# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В. И. ВЕРНАДСКОГО»

На правах рукописи

Алентьев Дмитрий Викторович

# Поиск быстрых пульсаций в атмосферах холодных Ар звезд

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель: Цымбал Вадим Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент

г. Симферополь – 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ						
ГЛАВА 1. БЫСТРО ПУЛЬСИРУЮ	ЭЩИЕ ЗВЕЗДЫ17					
1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРО ПУЛЬС	СИРУЮЩИХ ЗВЕЗД17					
1.2. Теория возникновения пульса	аций 19					
1.2.1. Гидродинамические уравне	ния 19					
1.2.2. Возмущенное состояние						
1.2.3. Уравнения звездных осцилляций						
1.2.4. Современные модели						
ГЛАВА 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ И	IX АНАЛИЗА 29					
2.1. Выбор объектов для исследов	зания 29					
2.2. Наблюдательный материал						
2.2.1. Эшелле спектрограф UVES.						
2.2.2. Данные наблюдений						
2.3. Обработка наблюдательного м	материала					
2.4. Определение параметров звезд	д					
2.4.1. Фотометрические данные						
2.4.2. Определение магнитного по	оля и проекции скорости вращения на луч					
зрения						
2.4.3. Определение химического	о состава, эффективной температуры и					
ускорения силы тяжести спектрос	скопическими методами 37					
2.5. Метод анализа лучевых скорс	ЭСТЕЙ 38					
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ	ПОИСКА И АНАЛИЗА					
БЫСТРОПУЛЬСИРУЮЩИХ ЗВЕЗ	3Д 40					

# оглавление

3.1. HD 177765	
3.2. HD 132205	
3.3. HD 148593	53
3.4. HD 151860	
3.5. HD 119027	
3.6. HD 185256	
3.7. HD 69013	
3.8. HD 96237	
3.9. HD 143487	
3.10. HD 5823	
3.11. HD 178892	74
3.12. HD 185204	76
3.13. ВЫВОДЫ	
ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ВОЗБУЖДЕНИЯ БЫСТРЫХ	ПУЛЬСАЦИЙ В АР
ЗВЕЗДАХ	
4.1. Движущий механизм быстрых пульсаций	
4.2. Параметры из наблюдений	
4.3. Входные данные для вычислений	
4.4. Модели	91
4.4.1. Экваториальная модель	91
4.4.2. Полярная модель	
4.4.3. Комбинированная модель.	
4.5. Результаты моделирования	
4.6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	. 106
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНЫХ ИСТОЧНИКОВ	110
ПРИЛОЖЕНИЕ	121

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

REE (rare earth element (REE)) – редкоземельный элемент

CP (chemical peculiar) – химически пекулярный

H-R – Герцшпрунга- Рессела

roAp (rapidly oscillating Ap) – быстро пульсирующие Ap

поАр – не пульсирующие Ар

UVES (Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph) – эшелле-спектрограф

VLT (Very Large Telescope) – массив из четырех 8-ми метровых телескопов в Чили

ESO (European Southern Observatory) – Европейская организация астрономических исследований в Южном полушарии

HJD (Heliocentric Julian Date) – гелиоцентрическая юлианская дата

ССD (Charge-Coupled Device) – ПЗС (прибор с зарядовой связью) матрица

RV (radial velocity) – лучевая скорость

VALD (The Vienna Atomic Line Database) – Венская база данных атомных линий

DREAM (Database on Rare Earths At Mons University) – база данных редкоземельных элементов университета Монс

FAP (False Alarm Probability) – обратное значение вероятности ложного сигнала

*v*<sub>e</sub>sin*i* - проекция скорости вращения звезды на луч зрения

ASAS (The All Sky Automated Survey) – проект автоматизированного фотометрического исследования всего неба

ZAMS (Zero Age Main Sequence)- главная последовательность нулевого возраста

# введение

#### Актуальность темы

Большинство звезд, в том числе и наше Солнце, принадлежат главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга-Рессела и обладают в целом постоянной светимостью. Наблюдаемые спектральные линии химических элементов в них также остаются практически постоянными со временем, и их наличие напрямую зависит от содержания этих элементов в фотосфере и от эффективной температуры. В отличие от этих звезд, существует класс объектов, именуемых химически пекулярными (Chemically peculiar, CP) звездами, которые показывают на порядок увеличенное или уменьшенное содержание некоторых химических элементов. Примечательно, ЧТО распределение химических элементов у данных звезд является неоднородным как по поверхности, так и с глубиной. На данный момент изучение химически пекулярных звезд играет большую роль в дальнейшем понимании и моделировании процессов, происходящих в звездных фотосферах. Отдельно можно выделить в данном классе группу быстро пульсирующих Ар-звезд (Rapidly oscillating Ap, roAp), с типичными периодами пульсаций в диапазоне 5 - 20 минут. Изучение особенностей пульсаций гоАр звезд помогает понять их строение и внутреннюю структуру. Наука, которая занимается такими исследованиями, называется астросейсмология, по аналогии с обычной сейсмологией, изучающей динамику колебаний земной поверхности. Общее количество известных гоАр звезд достаточно мало по сравнению с другими классами звезд и не превышает 60 объектов. Поэтому поиск, открытие и исследование новых roAp звезд является актуальной задачей.

Сочетание специфических свойств у гоАр звезд таких, как сильное магнитное поле с осью, наклоненной к оси вращения звезды, неоднородность химического состава как по поверхности, так и с глубиной, неприсущие обычным звездам, вызывают особый интерес у астрофизиков. Важными целями астрофизических исследований являются определение и уточнение

фундаментальных характеристик звезд таких, как светимость, эффективная температура, химический состав, изучение кривых лучевых скоростей, необходимых для построения более точных моделей звезд и определение полного спектра пульсаций.

Наибольшую информацию о фундаментальных параметрах звезд можно наблюдений. получить с помощью спектральных Современные высокодисперсионные спектрографы позволяют получать значительно более точные параметры звезд, чем это позволяют делать фотометрические приборы. После получения первичных спектроскопических данных требуется их дальнейшая обработка, которая обычно производится вручную с помощью программных комплексов MIDAS и IRAF. Данные комплексы достаточно объемны и сложны для освоения, а обработка большого количества объектов занимает много времени. Поэтому является актуальным разработка программного комплекса, который мог бы максимально исключить человеческий фактор и ускорить процесс обработки, что существенно улучшит качество и количество выходного материала.

Для определения светимости звезд необходимо знать расстояние (параллакс). С достаточной точностью расстояние измерено только для нескольких ярких, хорошо изученных гоАр звезд, а дополнительная неточность в определении эффективной температуры еще сильнее усложняет процессы моделирования. Одним из основных параметров, определяющим возможность возбуждения колебаний, является радиус звезды. Следовательно, изучение пульсаций может помочь в уточнении радиуса пульсирующих звезд.

#### Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы являлся поиск и исследование быстро пульсирующих звезд. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- Разработка программного комплекса экстрактации и нормализации на континуум спектров, полученных на спектрографе UVES в «красном» режиме с центральной длинной волны λ = 600 нм.
- Обработка с использованием созданной программы спектроскопических данных для 12 избранных звезд и, на основе анализа полученных спектров высокого разрешения, определение их фундаментальных параметров: эффективной температуры, ускорения силы тяжести, проекции скорости вращения на луч зрения и величину магнитного поля.
- Выборка и измерение лучевых скоростей спектральных линий, а также проведение частотного анализа для отождествления быстро пульсирующих звезд.
- Теоретическое построение пульсационных моделей для хорошо изученных гоАр звезд и сравнение их частотных спектров с наблюдаемыми.

#### Научная новизна полученных результатов

- Определены и уточнены фундаментальных характеристики выбранных звезд: эффективная температура, ускорение силы тяжести, проекция скорости вращения на луч зрения и значение магнитного поля.
- Открыты четыре новые гоАр звезд: HD 132205, HD 148593, HD 151860 и HD 177765.
- Показана схожесть химического состава звезды HD 177765 с другой гоАр звездой βCrB, что в совокупности с самым длинным периодом P = 23,6 мин говорит о ее проэволюционировавшем статусе.

- Подтверждена roAp классификация обнаруженных ранее фотометрическим методом звезд HD 119027 и HD 185256
- Определены более точные значения амплитуд и периодов пульсаций известных roAp звезд HD 69013, HD 96237 и HD 143487.
- Показано отсутствие характерной для гоАр переменности у звезд HD 5823, HD 178892 и HD185204, считавшимися кандидатами в гоАр звезды.
- Показано, что основная теория возбуждения пульсаций (Balmforth N. J. et al, 2001) адекватно описывает динамику трех из четырех хорошо изученных roAp звезд: γEqu, βCrB и 10Aql.

# Научная и практическая значимость

- Разработанная программа автоматической обработки эшелле спектров позволяет проводить экстракцию и нормализацию на континуум спектров, полученных на спектрографе UVES телескопа VLT в «красном» режиме с центральной длинной волны λ = 600 нм.
- Впервые открытая звезда HD 177765 с рекордным значением периода пульсаций расширила границы наблюдаемых периодов roAp звезд.
- Результаты частотного анализа и определенные фундаментальные параметры исследованных звезд могут помочь при дальнейшем описании внутризвездных процессов.
- Многократно наблюдаемые с помощью фотометрических наблюдений Ар звезды и не отождествленные как гоАр, могут быть однозначно идентифицированы с помощью спектральных наблюдений высокого разрешения.

#### Основные положения, выносимые на защиту

- Программный комплекс автоматической экстракции и нормализации на континуум эшелле спектров спектрографа UVES, расположенного на 8-ми метровом телескопе VLT, в «красном» режиме с центральной длинной волны λ = 600 нм.
- Фундаментальные характеристики двенадцати исследованных звезд HD 5823, HD 69013, HD 96237, HD 119027, HD 132205, HD 143487, HD 148593, HD 151860, HD 177765, HD 178892, HD185204, HD 185256: эффективная температура, ускорение силы тяжести, проекция скорости вращения на луч зрения и величина магнитного поля.
- Открытие четырех новых гоАр звезд HD 132205, HD 148593, HD 151860 и HD 177765.
- Звезда HD 177765 имеет рекордное значение периода пульсаций среди всех известных гоАр звезд 23.6 мин.
- Подтверждение спектроскопическим методом уже известных по фотометрическим наблюдениям двух гоАр звезд HD 119027 и HD 185256.
- Отсутствие свойственной для гоАр звезд переменности у звезд HD 5823, HD 178892 и HD 185204.
- Подтверждение справедливости основной теории возбуждения пульсаций (Balmforth N. J. et al, 2001) для ярких хорошо изученных гоАр звезд γEqu, βCrB и 10Aql.

# Личный вклад автора

Все работы, перечисленные в списке публикаций по теме диссертации, выполнены в соавторстве. Автору принадлежит разработанный программный пакет обработки спектров, полученных на спектрографе UVES в «красном» режиме, с помощью которого были обработаны 723 спектра. Определение эффективной температуры, ускорения силы тяжести звезд, а также скорости вращения на луч зрения и магнитного поля было выполнено в основном автором. Автор производил самостоятельно выбор линий и последующий анализ лучевых скоростей и расчет моделей пульсирующих звезд

Обсуждение полученных результатов и подготовка публикаций проводилась совместно с научным руководителем В. В. Цымбалом, а также с соавторами О. Кочуховым, Т. Рябчиковой и М. С. Cunha

#### Публикации

Основные результаты диссертации изложены в трех статьях, опубликованных в международных рецензируемых журналах, индексируемых WoS.

