620 \pm 110$ (h)	19.1 ± 2.3	-38.2 ± 1.3						
⊗HD 188501*	5674.431	270	-2200 ± 80 (z)	-2095 ± 44 (r)	-340 ± 120 (h)	33.0 ± 4.2	-22.5 ± 2.6	13000	3.3	2.4	3.4	6.8	
	5842.344	300	-56 ± 50 (z)	-32 ± 40 (r)		35.2 ± 3.9	-24.8 ± 2.8						
HD 188512	5788.315	450	$+2 \pm 4$ (z)	$+26 \pm 8$ (r)		20.0 ± 2.3	-39.6 ± 2.9	5800	4.2	0.7	0.9	1.5	

⊛HD 191287*	5765.416	260	-1060 ± 410 (z)	-990 ± 70 (r)		75.2 ± 9.9	-1.4 ± 2.3	10800	3.5	1.6	2.7	4.8
⊛HD 191746	5842.284	300	+302 ± 117 (z)	-72 ± 104 (r)		80.0 ± 10.3	-13.0 ± 2.9	17000	3.2	2.9	5.0	9.3
HD 198920	5019.477	300	+10 ± 50(m)			19.9 ± 2.8	+7.7 ± 1.8	5400	4.1	0.7	2.0	1.5
	5406.527	300	+10 ± 20 (z)	+10 ± 10 (r)	+1000 (h)	30 ± 5	+18.7 ± 3.4					
⊛HD 199180*	5287.592	300	-340 ± 60 (z)		-400 (h)	27 ± 5	-17.3 ± 2.8	9500	3.2	2.0	2.3	4.1
⊛HD 201174	5075.485	300	+980 ± 140(m)		+300 (h)	25.9 ± 2.7	-7.8 ± 1.1	9300	3.8	1.3	2.2	2.8
	5077.466	300	-810 ± 60(m)		+220 (h)	24.3 ± 1.4	-8.1 ± 1.3					
	5345.407	200	+1810 ± 90 (z)		-250 (h)	25 ± 5	-13.8 ± 3.4					
	5459.442	250	+710 ± 90 (z)		-480 (h)		-10.6 ± 2.7					
	5460.193	300	+2110 ± 50 (z)		+1200 (h)		-4.6 ± 2.8					
	5554.190	300	+680 ± 100 (z)	+480 ± 60 (r)	+2000 (h)		-16.5 ± 3.4					
	5555.159	250	+2070 ± 80 (z)	+1930 ± 40 (r)	+1900 (h)		-9.9 ± 3.4					
	5702.474	150	+856 ± 90 (z)	+698 ± 83 (r)	+1200 (h)	26.0 ± 3.2	-9.2 ± 2.3					
	5765.322	200	-475 ± 64 (z)	-371 ± 33 (r)	-530 ± 100(h)	25.7 ± 3.1	-2.0 ± 2.1					
	5765.536	210	+320 ± 67 (z)	+249 ± 45 (r)	-360 ± 120(h)	27.0 ± 2.9	-10.1 ± 2.3					
	5784.232	220	+284 ± 50 (z)	+252 ± 27 (r)		23.0 ± 3.9	-8.5 ± 2.2					
	5784.336	200	-192 ± 30 (z)	-114 ± 21 (z)		24.9 ± 2.8	-11.2 ± 2.6					
	5784.543	220	-665 ± 37 (z)	-529 ± 18 (r)		22.6 ± 3.1	-2.1 ± 2.7					
	5785.241	220	+1654 ± 87 (z)	+1317 ± 41 (r)	-400 ± 100(h)	21.4 ± 3.6	-11.6 ± 2.1					
	5788.298	180	+2085 ± 60 (z)	+1839 ± 26 (r)		21.9 ± 3.1	-13.8 ± 2.7					
	5788.515	200	+2160 ± 68 (z)	+1989 ± 32 (r)	-630 ± 460 (h)	24.5 ± 3.8	-20.2 ± 2.9					
	5843.437	190	+1026 ± 82 (z)	+829 ± 44 (r)		21.8 ± 3.4	-11.3 ± 2.6					
⊛HD 201601 (γ Equ)	4955.439	800	-1250 ± 50(m)			<20	-17.1 ± 1.9	7500	3.7	1.1	1.7	2.4
	5015.380	800	-1220 ± 50(m)				-21.9 ± 2.1					
	5019.480	800	-990 ± 50(m)				-24.8 ± 2.3					
	5021.326	800	-1090 ± 50(m)				-19.3 ± 1.6					
	5075.454	900	-1130 ± 50(m)				-16.6 ± 1.8					
	5075.464	900	-1210 ± 50(m)				-16.8 ± 2.2					
	5077.454	900	-1040 ± 50(m)		-230 (h)		-18.5 ± 1.6					
	5287.600	1000	-1190 ± 30 (z)		-900 (h)	20.0	-18.3 ± 2.0					
	5431.480	700	-1230 ± 30 (z)		-700 (h)		-14.9 ± 2.7					
	5460.218	1000	-1050 ± 30 (z)		-800 (h)		-20.3 ± 2.9					
	5461.250	1000	-1070 ± 50 (z)		-700 (h)		-19.1 ± 2.8					
	5488.357	600	-1020 ± 50 (z)		-500 (h)		-14.4 ± 3.8					
	5553.160	900	-1130 ± 30 (z)	-1000 ± 30 (r)	-400 (h)		-16.6 ± 2.7					

	5554.100	1000	-1050 ± 40 (z)		-250 (h)		-16.3 ± 2.6						
	5555.100	1000	-1120 ± 40 (z)	-960 ± 30 (r)	-200 (h)		-16.7 ± 2.4						
	5583.127	320	-1085 ± 40 (z)	-937 ± 33 (r)	+500 (h)	20.0 ± 2.1	-8.9 ± 2.1						
	5584.121	320	-1081 ± 50 (z)	-894 ± 21 (r)	-150 (h)	20.0 ± 2.3	-7.1 ± 2.3						
	5784.354	400	-1113 ± 33 (z)	-941 ± 17 (r)	+500 (h)	20.0 ± 2.2	-18.1 ± 2.4						
	5785.259	350	-1087 ± 31 (z)	-991 ± 17 (r)		20.0 ± 2.2	-16.2 ± 2.5						
	5788.361	400	-1020 ± 33 (z)	-936 ± 15 (r)		20.0 ± 2.1	-22.4 ± 2.1						
	5843.193	500	-973 ± 37 (z)	-905 ± 17 (r)		20.0 ± 2.4	-22.2 ± 2.4						
	5871.149	600	-1046 ± 35 (z)	-870 ± 21 (r)		20.0 ± 2.2	-15.5 ± 2.7						
⊗HD 205117	5841.372	240	-205 ± 308 (z)	-99 ± 133 (r)		76.0 ± 8.2	-3.0 ± 2.4	10400	4.0	1.9	2.5	2.6	
	5842.413	300	+221 ± 481 (z)	-931 ± 185 (r)	-1050 (h)	70.0 ± 8.6	-8.6 ± 2.7						
⊗HD 207561	5702.504	280	+133 ± 100 (z)	+161 ± 69 (r)	+500 (h)	73.6 ± 8.2	-9.2 ± 2.8	7200	4.2	1.1	1.6	2.1	
	5765.341	310	-219 ± 182 (z)	-240 ± 60 (r)	+300 (h)	70.0 ± 6.7	-3.7 ± 2.6						
	5765.508	300	+116 ± 186 (z)	+179 ± 97 (r)	-180 ± 390(h)	68.9 ± 7.1	-12.3 ± 2.7						