- Alentiev D., Kochukhov O., Ryabchikova T., Cunha M., Tsymbal V. et al. // Discovery of the longest period rapidly oscillating Ap star HD 177765 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2012, Volume 421, Issue 1, pp. L82-L86
- Kochukhov O., Alentiev D., Ryabchikova T., Boyko S., Cunha M. et al. // "Discovery of new rapidly oscillating Ap pulsators in the UVES survey of cool magnetic Ap stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, Volume 431, Issue 3, p.2808-2819
- Cunha M. S., Alentiev D., Brandão I. M., Perraut K. // Testing excitation models of rapidly oscillating Ap stars with interferometry // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, Volume 436, Issue 2, p.1639-1647

#### Апробация результатов диссертации.

Основные результаты диссертации докладывались на международной конференции "Rapidly oscillating Ap star" (Вена, Австрия, 2012), на семинарах Специальной Астрофизической Обсерватории РАН (п. Нижний Архыз, 2016) и Крымской астрофизической обсерватории РАН (п. Научный, Крым, 2016).

#### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Работа содержит 119 страниц печатного текста, включая 27 рисунков и приложение. Библиография включает 96 наименования.

#### Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна и показана практическая значимость полученных результатов, изложены выносимые на защиту положения и кратко описана структура диссертации.

В первой главе приводится общая характеристика быстро пульсирующих звезд. В разделе 1.1 дано представление о классификации и свойствах гоАр звезд. Описаны основные способы исследования гоАр звезд и отличительные особенности спектроскопических методов по отношению к фотометрическим исследованиям. В разделе 1.2 представлены основы общей теории возбуждения пульсаций в звездах, а также проблемы, которые возникают при применении различных ее вариантов для объяснения наблюдаемых пульсаций гоАр звезд.

Во второй главе приведены данные наблюдательного материала и методы, которые были использованы для дальнейшего анализа. В разделе 2.1 для дальнейшего поиска новых roAp звезд описан алгоритм выборки кандидатов на данные объекты, основанный на каталоге [1]. Приведен список кандидатов для дальнейшего исследования. Наблюдательный материал, 723 состоящий ИЗ спектров, полученный на спектрографе UVES. расположенном на одном из телескопов VLT (Чили), приведен в разделе 2.2 вместе с описанием общей характеристики спектрографа UVES. В разделе 2.3 описание разработанной программы для экстрактации и приводится нормализации на континуум спектров UVES В «красном» режиме, составленной на основе развития программы [2]. В разделе 2.4.1 для фундаментальных определения характеристик использовались фотометрические данные. Описаны методы нахождения эффективной температуры и ускорения силы тяжести на поверхности звезды. В разделе 2.4.2 приведены методы вычисления проекции скорости вращения на луч зрения и определения магнитного поля. В разделе 2.4.3 описаны методики анализа химического состава, определения эффективной температуры и ускорения посредством описания профиля водородной силы тяжести линии синтетическим спектром с помощью программы SYNTHV [3], определения значения магнитных полей с помощью аппроксимации функциями Гаусса зеемановского расщепления линий железа и с помощью рассчитанного синтетического спектра программой SYNTHMAG [4]. В разделе 2.5 описан анализ лучевых скоростей, основанный на выборке спектральных линий и построении кривых лучевых скоростей и амплитудных спектров. Описана процедура получения усредненного периода пульсаций для звезд, которые отождествлены как гоАр звезды. Для уточнения амплитуд и фаз пульсаций производилась аппроксимация лучевых скоростей косинусоидой с заданным периодом.

В третьей главе приведены общие результаты анализа, описанного во второй главе, для 12 звезд: HD 5823, HD 69013, HD 96237, HD 119027, HD 132205, HD 143487, HD 148593, HD 151860, HD 177765, HD 178892, HD185204, HD 185256. Приводится сводная таблица фундаментальных характеристик этих звезд, определенных с помощью фотометрических методов и анализа усредненных спектров звезд. В результате частотного анализа, описанного в разделе 2.5, было обнаружено четыре новых гоАр звезды HD 177765, HD 132205, HD 148593 и HD 151860, результаты анализа которых описаны в разделах 3.1 – 3.4. В разделе 3.1 приведен анализ звезды HD 177765, которая показала наибольший из всех известных roAp звезд период пульсаций - 23.6 мин. Для звезды HD 177765 определен химический состав, который схож с другой roAp звездой  $\beta$ CrB [5], и оценены эффективная температура и ускорение силы тяжести по моделированию водородной линии Нα. Для двух ранее известных, как фотометрические roAp звезды HD 119027[6] и HD 185256[7] в разделах 3.5 и 3.6 приводятся характеристики пульсаций лучевых скоростей линий определенных химических элементов. В разделах 3.7 – 3.9 приводятся более точные результаты анализов лучевых скоростей, проведенные для трех ранее отождествленных спектроскопическими методами roAp звезд HD 69013[8], HD 96237[9] и HD 143487 [9]. Для звезд HD 5823, HD 178892 и HD 185204, для которых не удалось обнаружить пульсации, в разделах 3.10 – 3.12 приводятся верхние пределы амплитуды, вычисленные для обычно пульсирующих у roAp спектральных линий ионов. В разделе 3.13 приводятся выводы для всех исследованных звезд.

**В четвертой главе** приводятся результаты тестирования модели возбуждения пульсаций для хорошо изученных ярких гоАр звезд  $\alpha$ Cir,  $\beta$ CrB, 10Aql и  $\gamma$ Equ, для которых можно с относительно хорошей точностью

определить значение светимостей. В разделе 4.1 представлены основные механизмы возбуждения пульсаций гоАр звезд, а также рассмотрены основные отличия существующих теорий. В разделе 4.2 описываются модели [10] вышеупомянутых звезд, характеристики для которых были получены интерферометрическим, спектроскопическим и фотометрическим методами. Для всех исследуемых звезд приведены интервалы частот, которые могут возбуждаться в теоретических моделях. В разделе 4.3 описываются характеристики и граничные условия, необходимые для вычисления моделей. В разделе 4.4 приведены результаты данного тестирования. Отмечено, что современная теория [10] возбуждения пульсаций в гоАр звездах достаточно хорошо описывает только три (βCrB, 10Aql и γEqu) из четырех звезд.

В заключении сформулированы основные результаты.

- Разработан программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме вести экстракцию и обработку эшелле спектров спектрографа UVES в «красном» режиме с центральной длинной волны λ = 600 нм.
- Анализ обработанных спектров двенадцати звезд HD 132205, HD 148593, HD 151860, HD 177765, HD 119027, HD 185256, HD 69013, HD 96237, HD 143487, HD 5823, HD 178892, HD185204 позволил определить основные фундаментальные параметры: эффективную температуру, ускорение силы тяжести, проекцию скорости вращения на луч зрения и величину магнитного поля.
- 3. Показано, что звезды HD 132205, HD 148593, HD 151860 и HD 177765 принадлежат классу быстро пульсирующих звезд.
- Показано, что среди всех известных гоАр звезд, HD 177765 имеет рекордное значение периода пульсаций - 23,6 мин, которое в дальнейшем было подтверждено другими авторами.
- 5. Спектроскопическим методом определены более точные значения амплитуд и периодов пульсаций гоАр звезд HD 69013, HD 96237 и HD

143487 и подтверждена гоАр классификация обнаруженных ранее фотометрическим методом звезд HD 119027 и HD 185256.

- 6. Показано отсутствие характерной для гоАр переменности у звезд HD 5823, HD 178892 и HD185204, считавшимися кандидатами в гоАр.
- 7. Результаты моделирования пульсаций звезд γEqu, 10 Aql, βCrB и αCir на основе общепринятой модели возбуждения пульсаций достаточно хорошо предсказывают наблюдаемые частоты трех roAp звезд γEqu, 10 Aql и βCrB. В отличии от указанных звезд, частота пульсаций звезды αCir лежит выше предельной акустической частоты, и для объяснения природы ее пульсаций, возможно, требуется иной механизм их возбуждения.

В приложении приведены амплитудные спектры и кривые лучевых скоростей звезды HD 177765 для ряда линий ионов химических элементов, а также ядра водородной H*α*, которые показывают пульсации.

# ГЛАВА 1. БЫСТРО ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ЗВЕЗДЫ

#### 1.1. Характеристики быстро пульсирующих звезд

Среди большого множества звезд выделяется особая группа, которая называется химически пекулярные (chemical peculiar, CP) звезды. Данная группа характеризуется интересными особенностями в своих спектрах. Анализ данных спектров показывает аномальные содержания некоторых ионов химических элементов, а также возможную неоднородность их распределения, как по поверхности звезды, так и с глубиной. Звезды CP разделены на 4 класса: так называемые «металлические» Ар/Вр с сильными магнитными полями, «металлические» Ат звезды, ртутно-марганцевые (HgMn) звезды, а также богатые и бедные гелием (He-week, He-rich) в своих атмосферах звезды. Но четких границ, разделяющих данные группы, нет. «Металличность» спектров проявляется в аномально большом химическом составе по сравнению с солнечных ионов таких элементов, как Sr, Cr, а также в редкоземельных элементах (rare earth element (REE)).

Особый интерес среди астрофизиков представляют некоторые звезды подкласса Ар, которые характеризуется быстрыми пульсациями в высоких обертонах акустических мод. Период пульсаций таких звезд составляет порядка 10 минут. Соответственно данные звезды получили название быстро пульсирующие Ар (rapidly oscillating Ap, roAp) звезды. Звезды гоАр являются уникальными астрофизическими лабораториями, которые позволяют изучать эффекты воздействия сильных магнитных полей на вращение звезд, конвекцию, пульсации и перенос химических элементов внутри этих звезд и их атмосферах. Эти звезды относятся к группе магнитных поздних-А и ранних-F объектов, в основном известных как SrCrEu Ap звезды. Звезды гоАр показывают нерадиальные р-моды пульсаций и низкими амплитудами в фотометрических и спектроскопических наблюдениях [11,12]. Пример одной из нерадиальных мод колебаний приведен Рис. 1. Наличие мульти периодических пульсаций во многих гоАр звездах делает их интересными

объектами для классического астросейсмического анализа, связанного с определением глобальных звездных свойств (например, [13]). Дополнительно, спектральный анализ ионов линий REE, которые формируются в разных слоях атмосферы этих звезд, предлагают уникальную возможность для томографической картины вертикальной структуры пульсационных мод [14] и для изучения сложных деталей физики распространения магнитноакустических волн [15].



Рис. 1<sup>1</sup>. Пример колебаний нерадиальной моды. Разным цветом показаны области, движущиеся в разных направлениях.

На данный момент мы имеем только ограниченное понимание физических процессов, ответственных за возбуждение высоко-обертонных рмод осцилляций в магнитных Ар звездах. Наиболее подходящая теория возбуждения пульсаций в гоАр звездах описана в работе [10]. Так как движущий механизм осцилляций следует из энергетического баланса, который зависит напрямую от взаимодействия между магнитным полем, конвекцией, пульсациями и атомной диффузией, пульсационный анализ предоставляет уникальный инструмент для изучения этих физических процессов и их связей.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Источники рисунка: http://www.galactic.name/vokrug\_sveta/astronomy\_article\_005.php

#### 1.2. Теория возникновения пульсаций

Для того, чтобы оценить возможность возникновения осцилляций быстро пульсирующих звезд, требуется понимание самого механизма возбуждения возможных мод осцилляций и зависимость их частот от внутренней структуры звезды. В основе решения динамики звезды лежат уравнения гидродинамики и равновесия

#### 1.2.1. Гидродинамические уравнения

Для дальнейшего понимания теории звездных осцилляций, в данном разделе кратко будут рассмотрены основные принципы гидродинамики. Подробное описание, но без вывода формул, представлено в книге [16]. В более расширенном виде описание гидродинамики представлено в книгах [17,18], где уделено особое внимание колебаниям.