⊗HD 216018	5075.425		+1390 ± 50(m)		+1340 ± 270(h)		-2.2 ± 1.8	7800	4.0	1.2	1.8	2.2	
⊗HD 217401	5019.500	350	-460 ± 130(m)			71.3 ± 6	-14.5 ± 1.6	10000	3.5	1.7	2.4	5.8	
	5136.358	400	+40 ± 100(m)			74.3 ± 6.6	+6.1 ± 1.9						
	5488.381	350	-30 ± 70 (z)	-80 ± 70 (r)		55 ± 10	+1.4 ± 2.6						
	5554.240	250	-143 ± 90 (z)	-30 ± 50 (r)			-9.0 ± 3.1						
⊗HD 218045	5788.370	320	-1245 ± 1046 (z)	-965 ± 180 (r)		100.0 ± 12.4	-7.4 ± 3.8	11100	3.9	2.2	2.8	3.1	
⊗HD 221568	5765.447	340	+826 ± 30 (z)	+722 ± 32 (r)	+5340 ± 450(h)	20.0 ± 2.2	-6.9 ± 2.7	9300	3.6	1.6	2.2	4.9	
	5784.559	250	+535 ± 35 (z)	+461 ± 34 (r)	+5440 ± 300(h)	20.0 ± 2.4	-0.3 ± 2.4						
⊗HD 221936	5075.512	450	-1030 ± 250(m)		+6880 ± 450 (h)	74.3 ± 6.6	-1.9 ± 0.9	10000	3.4	1.7	2.4	5.1	
	5077.496	400	+3150 ± 190(m)		+250 (h)	70.4 ± 7.5	+1.8 ± 1.2						
⊗HD 225627*	4955.542	350	+280 ± 50(m)		+300 (h)	29.7 ± 3.9	+13.9 ± 2.1	8600	4.2	1.6	2.0	1.9	
	5015.471	350	+110 ± 50(m)			26.1 ± 2.7	+12.7 ± 1.5						
	5348.470	300	+340 ± 60 (z)	+320 ± 50 (r)		30 ± 3	+16.3 ± 2.8						
	5554.162	300	-60 ± 40 (z)	-20 ± 40 (r)	+350 (h)		+11.1 ± 3.1						
⊗HD 227695	4955.480	300	+140 ± 250(m)			113.6 ± 21.7	-20.5 ± 2.3	7200	3.8	1.1	1.6	2.6	
⊗HD 258686	5136.533	150	+6760 ± 370(m)			25.7 ± 4.1	+3.5 ± 1.2	13000	3.9	2.3	3.4	3.4	
	5139.469	300	+7170 ± 350(m)			29.3 ± 2.	+14.5 ± 1.9						
	5202.304	300	+5750 ± 320 (z)		-400 (h)	35 ± 5	+15.4 ± 2.1						
⊗HD 260858*	5582.472	190	+574 ± 97 (z)	+470 ± 67 (r)	+3050 ± 180(h)	25.1 ± 3.4	+30.0 ± 2.8	16500	3.7	2.8	4.8	5.1	
	5583.451	250	+498 ± 57 (z)	+435 ± 64 (r)	+4370 ± 270(h)	28.5 ± 4.1	+34.4 ± 3.1						
⊗HD 261937	5554.556	200	-720 ± 970 (z)	+420 ± 100 (r)		130 ± 10	+16.0 ± 3.1	19700	3.7	3.3	6.4	3.7	

	5555.523	250	-1050 ± 1460(z)	-150 ± 70 (r)			+15.8 ± 3.4						
⊛HD 264111	5583.429	210	+731 ± 454 (z)	+24 ± 198 (r)		106.1 ± 12.6	+5.1 ± 3.2	17500	3.7	3.0	5.3	5.4	
⊛HD 279021	5554.458	250	+1040 ± 90 (z)	+860 ± 120 (r)		35 ± 5	+1.3 ± 1.2	7300	4.1	1.3	1.6	2.1	
	5555.375	250	+470 ± 90 (z)	+490 ± 70 (r)	+4420 ± 410 (h)		+2.9 ± 1.2						
⊛HD 281367	5555.416	200	+1250 ± 1100 (z)	-140 ± 100 (r)		45 ± 5	+46.9 ± 3.7	7000	3.5	1.3	1.5	3.6	
⊛HD 331413	5842.309	250	+134 ± 76 (z)	+26 ± 72 (r)	-1000 (h)	30.0 ± 3.8	-15.1 ± 2.1	13200	3.5	2.8	3.5	5.5	
⊛HD 343872	4955.379	200	+3310 ± 90(m)		-3500 (h)	20.9 ± 1.8	-4.3 ± 2.3	7800	4.0	1.5	1.8	3.1	
	5015.307	220	+4500 ± 110(m)		+900 (h)	20.9 ± 1.9	-2.9 ± 1.5						
	5281.527	200	+2870 ± 140 (z)			25 ± 5	-2.9 ± 1.4						
	5282.508	250	+1900 ± 160 (z)	-1380 ± 30 (r)									
	5283.524	300	0 ± 100 (z)		-280 ± 510 (h)		-10.3 ± 2.4						
	5284.604	160	-820 ± 150 (z)	-930 ± 30 (r)			-5.6 ± 2.4						
	5287.552	200	+4340 ± 90 (z)				-3.7 ± 2.0						
	5348.395	200	+4280 ± 120 (z)	+3760 ± 40 (r)	-40 (h)		-4.0 ± 2.8						
⊛BD +40 175A	5784.472	220	-1470 ± 133 (z)	-1122 ± 63 (r)	-200 (h)	27.0 ± 3.5	+5.3 ± 2.8	7600	4.1	1.2	1.7	1.4	
	5788.408	160	-3409 ± 102 (z)	-3288 ± 48 (r)		28.2 ± 4.1	-8.8 ± 2.7						
⊛BD +40 175B	5788.467	160	+928 ± 73 (z)	+832 ± 31 (r)	-750 (h)	31.8 ± 4.3	-15.6 ± 2.8	6700	4.3	1.1	1.4	1.8	
⊛BD +41 43	5015.500	300	+80 ± 100(m)			28.2 ± 2.7	-27.8 ± 2.6						
⊛BD +53 1183*	5202.630	250	-110 ± 120 (z)		+3590 ± 200(h)	50 ± 5	+8.4 ± 1.4	8200	3.9	1.3	1.9	2.5	
	5311.347	250	+1030 ± 100 (z)				+0.3 ± 2.1						
	5315.365	250	-810 ± 110 (z)	-510 ± 79 (r)			+0.9 ± 2.8						
BD +38 2360	5555.635	300	-50 ± 70 (z)	+70 ± 50 (r)		45 ± 5	-14.8 ± 2.9	6900	4.1	0.8	1.5	1.8	
	5581.556	130	+153 ± 118 (z)	-35 ± 101 (r)		59.7 ± 6.1	-11.6 ± 2.9						
	5572.620	200	+86 ± 88 (z)	+10 ± 38 (r)		55.0 ± 5.2	-4.2 ± 2.6						
BD +37 431	5555.169	250	+10 ± 30 (z)	0 ± 40 (r)	-500 (h)	30 ± 5	-10.3 ± 1.6	5900	4.4	0.9	1.2	1.1	
	5583.194	120	+44 ± 52 (z)	+53 ± 49 (r)		32.0 ± 4.3	+19.1 ± 2.4						
⊛BD +36 363	5488.538	250	+380 ± 480 (z)	+50 ± 100 (r)		100 ± 15	+9.8 ± 2.9	11500	3.7	1.9	2.9	4.0	
⊛BD +00 4535	5077.435	200	+3130 ± 300(m)					7700	3.8	1.4	1.7	2.7	
	5406.499	200	-570 ± 130 (z)	-250 ± 40 (r)		23 ± 5	-49.8 ± 3.4						