Так как газ, из которого состоит звезда, при рассмотрении ее как сферически симметричной и равновесной, представляет собой сплошную среду, то все ее характеристики будут зависеть от радиуса r и времени t. Следовательно, можно записать уравнение непрерывности звезды в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \boldsymbol{v}) = 0, \tag{1}$$

где плотность  $\rho = 1/V$  на единицу массы. Следовательно div(v) – скорость расширения заданного объема газа. Так как в звездных условиях обычно можно игнорировать внутрение трение, то уравнение движения можно записать следующим образом:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \nabla \mathbf{p} + \rho \mathbf{f} = \mathbf{0},\tag{2}$$

здесь p – давление, а f – вектор ускорения на единицу массы.

Гравитационное ускорение  $g = -\Delta \Phi$ , где  $\Phi$  удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta^2 \Phi = 4\pi G\rho \tag{3}$$

$$\Phi(\mathbf{r},t) = -G \int_{V} \frac{\rho(\mathbf{r}',t)dV'}{|\mathbf{r}'-\mathbf{r}|}$$
(4)

Для полноты систем уравнений требуется учесть связь между плотностью  $\rho$  и давлением p, которое может быть получено из термодинамических свойств и энергии газа. А именно, система должна удовлетворять первому закону термодинамики:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dE}{dt} + p \frac{dV}{dt},\tag{5}$$

где *dq/dt* – приращение тепла, а E – внутренней энергией. При рассмотрении равновесной структуры все переменные не зависят от времени. Для текущего допущения о сферической симметрии, обозначим равновесные величины с нижним индексом «0» и запишем уравнение гидростатического равновесия в виде:

$$\nabla \mathbf{p}_0 = -\rho_0 \nabla \Phi_\mathbf{0} \tag{6}$$

Следовательно, уравнение равновесия принимает вид:

$$g_0 = \frac{Gm_0}{r^2} \tag{7}$$

В результате решения вышеприведённых гидродинамических уравнений, совместно с заключением о равновесии и сферической симметрии звезды, то можно получить равновесные уравнения. Уравнение движения (3) не изменяется  $\Delta^2 \Phi_0 = 4\pi G \rho_0$ . Если поток *F* направлен радиально наружу, а

общий поток L<sub>0</sub> через сферу радиусом *r* имеет вид L<sub>0</sub> =  $4\pi r^2 F_{r,0}$ , то из уравнения энергии можно получить:

$$\frac{dL_0}{dr} = 4\pi r^2 \rho_0 \varepsilon_0 \tag{8}$$

Диффузионное уравнение вытекает из выражения для потока  $F = -\frac{4\pi}{3\kappa\rho}\nabla B = -\frac{4acT^3}{3\kappa\rho}\nabla T$ , где  $B = \sigma T^4$  – поток излучения абсолютно черного тела,  $\kappa$  – непрозрачность, с – скорость света и а – постоянная плотности излучения:

$$\frac{dT_0}{dr} = -\frac{3\kappa_0\rho_0}{16\pi r^2 a\tilde{c}T_0^3}\varepsilon L_0 \tag{9}$$

#### 1.2.2. Возмущенное состояние

При наличии флуктуаций давления, уравнение равновесия Эйлера имеет вид:

$$p(\mathbf{r},t) = p_0(\mathbf{r}) + p'(\mathbf{r},t),$$
(10)

а, с учетом смещения *бr*, флуктуации давления Лагранжа будет:

$$\delta p(\mathbf{r}) = p'(\mathbf{r}_0) + \delta \mathbf{r} \nabla p_0 \tag{11}$$

Возмущение в остальные выражения вводятся по аналогии с уравнением (10) и (11). В результате уравнение непрерывности принимает вид

$$\rho' + div(\rho_0 \delta r) = 0 \tag{12}$$

Уравнение движения преобразуется в формулу

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{\delta r}}{\partial t^2} = -\nabla p' + \rho_0 \boldsymbol{g}' + \rho' \boldsymbol{g_0}$$
(13)

Здесь  $g' = -\nabla \Phi'$ . Возмущение гравитационного потенциала удовлетворяет уравнения Пуассона:

$$\Delta^2 \Phi' = 4\pi G \rho' \tag{14}$$

Аналогичные уравнения для энергии приведут к получению производной приращения энергии Лагранжа:

$$\frac{\partial \delta q}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0 \left(\Gamma_{3,0} - 1\right)} \left(\frac{\partial \delta p}{\partial t} - \frac{\Gamma_{1,0} p_0}{\rho_0} \frac{\partial \delta \rho}{\partial t}\right),\tag{15}$$

и для возмущения Эйлера:

$$p' + \boldsymbol{\delta r} \nabla p_0 = \frac{\Gamma_{1,0} p_0}{\rho_0} (\rho' + \boldsymbol{\delta r} \nabla p_0)$$
(16)

В данных уравнениях адиабатические экспоненты определены как:

$$\Gamma_1 = \left(\frac{\partial \ln p}{\partial \ln \rho}\right)_{ad}, \quad \Gamma_3 - 1 = \left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln \rho}\right)_{ad}$$

# 1.2.3. Уравнения звездных осцилляций

Так выражения предполагают сферическую как данные симметричность, отсутствие магнитного поля, а также статичность параметров на временной шкале осцилляций, то можно ввести зависимость параметров только от величин  $f(r, \varphi, \theta)$ , которые представлены на Рис. 2. Разделим вектор возмущения  $\delta r$  на горизонтальную и радиальную составляющие

$$\delta \boldsymbol{r} = \xi_r \boldsymbol{a}_r + \xi_h \tag{17}$$



Рис. 2<sup>1</sup>. Сферическая система координат.

Горизонтальная составляющая возмущения из уравнения движения (13) будет

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{\xi_h}}{\partial t^2} = -\nabla_{\rm h} p' - \rho_0 \nabla_{\rm h} \boldsymbol{\Phi}' \tag{18}$$

Так как горизонтальный градиент равновесных величин равен нулю, то горизонтальную дивергенцию можно переписать в виде

$$\rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla_{\mathbf{h}} \boldsymbol{\xi}_{\boldsymbol{h}} = -\nabla_h^2 p' - \rho_0 \nabla_h^2 \boldsymbol{\Phi}'$$
<sup>(19)</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Источник рисунка: С. Aerts "Asteroseismology" Springer, 2010, стр. 189

Уравнение непрерывности (12) будет иметь вид:

$$\rho' = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_0 r^2 \xi_r) - \rho_0 \nabla_h^2 \mathbf{\Phi}'$$
<sup>(20)</sup>

Данное уравнение помогает избавиться от  $\nabla_h * \xi_h$  в уравнении (13), которое в результате принимает вид

$$-\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \rho' + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \rho_0 r^2 \xi_r \right] = -\nabla_h^2 p' - \rho' g_0 - \rho_0 \frac{\partial \Phi'}{\partial r}$$
(21)

Радиальный компонент уравнения (13) будет равен

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi_r}{\partial t^2} = -\frac{\partial p'}{\partial r} - \rho' g_0 - \rho_0 \frac{\partial \Phi'}{\partial r}$$
(22)

и уравнение Пуассона можно записать в виде

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\Phi'}{\partial r}\right) + \nabla_h^2\Phi' = 4\pi G\rho'$$
(23)

Из вида данных выражений, можно разложить возмущения в зависимости от  $\varphi$  и  $\theta$  как функцию  $f(\varphi, \theta)$  в виде  $f(\varphi, \theta) = f_1(\theta) * f_2(\varphi)$ , если f является собственной функцией горизонтального оператора Лапласа

$$\nabla_h^2 f = -\frac{1}{r^2} \Lambda f, \qquad (24)$$

где Л – константа. Распишем более подробно выражение (24)

$$\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left( \sin\theta \frac{\partial f}{\partial\theta} \right) + \frac{1}{\sin^2\theta} \frac{\partial^2 f}{\partial\varphi^2} = -\frac{1}{r^2} \Lambda f$$
(25)

Из него мы можем вывести следующие дифференциальное уравнение относительно  $f_1$ 

$$\frac{d}{dx}\left[(1-x^2)\frac{df_1}{dx}\right] + \left(\Lambda - \frac{m^2}{1-x^2}\right)f_1 = 0,$$
(26)

где x= $\cos\theta$ . Решением уравнения (26) является зависимость

$$f_1(\theta) = P_l^m(\cos\theta) \tag{27}$$

Здесь  $P_l^m$  — функция Лежандра. Таким образом, малоамплитудные осцилляции сферических объектов наподобие звезд могут описываться в виде сферических гармоник

$$Y_l^m(\theta,\varphi) = (-1)^m c_{lm} P_l^m(\cos\theta) \exp(im\varphi), \qquad (28)$$

где  $P_l^m - функция Лежандра, и c_{lm}$  определено таким образом

$$c_{lm}^2 = \frac{(2l+1)(l-1)!}{4\pi(l+m)!}$$
(29)

чтобы интеграл по единичной сфере |Y<sub>l</sub><sup>m</sup> |<sup>2</sup> равнялся 1. Теперь можно записать:

$$\xi_r(r,\varphi,\theta,t) = \sqrt{4\pi} \tilde{\xi}_r(r) Y_l^m(\varphi,\theta) \exp(i\omega t)$$
(30)

$$p'(r,\varphi,\theta,t) = \sqrt{4\pi}\widetilde{p'}(r)Y_l^m(\varphi,\theta)\exp(i\omega t)$$
(31)

#### и так далее.

В гоАр звезд за пульсации отвечают моды давления (*p*-моды), для которых свойственны нерадиальные пульсации. Нерадиальные моды появляются только для  $n \ge 1$ . Пока внешняя оболочка премещается вперед к наблюдателю, внутренняя часть движется обратно к центру. Дипольные моды являются доминирующими модами в гоАр звездах, а также наблюдаются во многих других типах пульсаций.

Моды с двумя поверхностными узлами (1 = 2) известны как квадрупольные моды. Для мод l = 2 и m = 0 узлы лежат на широтах  $\pm 35^{\circ}$ . На

Рис. 3 изображен набор октупольных (*l* = 3) мод, который дает представление того, как различные моды выглядят на поверхности.



Рис. 3<sup>1</sup>. Изображение радиальной составляющей октупольных мод под углами 30°, 60° и 90° для следующих мод:  $(l = 3, m = 0), (l = 3, m = \pm 1), (l = 3, m = \pm 2)$  и  $(l = 3, m = \pm 1)$ . Красным изображено движение от центра, а синим – к центру

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Источник рисунка: С. Aerts "Asteroseismology" Springer, 2010, стр. 14

Комплексная частота пульсаций в формулах (30,31) может быть выражена как  $\omega = \omega_r + i\omega_i$ . Если обозначить  $i\omega_i = \eta$ , то зависимость возмущений от  $\varphi$  и *t* имеет вид

$$\cos(m\varphi - \omega_r t + \delta_0)e^{\eta t} \tag{32}$$

Для m  $\neq$  0 данное выражение описывает волну, которая двигается вокруг экватора с угловой фазовой скоростью  $\omega_r/m$ . Период возмущений P =  $2\pi/\omega_r$ . Стабильность или нестабильность мод определяется возможностью этих мод возбуждаться. Другими словами, амплитуда волны экспоненциально растет или затухает со временем в зависимости от того, является ли темп роста  $\eta$  в формуле (32) положительным или отрицательным.

#### 1.2.4. Современные модели пульсаций

Современные теоретические модели пульсаций довольно успешно описывают наблюдаемые пульсационные частоты [8,19] и довольно хорошо оценивают сложную геометрию пульсационных мод с учетом вращения и присутствия магнитного поля [20,21,22]. Но данные модели менее предсказуемы при попытке объяснить распределение гоАр звезд на H-R диаграмме. При сравнении с наблюдениями, модели возбуждения пульсаций предсказывают пульсации в более горячих и более ярких Ар звездах на диаграмме H-R [23,24].

Различие между гоАр и не пульсирующими Ар (поАр) звездами в значительной степени зависит от разрешающей способности, а также наземные или космическими являются наблюдения (например, [25,26]), которые могут быть недостаточно чувствительны, чтобы выявить низкоамплитудные фотометрические изменения. В самом деле, наблюдения с помощью спутника Kepler показали, что у некоторых гоАр звезд амплитуда осцилляций не превышает нескольких десятых µmag [27]. Безусловно, такие гоАр звезды были бы идентифицированы как постоянные поАр из анализа наземных наблюдений.

Недавние спектроскопические обнаружения пульсаций в некоторых прототипах «фотометрических поАр» звездах [28,29,30] показали явные преимущества спектроскопических наблюдений в отличие от наземных фотометрических методов в открытии и описании пульсаций в холодных Ар звездах. В частности, спектроскопия высокого разрешения позволяет выделить линии REE, которые часто показывают в 10-100 раз большие пульсационные амплитуды, чем линии ионов легких элементов и железного пика.

# ГЛАВА 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

#### 2.1. Выбор объектов для исследования

Претенденты в гоАр звезды для последующего анализа выбирались следующим образом. Предварительный список гоАр кандидатов был взят из каталога [1], с учетом последних публикаций, посвященных Ар звездам. Были выбраны звезды с эффективной температурой ниже T<sub>eff</sub> = 8000 K, за пределами которой наблюдаются только несколько известных гоАр звезд. Также было предпочтение объектам с достаточно четкими спектральными отдано линиями, для которых можно ожидать лучшей точности в измерениях лучевых скоростей. Для подтверждения холодной природы рассматриваемых звезд были использованы архивные спектры ESO, которые были описаны в Было обнаружено, что многие из объектов поздние-А, работе [31]. классифицированные как, например, "Ар Sr" [1] и включенные в предыдущие фотометрические исследования, являются или Ат-звездами, или очень быстро вращающимися, для которых спектральная классификация неоднозначна. Наконец, был составлен список из 14 звезд, 12 из которых в конечном итоге наблюдались в процессе выполнения работ по программе ESO Period 85. Эта выборка включает две уже определенные фотометрическими методами roAp звезды HD 119027 и HD 185256, для которых не проводились спектральные наблюдения с высоким временным разрешением, a также три «спектроскопические» roAp звезды HD 69013, HD 96237 и HD 143487, для которых также не проводились спектроскопические исследования с высоким разрешением.

#### 2.2. Наблюдательный материал

#### 2.2.1. Эшелле спектрограф UVES

Эшелле спектрограф высокого разрешения Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph (UVES) (Рис. 4) расположен на одном из телескопов Very Large Telescope (VLT) Европейской организации астрономических исследований в Южном полушарии (ESO) в Чили. VLT расположен на высоте 2600 м и состоит из четырех неподвижных больших UT (Unit Telescope) диаметром 8,2 м, и четырех подвижных AT (Auxiliary Telescope) диаметром 1.8 м. Первый восьмиметровый телескоп начал свою работу в 1998 г.

Данный спектрограф разработан для работы в диапазонах длин волн от 3000 Å до порядка 11000 Å. Для улучшения светочувствительности в красной и синей области используется две матрицы, свет для которых разбивается на ультрафиолето-синий два пучка: И видимо-красный. Разрешающая способность данного инструмента зависит от используемого режима и составляет порядка 110000 для режима с резателем изображений. Точность определения лучевых скоростей линий составляет порядка нескольких десятков м/с. Спектрограф UVES расположен на стальной платформе и имеет которой расположены калибровочные прищелевую часть, В лампы, оптический деротатор и ячейка йода. Основные характеристики спектрографа UVES представлены в Таблице 1.

Фокус	Nasmyth B			
Тип	Кросс-дисперсионный эшелле спектрограф			
	Синяя ветвь	Красная ветвь		
Длины волн	300–500 nm	420–1100 nm		
Спектральное разрешение	до 80 000	до 110000		
ССО матрица	2048 x 4096	две мозаичные 2048 x 4096		
Дифракционная решетка	41.59 g/mm	31.6 g/mm		
кросс дисперсионная дифракционная решетка (длинна волны максимума эффективности)	#1: 1000 g/mm (360 nm) #2: 660 g/mm(460 nm)	#3: 600 g/mm(560 nm) #4: 312 g/mm(770 nm)		

Таблица 1. Основные характеристики спектрографа UVES.



Рис. 4<sup>1</sup>. Телескоп UT2 (Kueyen) системы Very Large Telescope (Чили). На переднем плане – спектрограф высокого разрешения UVES.

#### 2.2.2. Данные наблюдений

Кандидаты и уже известные гоАр звезды нашей программы наблюдались в период с апреля по июль 2010 г с помощью спектрографа UVES VLT. Спектрограф был настроен на использование в красном режиме (600 нм) с резателем изображений. Эти настройки предоставляют разрешающую способность  $R \approx 110\ 000$  и покрытие длин волн от 4980 Å до 7010 Å. Область между матрицами не дает возможности получить участок спектра шириной порядка 100 Å с центром в районе 5990 Å.

Каждая временная серия звездных наблюдений содержит 50 - 67 экспозиций. Индивидуальные времена экспозиций составляли от 60 до 90 секунд в зависимости от яркости звезды. Для оптимизации этих временных серий наблюдений был использован ультрабыстрый (4-port, 625 kpix s<sup>-1</sup>)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Источник картинки: ESO (https://www.eso.org/public/russia/teles-instr/paranal-observatory/vlt/vlt-instr/uves/)

режим матрицы UVES CCD, который позволяет уменьшить время между экспозициями до 21 сек.

Звезда	V	Ν	T <sub>exp</sub> ,	HJD <sub>start</sub> -	HJD <sub>end</sub> -	S/N
			S	2455000	-2455000	
HD 5823	9.98	50	80	372.88456	372.94191	60–100
HD 69013	9.56	62	60	300.46474	300.52203	40–70
HD 96237	9.45	50	60	300.53081	300.57686	70–115
HD 119027 <sup>1</sup>	9.92	50	90	289.82059	289.88364	55–90
HD 119027 <sup>2</sup>	9.92	50	90	300.58321	300.64623	45–75
HD 132205	8.72	50	60	288.85571	288.90175	100–160
HD 143487	9.43	62	60	374.71393	374.77122	70–110
HD 148593	9.15	50	60	389.67704	389.72305	80–130
HD 151860	9.01	50	60	326.83944	326.88543	85–130
HD 177765	9.15	50	60	359.80871	359.85473	80–95
HD 178892	8.94	67	60	351.83831	351.90025	80–130
HD 185204 <sup>1</sup>	9.53	38	60	349.64696	349.68171	45–70
HD 185204 <sup>2</sup>	9.53	50	60	382.88979	382.93578	45–75
HD 185256	9.96	50	80	324.79581	324.85315	45–75

Таблица 2. Данные наблюдений спектрографа UVES гоАр звезд, а также кандидатов в гоАр звезды.

Примечание - В столбцах указано имя звезды, звездная величина в системе Джонсона в фильтре V, количество спектров, время экспозиции, начальная и конечная гелиоцентрические юлианские даты временных серий наблюдений и отношения сигнала к шуму. Для звезд HD 119027 и HD 185204 верхние индексы обозначают разные ночи наблюдений В общей сложности получено 729 спектров в формате FITS с характерным отношением сигнала к шуму от 40 до 160 за 10 наблюдательных ночей. Подробная информация о принятых временах экспозиции, количестве полученных спектров, гелиоцентрические юлианские даты начала и конца наблюдений характерное отношение сигнала к шуму приведено в Таблице 2. Известная гоАр звезда HD 119027 наблюдалась два раза с 50 экспозициями в каждую ночь. Для другого объекта, HD 185204, незаконченная временная серия из 38 экспозиций была получена дополнительно к стандартной 50экспозиционной последовательности. Мы проанализировали эти несколько наборов данных, полученных для HD 119027 и HD 185204, индивидуально.

#### 2.3. Обработка наблюдательного материала

Обработка спектров производилась созданным программным комплексом UVES pipeline, который базировался на опыте программы [2]. Результаты обработки данных с помощью программного обеспечения [2] представлены в работах [14,32]. Пример участка изображения из FITS файла одного из спектров звезды HD 177765 приведен на Рис. 5.

Разработанный программный комплекс обработки эшелле спектров проделывает стандартные процедуры и калибровочные операции, такие как усреднение BIAS и их вычитание, определение положения эшелле порядков, вычитание рассеянного света, вычитание треков космических частиц, извлечение 1-D звездного спектра, учет чувствительности матрицы, коррекция функции отклика решетки, используя плоское поле, вычисление гелиоцентрической юлианской даты и учет поправок лучевых скоростей. Рассеянный свет определялся с помощью усредненных межпорядковых областей, аппроксимированных полиномом. На последнем шаге была построена дисперсионная кривая.

Для построения дисперсионной кривой использовался итерационный алгоритм двумерной аппроксимации полиномом Чебышева [2] обработанных порядков спектра ThAr с возможностью изменения степени:



Рис. 5. Участок одного из исходных спектров звезды HD 177765.

$$\lambda(x,n) = \sum_{i=0}^{M} \sum_{j=0}^{N} a_{ij} m^{i} x^{j}$$
(33)

В результате аппроксимации ThAr эмиссионного спектра, который был получен после временных серий наблюдений звезды, среднеквадратическое отклонение точек находится в диапазоне 35 - 40 м/с для всех ночей наблюдений.

Нормализация на континуум спектров проводилась в два этапа. На первом этапе вычислялся высококачественный средний спектр для каждого временного ряда и определялся континуум, используя сплайн-функцию для выбранных вручную точек. На втором этапе нормализовался автоматически каждый индивидуальный спектр так, чтобы он соответствовал континууму среднего спектра, при этом также производился дополнительный поиск следов космических частиц. Пример проведения континуума приведен на Рис. 6. Коррекция барицентрической лучевой скорости производилась на последнем шаге.



Рис. 6. Проведение континуума для пятого порядка одного из спектров звезды HD 151860.

#### 2.4. Определение параметров звезд

Фундаментальные параметры звезд определялись с помощью фотометрических наблюдений и обработанных нами усредненных спектров. Дополнительный анализ был выполнен для звезды HD 177765, в котором было произведено определение химического состава и аппроксимация профиля водородной линии теоретически рассчитанным спектром.

#### 2.4.1. Фотометрические данные

Оценка фундаментальных характеристик, таких как  $T_{eff}$  и logg, исследуемых звезд производилась с помощью программы TEMPLOGG [33]. В качестве исходных параметров использовались фотометрические данные в системе Strömgren из работы [6], к которым была применены калибровки [34] и [35]. Для звезды HD 178892, которая не имеет фотометрических данных Strömgren, мы приняли атмосферные параметры из работы [36].

# 2.4.2. Определение магнитного поля и проекции скорости вращения на луч зрения

Измерение модуля среднего значения магнитного поля было выполнено с помощью аппроксимации функциями Гаусса зеемановских разрешенных компонентов спектральной линий железа Fe II 6149.26 Å. В случае, когда эта линия не показывает зеемановское расщепление, или была «испорчена» соседними линиями, применялось описание функциями Гаусса других спектральных линий, или использовалась программа расчета синтетического спектра SYNTHMAG [4] для моделирования магнитного уширения магниточувствительных спектральных линий. Последняя процедура была также необходима, когда линии, в основном, были уширены вращением. Точность определения магнитного поля с помощью аппроксимации хорошо разрешаемых зеемановских компонент спектральных линий составляет около
0.1 kG. С другой стороны, точность определения модуля среднего значения магнитного поля, определенного методом синтетического спектра, составляет ~ 0.5 kG [4].