	5553.130	200	-1990 ± 120 (z)	-1410 ± 60 (r)			-36.1 ± 3.6						
⊛BD -12 2366	5552.522	200	-100 ± 100 (z)	+20 ± 40 (r)		40 ± 5	+32.9 ± 2.8	6700	4.0	0.8	1.4	2.0	
	5553.635	170	+70 ± 70 (z)	+100 ± 80 (r)			+37.9 ± 2.7						
⊛NGC 752-105	5555.215	150	-970 ± 620 (z)			75 ± 10	-5.9 ± 3.1	6500	4.1	1.1	1.3	2.2	
	5583.236	120	+1483 ± 538 (z)	+103 ± 147 (r)		113.0 ± 14.6	-3.8 ± 2.3						
o Uma	5281.460		-30 ± 20 (z)		+90 (h)	23 ± 5	+23.7 ± 2.1	5200	4.1	0.6	0.9	1.4	

5282.294		+90 ± 20 (z)	+110 ± 10 (r)	+50 (h)		+18.6 ± 3.4				
5283.340		-110 ± 30 (z)	-140 ± 10 (r)	+200 (h)		+14.4 ± 2.4				
5284.336		0 ± 10 (z)	0 ± 10 (r)			+20.7 ± 3.4				
5311.311		-20 ± 10 (z)				+22.0 ± 2.8				
5315.328		-40 ± 10 (z)				+21.2 ± 3.7				
5348.268		0 ± 10 (z)	0 ± 10 (r)			+19.7 ± 2.7				
5459.470		-50 ± 50 (z)				+17.0 ± 2.8				
5552.644		-190 ± 10 (z)	-240 ± 20 (r)			+15.8 ± 1.8				
5666.289	450	+13 ± 10 (z)	+33 ± 1 (r)		21.2 ± 2.4	+25.0 ± 2.7				
5674.302	500	+25 ± 4 (z)	+23 ± 3 (r)							
5784.645	500	+127 ± 4 (z)	+167 ± 5 (r)							

Приложение В

**Результаты оценки фундаментальных параметров химически пекулярных
звезд в ассоциации Орион OB1**

Звезда (подгруппа)	HJD, +245000	$v_e \sin i$, км с ⁻¹	$T_{eff} \pm \sigma$, K	$\log g \pm \sigma$	$\log L/L_\odot \pm \sigma$	$\frac{M}{M_\odot} \pm \sigma$	$\frac{R}{R_\odot} \pm \sigma$
HD 33917 (A)	6589.460	140	11300 ± 250	4.3 ± 0.3	1.7 ± 0.6	2.8 ± 0.9	2.1 ± 0.7
HD 34736 (C)	6968.621	80	12650 ± 300	–	2.7 ± 0.8	3.9 ± 0.9	3.7 ± 0.9
HD 34859 (A)	6640.412	90	12000 ± 250	3.7 ± 0.4	1.8 ± 0.6	2.9 ± 0.6	2.2 ± 0.6
HD 34889 (C)	6590.555	40	11800 ± 300	3.8 ± 0.2	1.5 ± 0.5	2.7 ± 0.7	2.0 ± 0.8
HD 34959 (A)	6589.510	270	14000 ± 350	3.4 ± 0.3	2.6 ± 0.6	3.9 ± 0.7	3.3 ± 0.7
HD 35008 (A)	6319.459	210	10800 ± 250	3.5 ± 0.4	1.8 ± 0.7	2.8 ± 0.6	2.3 ± 0.6
HD 35039 (A)	7761.202	25	19000 ± 300	3.4 ± 0.3	3.7 ± 0.9	7.3 ± 1.8	4.9 ± 0.8
HD 35177 (A)	6590.442	200	14200 ± 300	4.0 ± 0.4	2.4 ± 0.8	3.7 ± 0.5	2.8 ± 0.6