Программа SYNTHMAG была также использована для определения проекции скорости вращения на луч зрения  $v_e sini$  посредством аппроксимации магнитонечувствительных линий, таких, например, как Fe I 5434.52 Å. Вышеупомянутые операции производились в программе BINMAG<sup>1</sup>, написанной O. Kochukhov, в среде разработки Interactive Data Language (IDL).

# 2.4.3. Определение химического состава, эффективной температуры и ускорения силы тяжести спектроскопическими методами.

Для звезды HD 177765 был проведен анализ химического состава следующим образом. Для избранных неблендированных спектральных линий ионов химических элементов вычислялась эквивалентная ширина. Данная ширина преобразовывалась в содержание с помощью модифицированной версии программы WIDTH9 (WIDTH<sub>MF</sub>), написанной V. Tsymbal. Данная программа учитывает влияние магнитного поля с помощью псевдомикротурбуленции. Также был проведен тест для расчета химических элементов путем расчета синтетического спектра и подгонки его к усредненному наблюдаемому спектру. Сравнение данной процедуры с результатами вычислений по синтетическому спектру, рассчитанного с магнитным полем [4], дает схожие значения.

Для определения таких фундаментальных параметров, как  $T_{eff}$  и logg вычислялся синтетический профиль водородной линии H $\alpha$ , с помощью программы SYNTHV [3]. Вычисленная сетка модельных профелей сравнивалась с наблюдаемым профилем водородной линии.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> http://www.astro.uu.se/~oleg/

# 2.5. Метод анализа лучевых скоростей

Для определения изменений лучевых скоростей (RV) в индивидуальных линиях и группах линий были использованы обработанные, одномерные спектры. Атомные данные, необходимые для идентификации спектральных линий, были получены из базы данных VALD [37], а также из предыдущего исследований гоАр звезд [38]. Для дальнейшего анализа выбирались только линии, неблендированных другими линиями, а также в крыльях водородной линии. Анализ лучевых скоростей начинался с определения центров линий, используя метод центра масс по методике [39], которую любезно предоставил О. Kochukhov. Для определения координаты центра линии в каждом спектре производится вычисление центра тяжести фигуры, ограниченной пределами линии:

$$X_{grav} = \frac{\sum X_i Y_i}{\sum Y_i} \tag{34}$$

где  $X_{grav}$  – координата центра тяжести линии,  $X_i$  – координата *i*-й точки,  $Y_i$  –соответствующие значения интенсивности.

Учитывая качество наблюдательного материала, индивидуальные спектральные линии редко предоставляют достаточно точные лучевые скорости для однозначного определения пульсаций. Поэтому лучевые скорости для избранных ионов химических элементов усреднялись и для каждого иона строилась средняя кривая лучевых скоростей. Из данной кривой вычиталась линейная зависимость. Затем используется метод дискретного преобразования Фурье для получения амплитудных спектров и получения начального приближенного значения пульсационного периода из положения наибольшего пика. Вероятность шумового сигнала (False Alarm Probability, FAP) была определена как:

$$FAP = 1 - [1 - e^{-z}]^N \tag{35}$$

где Z – высота пика нормированной дисперсии периодограммы Ломба-Скаргла [40]. Количество независимых частот N было вычислено в соответствии с работой [41]. Средний пульсационный период был определен с помощью усреднения периодов, полученных по линиям отдельных ионов, которые показывали наименьше значение FAP. На последнем шаге кривые лучевых скоростей индивидуальных ионов были аппроксимированы косинусоидой с помощью линейного метода наименьших квадратов для того, чтобы получить оценку фаз и амплитуд пульсаций.

Описание данных лучевых скоростей косинусоидой позволяет получить доверительное значение относительной высоты образования спектральных линий в атмосфере. Как показано в работе [14], в атмосферах многих гоАр наблюдается изменение фазы пульсаций в звезд зависимости ОТ принадлежности линий к тому или иному иону химического элемента. Это было интерпретировано как распространение пульсационных волн через химически стратифицированную атмосферу. В первом приближении можно предположить, что меньшая фаза в косинусоиде соответствует позднему пульсационному максимуму и, следовательно, более высоким слоям формирования линий в атмосфере. И наоборот. В дополнение к изучению линий редкоземельных ионов, которые типично показывают большие амплитуды лучевых скоростей в roAp звездах, также был проведен частотный анализ средних кривых лучевых скоростей линий ионов, обычно не показывающих пульсации, таких, как Fe I). Подобная оценка необходима для проверки внутренней стабильности спектрографа и выявления ложной переменности, связанной с инструментальными артефактами.

# ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА И АНАЛИЗА БЫСТРОПУЛЬСИРУЮЩИХ ЗВЕЗД

В этой главе представлены результаты поиска и анализа короткопериодических осцилляций в выбранных звездах. Усредненные спектры всех программных звезд представлены на Рис. 7. Большинство объектов медленно вращаются, показывая богатый спектр, в частности везде видно линию Nd III 6145 Å. Зеемановское расщепление линии Fe II 6149 Å также хорошо заметно невооруженным глазом в нескольких звездах.

Таблица 3 обобщает основные параметры исследуемых звезд. В этой таблице приведена средняя эффективная температура  $T_{eff}$ , полученная с помощью калибровок [34, 35] фотометрии Strömgren, и ускорение силы тяжести, полученное с помощью [34]. В таблице также указано значение проекции скорости вращения на луч зрения, а также среднее значение магнитного поля методами, описанными выше.

Следующие разделы представляют детали анализа впервые открытых roAp звезд HD 177765, HD 132205, HD 148593 и HD 151860, известных из прошлых фотометрических исследований roAp звезд HD 119027 и HD 185256, подтверждение спектроскопических обнаружений пульсаций в HD 69013, HD 96237 и HD 143487, и отсутствие их в звездах HD 5823, HD 178892 и HD 185204.



Рис. 7. Усредненные нормированные спектры звезд в диапазоне 6140 - 6164 ÅÅ, смещенные друг относительно друга на 0.4. Идентификация приведена для наиболее важных спектральных линий.

Таблица 3. Фундаментальные параметры звезд.

Звезда	Спектральный	T <sub>eff</sub> ,	$\log g$	v <sub>e</sub> sin <i>i</i> ,	< <i>B</i> >
	класс	Κ		km s <sup>-1</sup>	(kG)
HD 5823	F2 SrEuCr	7300	4.3	13.5	8.5*
HD 69013	A2 SrEu	7600	4.5	4.0	4.8
HD 96237	A4 SrEuCr	7800	4.3	6.0	$2.9^{*}$
HD 119027	A3 SrEu	7050	4.4	4.0	3.1
HD 132205	A2 EuSrCr	7800	4.4	9.5	$5.2^{*}$
HD 143487	A3 SrEuCr	7000	5.0	1.5	4.7
HD 148593	A2 Sr	7850	4.4	5.0	3.0*
HD 151860	A2 SrEu	7050	4.5	4.5	2.5
HD 177765	A2 SrEu	8000	3.8	2.5	3.55
HD 178892	Ap SrCrEu	7700	4.0	10.0	18.5*
HD 185204	A2 SrEuCr	7750	4.4	4.5	5.4
HD 185256	F0 SrEu	7150	4.3	5.5	≤1.4 <sup>*</sup>

В столбцах указано имя звезды, спектральная классификация в соответствие с [1], определенные эффективная температура  $T_{eff}$ , ускорение силы тяжести logg, проекция скорости вращения на луч зрения  $v_e \sin i$  и модуль среднего значения магнитного поля  $\langle B \rangle$ . Звездочкой отмечены значения магнитных полей, определенные с помощью модельного синтетического спектра.

#### 3.1. HD 177765

До настоящего времени мало что было известно про звезду HD 177765. Эта звезда была классифицирована как A5 SrEuCr [1], фотометрические наблюдения в течение двух ночей не обнаружили наличие пульсаций [26]. В работе [42] определена эффективная температура  $T_{eff} = 8060$  K, а в последующей работе [43] из зеемановского расщепления линии железа Fe II 6149.2 Å определено магнитное поле. Модуль среднего магнитного поля этой звезды оставался постоянным  $\langle B \rangle = 3.4$  kG с разбросом 20 G в течение около двух лет наблюдений. Это предполагает наличие очень длинного периода вращения у этой звезды.

Эффективная температура и ускорение силы тяжести. Учитывая высокую металличность, полученную из фотометрии Strömgren, и, как будет показано ниже, сходство среднего химического состава звезд HD 177765 и гоАр  $\beta$ CrB, был произведен расчет моделей атмосфер звезды HD 177765 с использованием программы LLMODELS [44], которая была апробирована для звезды  $\beta$ CrB. Определение фундаментальных параметров HD 177765 было проведено с помощью анализа профиля водородной линии в диапазоне  $T_{eff} =$ 7800 – 8200 K и log*g* = 3.5 – 4.0. Расчеты производились с помощью программы SYNTHV [3]. Наилучшее согласие наблюдаемого профиля с теоретическим было получено при  $T_{eff} =$  8000 K и log *g* = 3.8 (Рис. 8).

Магнитное поле. Для моделирования частично разрешенных линий разных химических элементов была использована программа расчета синтетических спектров SYNTHMAG [4], которая учитывает наличие Проведенный магнитного поля. анализ показал, что ДЛЯ описания спектральных линий ионов железного пика и редкоземельных ионов необходимо учитывать сложную конфигурацию магнитного поля звезды. Для аппроксимации линий редкоземельных ионов силовые линии магнитного поля должны быть ориентированы параллельно звездной поверхности, а линии железного пика требуют учета вклада радиального магнитного поля.



Рис. 8. Наблюдаемый профиль водородной линии Нα звезды HD 177765 (черная линия) и синтетический профиль (красная линия), вычисленный с помощью программы SYNTHV с параметрами T<sub>eff</sub> = 8000 K и logg = 3.8.

Из разделенных зеемановских компонентов линии Fe II 6149.26 Å в усредненном спектре нами было определено значение магнитного поля  $\langle B \rangle = 3550 \pm 100$  G. Эта величина выше, чем приведенная в работе [43]  $\langle B \rangle = 3413 \pm 19$ G.

Проекция скорости вращения. Из-за комбинированного эффекта магнитного поля и, возможно, химической стратификации в атмосфере звезды HD 177765 трудно получить точное значения проекции скорости вращения на луч зрения. Как правило для этого используется сильная магнитонечувствительная линия Fe I 5434.52 Å, однако она может быть уширена из-за вертикальной стратификации химических элементов. Поэтому проекция скорости вращения на луч зрения равная  $v_e \sin i = 2.2 - 2.7$  км/с была определена из сравнения наблюдаемого профиля более слабой магнитонечувствительная линии Fe II 6586.7 Å с синтетическим спектром, а также из сравнения частично разрешаемых зеемановских компонент других слабых линий ионов.

**Частотный анализ.** Как показал частотный анализ лучевых скоростей ядра линии H $\alpha$ , а также линий ионов Eu II, Gd II, и Ce II, наблюдается пульсационная переменность (FAP < 10<sup>-5</sup>) лучевых скоростей. Амплитуда лучевых скоростей достигает 150 м/с для линии H $\alpha$  и 40-60 м/с для линий редкоземельных ионов. При этом периоды колебаний для редкоземельных элементов составляют 22.85 ± 0.39 мин (Eu), 23.50 ± 0.26 мин (Ce), 23.85 ± 0.27 мин (Gd), а для ядра линии водорода 24.05 ± 0.51 мин (H $\alpha$ ). Усредненный пульсационный период составляет 23.56 ± 0.16 мин, что соответствует частоте  $v = 0.707 \pm 0.005$  mHz. Данная частота является самой маленькой частотой, обнаруженной у гоАр звезд. Этот период был принят для дальнейшего анализа лучевых скоростей линий ионов остальных химических элементов при аппроксимации косинусоидой методом наименьших квадратов.

Анализ спектральных линий других ионов также показывает переменность ( $10^{-5}$  < FAP <  $10^{-3}$ ) в диапазоне периодов 23–24 мин с амплитудой 10 – 130 м/с. Одиночная линия Eu III 6666 Å показывает самую большую амплитуду среди всех линий металлов. Были также обнаружены изменения в линиях ионов Ba II, Yb II и Fe I. При анализе усредненных кривых лучевых скоростей 62 линий ионов нейтрального железа были обнаружены пульсации с амплитудой 7.4 м/с. В тоже время, кривая лучевых скоростей, полученная усреднением измерений по 21 линии ионизированного железа, не показывает никакой переменности.

Обнаруженное смещение фазы колебаний  $\varphi$  (Таблица 4) около 0.1 кривых лучевых скоростей для разных ионов, по-видимому, связано с их различной глубиной формирования.

HD 177765, P = 23.56 ± 0.16 мин					
Ион	N	$A (m s^{-1})$	φ	FAP	
Gd II	29	61.4±3.7	0.99±0.01	2.7e-8	
Ce II	40	36.7±2.2	0.98±0.01	2.6e-8	
Нα	1	148.0±14.8	0.91±0.02	2.1e-7	
Eu II	3	43.3±4.1	0.99±0.02	8.7e-7	
Ba II	3	19.6±2.3	0.08±0.02	1.7e-5	
Yb II	3	31.3±4.3	0.01±0.02	1.2e-4	
Fe I	62	7.4±1.1	0.12±0.02	1.7e-4	
Ce III	2	65.0±12.1	0.88±0.03	2.8e-4	
Ti I + Ti II	12	8.8±1.7	0.06±0.03	5.3e-3	
Eu III	1	128.8±28.5	0.06±0.03	3.0e-2	
Ca I + Ca II	10	4.2±2.0	0.01±0.07	9.0e-2	
Fe II	21	3.8±1.7	0.10±0.07	2.5e-1	
La II	13	13.7±9.0	0.01±0.10	7.4e-1	

Таблица 4. Результаты анализа временного ряда разных ионов химических элементов для спектров звезды HD 177765.

Примечание - В колонках приведен тип ионов, количество спектральных линий ионов N, амплитуда A и нормированная на период колебаний фаза  $\varphi$ . Последняя колонка указывает FAP для наибольшего пика в амплитудном спектре.

Многие гоАр звезды показывают высокоамплитудные пульсации в линиях первых и вторых ионов Nd и Pr [14]. Линии Nd III и Pr III в спектре звезды HD 177765 относительно слабы и сильно блендированы, в отличие от типичных гоАр звезд, где эти линии являются одними из сильнейших линий ионов [5]. Линии первых и вторых ионов Nd и Pr в спектре звезды HD177765

не показывают пульсационных изменений, вероятно, из-за блендирования линиями железного пика. Текущие результаты показывают отсутствие пульсационных изменений в этих блендированных линиях с верхним пределом 15–20 м/с. Также не была обнаружена переменность в линиях Са I/II, La II, Cr I/II и Y II. Минимальный сигнал на нужной частоте может присутствовать в линиях нейтрального и ионизированного Ti.



Рис. 9. Усредненная кривая лучевых скоростей (вверху) и амплитудный спектр (снизу) для иона Се II звезды HD 177765.

Кривые лучевых скоростей и амплитудные спектры Се II показаны на Рис. 9. Аналогичные зависимости для ионов Ва II, Eu II, Fe I, Gd II, и ядра профиля водородной ЛИНИИ приведены В Приложении. Результаты аппроксимации периодических зависимостей косинусоидой методом наименьших квадратов с фиксированным периодом представлен в Таблице 4. В Таблице 4 также дана информация о вероятности ложного сигнала (FAP).

Короткое время наблюдения звезды HD177765 позволило покрыть только три пульсационных цикла. Этого наблюдательного времени при имеющемся показателе сигнала к шуму недостаточно для проведения очень точного частотного анализа и оценки возможного наличия других частот. Тем не менее, было отмечено систематическое отклонение средних кривых лучевых скоростей Ce II, Gd II, и ядра На от моно-периодичного решения наименьших квадратов. Все эти три элемента показывают большую амплитуду временной BO второй половине серии, показывает наличие что дополнительных пульсационных частот. Наше предположение было подтверждено нахождением при более детальном частотном анализе в работе [45].

**Химический состав.** Предварительная оценка химического состава звезды HD177765 была проведена с помощью метода, описанного в разделе 2.4.3. Для проверки правильности вычислений, с помощью программы SYNTHMAG был смоделирован спектр, который включал в себя 18 линий иона Fe I и 33 линий иона Fe II. С помощью подгонки профилей синтетических и наблюдаемых линий, было получено содержание  $\log(N_{Fe}/N_{tot}) = -3.40 \pm 0.22$ по линиям ионов Fe I и  $\log(N_{Fe}/N_{tot}) = -3.25 \pm 0.32$  по линиям ионов Fe II. Относительное содержание железа, определенное с помощью программы WIDTHMF, составленной Цымбалом В. В., составляет  $\log(N_{Fe}/N_{tot}) = -3.65 \pm$ 0.33 по линиям ионов Fe I и  $\log(N_{Fe}/N_{tot}) = -3.40 \pm 0.40$  по линиям ионов Fe II. Так как результаты вычислений с помощью программы SYNTHMAG и WIDTHMF в пределах ошибки не различаются, содержание всех остальных химических элементов было определено с помощью программы WIDTHMF.

Исследование индивидуальных линий иона Fe II показывает сильную зависимость содержания от вероятности перехода и энергии созбуждения верхних уровней. Данное свойство интерпретируется как свидетельство вертикальной химической стратификации, которая является общим феноменом для гоАр звезд.

Атомные параметры для определения химического состава были взяты из VALD [37], а также базы данных DREAM для редкоземельных элементов [46], интегрированную в VALD. Для линий иона Fe II предпочтение было отдано однородному набору [47], с дополненными данными из работы [48], для линий ионов высокого возбуждения. Содержание европия было получено из анализа линий иона Eu II при сравнении наблюдаемого и синтетического спектров.

Синтетический спектр учитывал при этом магнитные эффекты, изотопический состав и сверхтонкое расщепление. Соответствующие атомные данные были использованы из работы [49]. Параметры линии Eu III 6666.3 Å были приняты из работы [50]. Суммарная оценка химического состава звезды HD 177765 приведена в Таблице 5. В последней колонке приводится для сравнения химический состав хорошо изученной гоАр звезды  $\beta$ CrB [14]. В работе отсутствуют данные по содержанию Се III и Еи III. Мы оценили содержание этих элементов с использованием той же самой модели атмосферы на основе тех же наблюдений, как и в работе [14]. Сравнение содержаний указывает на близость химического состава звезд. Разница между содержаниями Pr и Nd в первой и второй стадии ионизации у этих звезд составляет около одного порядка. Подобная особенность не характерна для большинства гоАр звезд, где эта аномалия составляет 1.5-2 порядка [5]. Однако, для обеих звезд наблюдается другая аномалия в элементах Се и Еи. Возможно, это связано с тем, что обе звезды имеют более длинные пульсационные периоды P = 16.2 мин ( $\beta$ CrB) и P = 23.5 мин (HD 177765), чем звезды с PrNd аномалией, и, соответственно, более продвинутую стадию эволюции.

Таблица 5. Химический состав звезды HD 177765. Ошибки измерений основаны на стандартном отклонении химического состава, определенном по N линиям.

Ion	$\log(N_{el}/N_{tot})$	Ν	βCrB	Ion	$\log(N_{el}/N_{tot})$	Ν	βCrB
СІ	-3.70	1		Sr I	$-5.47 \pm 0.05$	2	
Si I	$-3.63 \pm 0.23$	3		Y II	-8.44	1	
Si II	-3.56	1	-4.09	Zr II	-8.38	1	-8.39
Ca I	$-4.64 \pm 0.43$	6	-5.10	La II	$-8.60 \pm 0.44$	3	-8.35
Ca II	-4.22	1		Ce II	$-7.01 \pm 0.36$	72	-7.84
Ti I	$-5.94\pm0.24$	2		Ce III	$-5.49 \pm 0.09$	4	-5.65
Ti II	$-6.48 \pm 0.19$	6	-5.86	Pr II	-9.54	1	-9.26
Cr I	$-4.18 \pm 0.51$	10	-4.60	Pr III	-8.69	1	-9.35
Cr II	$-4.36\pm0.35$	24	-4.68	Nd II	$-9.40 \pm 0.22$	2	-9.17
Mn I	$-5.07 \pm 0.04$	3		Nd III	$-8.53 \pm 0.10$	3	-8.36
Mn II	-5.30	1	-5.02	Eu II	$-7.95 \pm 0.13$	3	-8.28
Fe I	$-3.40 \pm 0.22$	18	-3.92	Eu III	-6.20	1	-5.65
Fe II	$-3.25 \pm 0.32$	23	-3.66	Gd II	$-7.62 \pm 0.29$	7	-7.54
Co I	$-5.06 \pm 0.43$	4		Dy II	-6.90	1	
Ni I	$-6.35 \pm 0.27$	3	-5.41	Yb II	$-7.99 \pm 0.31$	6	

# 3.2. HD 132205

В каталоге [1] звезд HD 132205 классифицирована как холодная Ар звезда A2 EuSrCr. В работе [26] авторы наблюдали эту звезду с помощью фотометрии в фильтре *В* системы Джонсона в течение одного часа за одну ночь наблюдений и не нашли пульсационной переменности, превышающей

0.5 mmag в типичном для гоАр звезд диапазоне частот. Других известий об этом объекте в литературе не приводится.

Наблюдательный материал звезды HD 132205 представлены одной временной серией из 50 спектров UVES. Проведенный нами анализ этих данных достаточно четко показывает переменность лучевой скорости в линиях многих ионов редкоземельных химических элементов и в ядре профиля водородной линии H $\alpha$ . В качестве примера приводим амплитудный спектр ионов Ce II, Nd III и H $\alpha$  (Puc. 10).



Рис. 10. Амплитудные спектры звезды HD 132205.

Видно, что характерные частоты линий редкоземельных ионов лежат в диапазоне, свойственном гоАр звездам. Это позволяет нам отождествить звезду HD 132205 как новую гоАр. На этом рисунке также видно отсутствие явной переменности в линиях Fe I, подтверждая тем самым, что осцилляции, обнаруженные в линиях REE, не являются инструментальным эффектом.

Используя результаты частотного анализа линий ионов Ce II, Gd II, Nd III и Pr III, был определен средний пульсационный период P =  $7.140 \pm 0.021$  мин. Амплитуды и фазы средних кривых лучевых скоростей разных ионов приведены в Таблице 6. Максимальные амплитуды осцилляций достигают 100 м/с для Ce II, Sm II и ядра профиля водородной линии H $\alpha$ . Пульсационные фазы различных групп переменных спектральных линий ионов отличаются незначительно.

Сравнение усредненного спектра звезды с синтетическим спектром для магнитонечувствительных спектральных линий ионов позволяет найти проекцию скорости вращения на луч зрения  $v_e \sin i = 9.5$  км/с. Такое значение скорости вращения звезды HD 132205 слишком велико и не позволяет провести прямое определение магнитного поля по расщеплению спектральных линий. Оценка магнитного поля была проведена путем аппроксимации линии железа Fe I 6336.8 Å и было получено значения магнитного поля <B>= 5.2 kG.