HD 35298 (A)	6224.523	70	15000 ± 250	3.8 ± 0.2	2.7 ± 0.6	4.3 ± 0.6	3.3 ± 0.7
HD 35456 (A)	6225.462	35	13000 ± 250	3.6 ± 0.3	3.1 ± 0.7	4.6 ± 0.6	4.5 ± 0.9
HD 35502 (A)	6225.278	50	14700 ± 200	–	3.0 ± 0.7	4.7 ± 0.5	3.9 ± 0.7
HD 35575 (A)	5553.309	147	15000 ± 350	3.7 ± 0.4	2.7 ± 0.6	4.7 ± 0.9	2.9 ± 0.6
HD 35730 (A)	5962.285	60	16000 ± 250	3.8 ± 0.3	2.8 ± 0.8	4.9 ± 0.8	3.1 ± 0.9
HD 35881 (A)	6590.608	300	15000 ± 300	4.0 ± 0.4	1.9 ± 0.5	3.1 ± 0.6	2.1 ± 0.7
HD 35901 (C)	6640.291	60	10400 ± 200	3.5 ± 0.6	1.9 ± 0.5	2.7 ± 0.7	2.5 ± 0.8
HD 36046 (B)	6640.368	107	14400 ± 200	4.0 ± 0.2	1.8 ± 0.6	3.3 ± 0.7	2.1 ± 0.8
HD 36313 (B)	6995.329	160 ^a , 30 ^b	12250 ± 250	4.0 ± 0.3	1.7 ± 0.5	2.8 ± 0.6	2.0 ± 0.6
HD 36429 (A)	5961.305	150	15100 ± 250	–	2.0 ± 0.6	3.6 ± 0.5	2.2 ± 0.7
HD 36485 (B)	5963.389	36	17700 ± 350	3.8 ± 0.4	2.7 ± 0.7	4.9 ± 0.9	2.8 ± 0.7
HD 36526 (B)	6589.534	67	14800 ± 250	3.7 ± 0.3	2.1 ± 0.9	3.7 ± 0.6	2.3 ± 0.6
HD 36540 (C)	5963.418	80	14400 ± 250	3.9 ± 0.4	2.5 ± 0.8	4.0 ± 0.5	2.9 ± 0.9
HD 36549 (A)	6644.466	60	12000 ± 300	3.7 ± 0.3	1.5 ± 0.6	2.6 ± 0.9	1.9 ± 0.7
HD 36559 (C)	6645.403	124	11000 ± 300	4.1 ± 0.4	1.9 ± 0.7	2.8 ± 0.8	2.4 ± 0.6
HD 36629 (C)	5553.391	23	19000 ± 250	3.8 ± 0.6	3.1 ± 0.7	5.9 ± 0.6	3.5 ± 0.8
HD 36668 (B)	5963.276	70	12300 ± 250	–	1.8 ± 0.6	2.9 ± 0.7	2.2 ± 0.6
HD 36697 (C)	7764.239	90 ^a , 25 ^b	10200 ± 250	3.8 ± 0.3	1.7 ± 0.7	2.5 ± 0.7	2.3 ± 0.7
HD 36899 (C)	6643.464	198	9900 ± 250	4.1 ± 0.4	1.3 ± 0.8	2.2 ± 0.8	1.9 ± 0.7
HD 36916 (C)	6590.509	50	14000 ± 350	4.0 ± 0.3	2.6 ± 0.6	4.0 ± 1.1	3.1 ± 0.9
HD 36918 (C)	6643.420	123	13300 ± 250	3.5 ± 0.4	2.2 ± 0.7	3.5 ± 0.5	2.6 ± 0.7
HD 36955 (B)	6233.376	35	11300 ± 350	4.3 ± 0.6	1.5 ± 0.7	2.4 ± 0.6	2.1 ± 0.7
HD 36958 (C)	6645.441	55	16700 ± 300	3.7 ± 0.2	3.7 ± 0.6	6.4 ± 0.5	6.5 ± 1.1
HD 36960 (C)	6645.455	30	22500 ± 400	3.5 ± 0.3	4.3 ± 0.7	10.0 ± 1.9	10.0 ± 1.8
HD 36982 (D)	5554.373	161	19500 ± 400	3.8 ± 0.4	2.6 ± 0.9	5.3 ± 1.1	3.7 ± 0.6
HD 36997 (C)	6643.339	37	12100 ± 250	3.5 ± 0.3	2.2 ± 0.8	3.2 ± 0.6	2.8 ± 0.7