HD 132205, $P = 7.14 \pm 0.02$ мин					
Ион	N	$A (m s^{-1})$	φ	FAP	
Ce II	10	95.7±8.0	0.92±0.03	3.2E-7	
Nd III	7	44.8±4.2	0.04±0.03	1.1E-6	
Pr III	6	51.7±5.7	0.93±0.04	7.1E-6	
Gd II	13	45.8±5.8	$0.04{\pm}0.04$	3.2E-5	
Sm II	5	97.4±13.9	0.04±0.03	1.4E-4	
Tb III	4	75.7±12.1	0.99±0.05	5.3E-4	
Dy III	4	76.4±12.2	0.99±0.05	6.2E-4	
Ηα	1	90.5±15.6	0.83±0.05	1.4E-3	
Nd II	20	37.8±6.9	$0.98{\pm}0.06$	3.1E-3	
Er II	3	58.2±10.9	$0.02{\pm}0.06$	4.2E-3	
Fe I	29	11.1±2.9		1.7E-1	
Fe II	12	12.4±4.1		6.0E-1	

Таблица 6. Результаты частотного анализа звезды HD 132205.

Примечание - В колонках приведены те же самые обозначения, что и в Таблице 5.

#### 3.3. HD 148593

Звезда HD 148593 является еще одной холодной Ар звездой, для которой практически нет доступной информации в литературе. В работе [1] авторы дали спектральную классификацию этого объекта как A2 Sr. Другие авторы при поиске осцилляций не смогли обнаружить пульсационную переменность в течение 0.65 ч мониторинга за одну ночь наблюдений [26]. В работе [51] автор не нашел вращательной фотометрической модуляции, основываясь на наблюдениях спутника STEREO.

Обработанные нами данные, полученные на спектрографе UVES, звезды HD 148593 включают 50 высококачественных спектров. Измерения и анализ лучевых скоростей показали убедительные доказательства наличия слабых пульсаций в нескольких линиях ионов REE. Таким образом, звезда HD 148593 определенно является гоАр звездой. Наиболее существенные амплитуды достигаются в линиях Nd II, Sm II, Nd III и Gd II. Используя два самых значимых иона (Nd II и Sm II) был определен средний период  $P = 10.690 \pm 0.081$  мин. Амплитудные спектры Nd II и Sm II приведены на Рис. 11 в сравнении с измерениями квазипостоянной линии Fe I.



Рис. 11. Амплитудные спектры звезды HD 148593

Сложная форма кривых лучевых скоростей редкоземельных элементов, особенно для Sm II, предполагает наличие мультипериодических осцилляций, которые не могут быть разрешены данной короткой временной серией. Характеристики средних кривых лучевых скоростей приведены в Таблице 7. Все амплитуды лучевых скоростей лежат в диапазоне 20–50 м/с. Явные различия в пульсационных фазах для переменных спектральных линий ионов отсутствуют.

Для определения проекции скорости вращения на луч зрения была использована традиционная магнитонечувствительная линия Fe I. Эта скорость равна  $v_e \sin i = 5$  км/с.

Зеемановское расщепление линий в спектре звезды HD 148593 не разрешимо, но магнитное поле, вероятно, присутствует. Используя программу расчета магнитных синтетических спектров SYNTHMAG была произведена оценка величины магнитного поля для линий железа с большим фактором Ланде. Это значение составляет  $\langle B \rangle = 3.0$  kG.

HD 148593, $P = 10.69 \pm 0.08$ мин					
Ион	N	A (m s <sup>-1</sup> )	φ	FAP	
Nd II	36	45.3±5.5	0.21±0.04	2.3E-5	
Sm II	16	47.2±6.1	0.24±0.04	4.5E-5	
Nd III	12	23.8±4.1	0.31±0.05	1.5E-3	
Gd II	23	27.8±4.9	0.32±0.05	1.9E-3	
Fe I	62	7.3±2.3		4.4E-1	
Fe II	18	9.3±2.9		4.6E-1	

Таблица 7. Результаты частотного анализа звезды HD 148593.

Примечание - В колонках приведены те же самые обозначения, что и в Таблице 5.

#### 3.4. HD 151860

Также, как и для трех предыдущих объектов, не много известно про A2 SrEu [1] звезду HD 151860. Она наблюдалась в нескольких фотометрических исследованиях Ap звезд [52,53,54] и была исследована на предмет наличия пульсации в работе [26]. Авторы не смогли найти фотометрическую переменность больше, чем 0.5mmag в течение 0.73 ч наблюдений одиночной ночи и, как следствие, классифицировали данную звезду как не пульсирующую (noAp).

Проведенный нами анализ 50 спектров звезды HD 151860, полученных на спектрографе UVES, показал пульсационную переменность в линиях нескольких редкоземельных ионах, что позволяет также отнести данную звезду как roAp. Амплитудные спектры La II, Tb III и Eu II представлены на Рис. 12. Для сравнения приведен амплитудный спектр линии Fe I, который осцилляций. Самый высокий пик демонстрирует отсутствие явных достигается на частоте около 1.35 mHz для всех редкоземельных ионов. В тоже время несколько других пиков присутствуют на более низких частотах. Вероятнее всего, что этот объект является мульти-периодической гоАр звездой. Усредненный пульсационный период P = 12.304 ± 0.086 мин был получен из периодов линий ионов La II, Tb III и Eu II.

Все амплитуды лучевых скоростей лежат ниже 50 м/с, кроме Тb III, для которого амплитуда достигает 84 м/с. Пульсационные фазы существенно отличаются между кривыми лучевых скоростей ионов редкоземельных элементов. Средняя кривая лучевых скоростей Dy III показывает наибольшее отклонение, отставая на ~0.3 пульсационных периода от других ионов. Результаты частотного анализа для ионов, чей FAP достаточно мал для отождествления периодической зависимости, представлены в Таблице 8.

HD 151860, $P = 12.30 \pm 0.09$ мин					
Ион	N	<i>A</i> (m s <sup>-1</sup> )	φ	FAP	
Tb III	5	83.7±9.5	0.66±0.04	1.0E-5	
Eu II	3	45.7±5.3	0.42±0.04	1.2E-5	
La II	25	23.5±3.1	0.50±0.04	5.0E-5	
Dy III	3	49.8±9.2	0.20±0.06	3.5E-3	
Fe I	61	7.1±1.8		1.3E-1	
Fe II	20	8.7±2.7		3.8E-1	

Таблица 8. Результаты частотного анализа звезды HD 151860.

Примечание - В колонках приведены те же самые обозначения, что и в Таблице 5.



Рис. 12. Амплитудные спектры звезды HD 151860.

Проекция скорости вращения на луч зрения была определена по линии железа Fe I 5434.5 Å и составляет  $v_e \sin i = 4.5$  км/с. Анализ с помощью синтетического спектра магниточувствительных линий показал наличие небольшого магнитного поля  $\langle B \rangle$  около 2.5 kG.

# 3.5. HD 119027

Зведа HD 119027 классифицирована как A3 SrEu [1], ее фотометрическая переменность была открыта в работе [6], в которой было обнаружено пять частот с интервалом между ними 26 µHz возле пульсационного периода 8.8 Последующие исследование [55] обнаружило МИН. наличие ДВУХ дополнительных частот, но не смогло однозначно подтвердить шаг частот, определенный В предыдущем исследовании. Используя усредненные фотометрические наблюдения, полученные в течении 45 индивидуальных ночей, не была найдена вращательная фотометрическая переменность звезды HD 119027 [56]. Было предположено, что период вращения может превышать 6 месяцев, либо звезда видна с полюса. В работе [43] обнаружено наличие в спектре звезды HD 119027 лини Fe II 6149 Å, расщепленной магнитным полем, что позволило измерить модуль среднего поля, равный  $\langle B \rangle = 3.16 \text{ kG}$ . Авторы предполагают слабую переменность  $\langle B \rangle$  в течение нескольких недель.

Для нашего исследования звезды HD 119027 использовались две группы спектров UVES, каждая из которых содержит по 50 спектров. Промежуток, между двумя сериями наблюдений, составлял 11 ночей. В результате анализа этих двух серий наблюдений была найдена четкая переменность лучевых скоростей. Самая уверенная идентификация пульсаций была найдена для линий таких ионов как Nd III, Nd II, Ce II, Pr III и Sm II. Максимальные амплитуды пульсаций наблюдаются в кривых лучевых скоростей ионов Nd II, Ce II, Sm II и Dy III и достигают 120 м/с. Амплитудные спектры Nd III, Nd II и Ce II приведены на Рис. 13 и 14 для первого и второго временного ряда наблюдений, соответственно. Соответствующие полученные значения

средних пульсационных периодов составляют  $P_1 = 8.627 \pm 0.016$  мин и  $P_2 = 8.757 \pm 0.012$  мин. Расхождение между периодами двух серий наблюдений (Табл. 9 и 10) и небольшое различие амплитудных спектров (Рис. 13 и 14), вероятно, объясняется биением соседних частот, которые не разрешимы при коротких временных сериях наблюдений.



Рис. 13. Амплитудные спектры звезды HD 119027. Первая серия.



Рис. 14. Амплитудные спектры звезды HD 119027. Вторая серия.

HD 119027 <sup>1</sup> , $P = 8.63 \pm 0.02$ мин					
Ион	N	$A (m s^{-1})$	φ	FAP	
Nd II	37	100.8±4.9	0.70±0.02	9.0E-9	
Ce II	30	97.6±4.9	$0.76 \pm 0.02$	1.3E-8	
Nd III	16	70.0±4.6	$0.64{\pm}0.02$	4.7E-8	
Pr III	9	66.2±4.9	0.46±0.02	1.2E-7	

Таблица 9. Результаты частотного анализа звезды HD 119027. Первая серия.

Продолжение Таблицы 9.

Ион	N	$A (m s^{-1})$	arphi	FAP
Sm II	8	113.6±10.4	0.80±0.03	8.5E-7
La II	28	33.6±5.7	$0.00{\pm}0.05$	1.4E-3
Dy III	4	107.2±18.4	$0.77 {\pm} 0.05$	1.8E-3
Gd II	11	74.4±13.0	0.72±0.05	2.0E-3
Fe I	43	12.2±3.8		4.3E-1
Fe II	11	19.2±7.8		9.6E-1

Примечание - В колонках приведены те же самые обозначения, что и в Таблице 5.

HD 119027 <sup>2</sup> , $P = 8.76 \pm 0.01$ мин					
Ион	N	$A (m s^{-1})$	φ	FAP	
Nd III	16	97.8±6.3	0.21±0.02	4.6E-8	
Nd II	32	118.7±8.8	0.26±0.02	1.0E-7	
Ce II	31	74.7±7.1	0.39±0.03	1.2E-6	
Pr III	7	77.0±7.5	0.94±0.03	1.5E-6	
Sm II	9	136.1±14.9	0.38±0.03	6.1E-6	
Dy III	4	148.0±23.7	0.33±0.05	6.2E-4	
Gd II	10	74.14±13.2	0.48±0.06	1.0E-2	
La II	26	29.7±7.3	0.33±0.08	9.6E-2	
Fe I	35	16.5±4.8		2.8E-1	
Fe II	6	23.9±8.3		7.1E-1	

Таблица 10. Результаты частотного анализа звезды HD 119027. Вторая серия

Примечание - В колонках приведены те же самые обозначения, что и в Таблице 5.

Звезда HD 119027 показывает большой разброс пульсационных фаз для линий ионов разных редкоземельных элементов. Особенно интересно поведение Pr III, который имеет максимальную задержку фазы по сравнению с другими ионами. Это может означать наличие бегущей волны в химически стратифицированной атмосфере аналогичной той, которая была найдена в звездах HD 24712[57] и 10 Aql [58].