HD 37017 (C)	–	–	20100 ± 250	–	3.3 ± 0.6	6.5 ± 1.3	3.7 ± 0.6
HD 37041 (D)	6643.436	193	23000 ± 300	3.8 ± 0.6	4.1 ± 0.7	9.5 ± 1.7	7.4 ± 0.7
HD 37058 (C)	5873.592	45	17000 ± 350	3.7 ± 0.2	2.9 ± 0.7	5.1 ± 1.2	3.3 ± 0.6
HD 37114 (D)	6643.509	216	10600 ± 250	4.0 ± 0.3	1.7 ± 0.6	2.6 ± 0.8	2.3 ± 0.6
HD 37129 (C)	7761.275	81	18700 ± 250	3.8 ± 0.4	2.8 ± 0.7	5.4 ± 0.9	3.0 ± 0.7
HD 37140 (B)	6050.266	56	13900 ± 250	3.7 ± 0.3	1.9 ± 0.9	3.3 ± 0.5	2.2 ± 0.6
HD 37149 (B)	6643.308	200	21000 ± 350	3.5 ± 0.4	2.4 ± 0.8	3.7 ± 0.6	2.8 ± 0.8
HD 37151 (C)	7762.387	32	12500 ± 250	4.1 ± 0.6	2.0 ± 0.6	3.1 ± 0.5	2.4 ± 0.6
HD 37210 (C)	7764.310	30	12600 ± 350	4.0 ± 0.2	2.4 ± 0.7	3.6 ± 0.9	3.0 ± 0.7
HD 37235 (B)	6643.285	250	13700 ± 350	3.9 ± 0.3	2.2 ± 0.7	3.5 ± 0.8	2.5 ± 1.5
HD 37321 (B)	6643.330	121	15000 ± 250	4.2 ± 0.4	3.2 ± 0.6	4.8 ± 0.6	4.7 ± 0.7
HD 37333 (B)	7762.481	55	10600 ± 370	4.1 ± 0.3	1.8 ± 0.7	2.6 ± 0.7	2.4 ± 0.6
HD 37470 (C)	4401.568	90 ^a ,25 ^b	11900 ± 250	–	2.0 ± 0.9	3.0 ± 0.7	2.5 ± 0.9
HD 37479 (B)	5963.395	137	22000 ± 350	–	3.3 ± 0.6	7.2 ± 1.5	3.7 ± 0.7
HD 37525 (B)	5963.350	173	14700 ± 250	3.9 ± 0.3	2.2 ± 0.7	3.7 ± 0.7	2.4 ± 0.6
HD 37633 (B)	6643.385	42	13100 ± 350	3.7 ± 0.4	2.0 ± 0.7	3.2 ± 0.6	2.3 ± 0.6
HD 37642 (C)	6590.526	101	14700 ± 250	3.8 ± 0.3	3.0 ± 0.6	4.7 ± 0.9	3.9 ± 0.7
HD 37687 (C)	5963.276	23	13200 ± 250	3.4 ± 0.4	2.7 ± 0.7	4.1 ± 0.7	3.6 ± 0.9
HD 37776 (B)	5282.183	105	22000 ± 450	–	3.1 ± 0.9	6.7 ± 1.1	3.2 ± 0.7
HD 37807 (C)	8116.479	45	16000 ± 250	4.0 ± 0.2	3.2 ± 0.8	5.4 ± 0.8	4.3 ± 0.6
HD 37808 (C)	7765.541	32	14500 ± 350	3.9 ± 0.3	2.6 ± 0.6	4.2 ± 0.6	3.1 ± 0.9
HD 38912 (A)	7823.277	100	12000 ± 250	3.8 ± 0.4	1.9 ± 0.7	2.9 ± 0.7	2.3 ± 0.7
HD 40146 (C)	7755.229	–	–	–	–	–	–
HD 40759 (C)	6233.418	36	9800 ± 250	3.8 ± 0.4	2.1 ± 0.6	2.8 ± 0.6	3.1 ± 0.8
HD 290665 (B)	–	–	10300 ± 350	–	1.5 ± 0.7	2.4 ± 0.8	2.1 ± 0.6
HD 294046 (A)	8067.407	110	14000 ± 250	3.8 ± 0.3	2.3 ± 0.9	3.6 ± 0.5	2.6 ± 0.7