Обнаружено, что для обеих серий измерений наблюдается одинаковый модуль магнитного поля  $\langle B \rangle = 3.14$  kG. Магнитная переменность в усредненных спектрах не была обнаружена между двумя временными рядами наблюдений, промежуток между которыми 11 дней. Проекция скорости вращения звезды на луч зрения в обоих случаях составляет  $v_e \sin i = 4$  км/с.

# 3.6. HD 185256

Звезда HD 185256 является второй известной гоАр звездой в текущей выборке, которая была определена фотометрическими методами. Вначале она была классифицирована как F0 SrEu [1] и, затем, определена как быстро пульсирующая гоАр в работе [7]. Основываясь на фотометрическом мониторинге в фильтре В системы Джонсона, данные авторы нашли пульсации с периодом 10.2 мин и амплитудой 1.6 mmag. Кроме краткого упоминания в работе [7], пульсационный анализ звезды HD 185256 нигде не был опубликован. Продольная компонента магнитного поля  $\langle B_z \rangle = -706 \pm 180$  G была измерена в работе [59].

Анализ обработанных нами UVES спектров звезды HD 185256 показал быструю переменность лучевых скоростей в линиях REE (см. Рис. 15). В тоже время, в линиях Fe I не были обнаружены явные периодические изменения. Незначительный пульсационный сигнал был обнаружен в линиях Nd II и ядре H $\alpha$ . Найденные лучевые скорости пульсаций в звезде HD 185256 типичны для многих гоАр звезд. Период пульсаций P = 10.333 ±0.029 мин был определен

усреднением периодов линий ионов Ce II, Pr III, Nd III, Sm II, Tb III и Dy III. Амплитуды осцилляций изменяются между 80 и 250 м/с. Максимальные амплитуды обнаруживают линии Dy III и Tb III.



Рис. 15. Амплитудные спектры звезды HD 185256.

HD 185256, $P = 10.33 \pm 0.03$ мин					
Ион	N	<i>A</i> (m s <sup>-1</sup> )	φ	FAP	
Ce II	7	133.3±11.7	0.71±0.03	5.1E-7	
Nd III	5	99.1±9.0	0.60±0.03	7.6E-7	
Sm II	4	126.7±12.1	0.81±0.03	1.5E-6	
Tb III	5	245.2±23.8	0.35±0.03	1.5E-6	
Dy III	3	247.0±29.0	0.70±0.03	1.1E-5	
Pr III	4	80.7±11.3	0.51±0.05	1.2E-4	
Ηα	1	129.8±28.9	0.85±0.07	2.7E-2	
Nd II	4	118.8±26.8	0.67±0.07	2.8E-2	
Fe I	58	8.9±3.1		6.8E-1	
Fe II	13	26.4±8.1		5.2E-2	

Таблица 11. Результаты частотного анализа звезды HD 185256.

Примечание - В колонках приведены те же самые обозначения, что и в Таблице 5.

Изменение фазы максимума лучевых скоростей в зависимости от принадлежности тому или иному иону свойственно гоАр звездам [14]. Последовательность пульсационных фаз с максимумом лучевых скоростей обычно меняются от однократно ионизованных ионах линий REE и ядра профиля водородной линии Нα и растут в дважды ионизованных ионах линий REE. Отношение амплитуда-фаза для звезды HD 185256 близка зависимости у другой гоАр звездой, 10 Aql [58].

Проекция скорости вращения на луч зрения звезды HD 185256  $v_{e}\sin i = 5.5$  км/с была определена по линии железа Fe I 5434 Å.

Модуль среднего магнитного поля  $\langle B \rangle \leq 1.4$  kG получен из сравнения с синтетическим спектром линии Fe II 6149 Å. Звезда HD 185256 показывает

свойственные гоАр звездам химические аномалии и наличие вертикальной стратификации химических элементов в атмосфере [].

# 3.7. HD 69013

Наличие осцилляций в A2 SrEu [1] звезде HD 69013 было обнаружено в работах [25] и [26]. Основываясь на нескольких двенадцатичасовых сериях наблюдений, не были найдены пульсации с амплитудами, превышающие 0.6 - 1 mmag, основываясь на нескольких 1-2 часовой фотометрических временных сериях. Спектр высокого разрешения звезды HD 69013, полученный в работе [31], показал магнитное расщепление линий, соответствующие  $\langle B \rangle = 4.8$  kG. Спектр звезды HD 69013 является типичным для гоАр звезд.

По двум коротким временным сериям спектроскопических наблюдений, авторы работы [8] нашли переменность лучевых скоростей с амплитудами в индивидуальных спектральных линиях ионов REE до 200 м/с и периодом 11.4 мин. Последующие фотометрические наблюдения, которые также были опубликованы в работе [8], предполагают наличие переменности блеска со схожим периодом.

Используемый в нашей работе набор из 62 спектров звезды HD 69013 показывает однозначное свидетельство пульсаций в линиях нескольких ионах REE (см. Рис. 16) Амплитуды лучевых скоростей составляют порядка 100 м/с или меньше. Наиболее существенные колебательные сигналы найдены в линиях Nd II, Nd III и Pr III. Наша точность определения амплитуды гораздо выше, чем в исследовании [8].

Используя средние кривые лучевых скоростей этих линий ионов REE, нами был определен средний пульсационный период  $P = 11.218 \pm 0.032$  мин. Амплитуды, фазы, количество использованных линий ионов, а также достоверность сигнала FAP представлена в Табл. 12. Кривые лучевых скоростей показывают заметный фазовый сдвиг, который свойственен гоAp звездам и, скорее всего, говорит о бегущей волне в слоистой атмосфере. Этот порядок предположительно отражает относительные высоты формирования линий этих ионов. Максимум лучевой скорости вначале достиг для Nd II, далее Nd III и затем Pr III. Этот порядок предположительно отражает относительные высоты формирований линий этих ионов.

Используя магнитонечувствительную линию Fe I была измерена проекция скорости вращения на луч зрения  $v_e \sin i = 3$  км/с. Расщепление линии Fe II 6149 Å указывает на модуль среднего поля  $\langle B \rangle = 4.8$  kG. Параметры проекции скорости вращения и значение магнитного поля находятся в хорошем соответствии с результатами работы [31].



Рис. 16. Амплитудные спектры звезды HD 69013.

HD 69013, $P = 11.22 \pm 0.03$ мин					
Ион	N	$A (\mathrm{m} \mathrm{s}^{-1})$	φ	FAP	
Pr III	9	73.0±4.6	$0.88{\pm}0.02$	8.0E-10	
Nd III	13	97.3±6.6	0.94±0.02	1.6E-9	
Nd II	19	118.9±8.4	0.06±0.02	2.4E-9	
Er II	2	132.8±29.2	0.92±0.07	3.0E-2	
Eu II	2	60.6±14.6	0.22±0.07	5.5E-2	
Fe I	28	17.0±4.7		2.3E-1	
Fe II	7	54.4±13.6		1.2E-1	

Таблица 12. Результаты частотного анализа звезды HD 69013.

Примечание - В колонках приведены те же самые обозначения, что и в Таблице 5.

# 3.8. HD 96237

Фотометрический поиск пульсаций в A4 SrEuCr звезде [1] был проведен авторами [25]. Основываясь на 2х часовых наблюдениях, они получили верхний предел 0.5 mmag возможных быстрых осцилляций. Авторы работы [60] отнесли этот объект к не пульсирующим при их изучении положения на H-R диаграмме и кинематики холодных Ар звезд. Зеемановское расщепление линий было определено в работе [31], показывающее среднее магнитное поле  $\langle B \rangle = 2 - 3$  kG. Также в этой работе была замечена сильная спектральная переменность этой звезды. Данные авторы определили период вращения P = 20.91 д. из архивных наземных и космических фотометрических измерений. Анализируя набор из 32 спектров с высоким временным разрешением, были найдены незначительные доказательства переменности лучевых скоростей с периодом  $\approx$  14 мин и амплитудами до 100 м/с в спектральных линиях REE [8]. Обработанные нами 50 UVES спектров звезды HD 96237 показали очень четкие пульсационные сигналы в разных линиях ионов REE и в ядре Hα (см Puc. 17). Амплитуды лучевых скоростей линий ионов достигают 100 м/с для большинства линий ионов REE, а также 290 м/с для ядра линии Hα.

Средний период  $P = 13.866 \pm 0.036$  мин, полученный из измерения периода по линиям ионов Ce II, Tm II, Nd II, Nd III, Tb III и Dy III, находится в согласии с предыдущим исследованием. Однако, текущее определение периода дает значение в 2-3 раза лучше, чем в предыдущем исследовании. Основные результаты частотного анализа звезды HD 96237, представлены в Табл. 13.



Рис. 17. Амплитудные спектры звезды HD 96237

HD 96237, $P = 13.89 \pm 0.04$ мин						
Ион	N	$A (\mathrm{m \ s^{-1}})$	φ	FAP		
Nd III	19	142.0±5.1	0.62±0.02	2.9E-9		
Tb III	7	185.1±9.9	0.52±0.02	1.4E-8		
Nd II	8	148.9±10.1	$0.72{\pm}0.02$	6.1E-8		
Ce II	25	61.8±5.7	0.71±0.03	9.0E-7		
Tm II	3	110.8±12.2	0.71±0.03	6.2E-6		
Sm II	10	91.1±11.0	0.79±0.04	1.9E-5		
Ηα	1	288.1±32.0	0.71±0.03	2.2E-5		
Pr III	2	90.9±13.6	0.61±0.05	2.8E-4		
Er III	2	103.6±15.9	0.75±0.05	3.5E-4		
Dy II	2	112.9±18.9	0.63±0.05	1.0E-3		
Er II	3	87.7±14.8	0.75±0.05	1.3E-3		
Fe I	45	13.7±2.7		8.4E-2		
Fe II	3	13.9±3.8		1.3E-1		

Таблица 13. Результаты частотного анализа звезды HD 96237.

Примечание - В колонках приведены те же самые обозначения, что и в Таблице 5.

Анализ методом наименьших квадратов показывает значительное отличие в фазах кривых лучевых скоростей разных групп линий ионов. Среди данных измерений с FAP  $\leq 10^{-4}$ , наибольшая фаза (в сравнении с ранними пульсационными максимумами) была найдена для линии водорода H $\alpha$  и линии первых ионов REEs. С другой стороны, Nd III и Tb III показывают более поздний максимум, что предполагает формирование этих линий в более высоких слоях атмосферы.

Используя аппроксимацию с помощью смоделированного синтетического спектра, были получены значения проекции скорости

вращения на луч зрения и значение магнитного поля  $v_e \sin i = 6$  км/с и  $\langle B \rangle = 2.9$  kG. Оба параметра согласуются с данными из работы [31].

#### 3.9. HD 143487

Этот объект является самой холодной звездой из нашей выборки. Он классифицирован как A2 SrEuCr [1], но имеет эффективную температуру около 7000 К в соответствии с текущим анализом. Фотометрический мониторинг в течение трех ночей наблюдений не обнаружил пульсации с амплитудами выше, чем  $\approx 0.5$ –1.0 mmag [26]. Первый спектральный мониторинг звезды HD 143487 [31] использовал малое количество спектров, полученных в течение 32 мин. В результате анализа обнаружены линии с магнитным расщеплением. Была предположена переменность лучевых скоростей с частотой порядка 2 mHz и поэтому звезда HD 143487 была идентифицирована как перспективный кандидат в roAp звезды. Дальнейшие спектроскопические исследования [61] включали три набора данных UVES, включающих 18-34 спектров. Была найдена переменность с амплитудой 30-60 м/с и периодом 8.8–10.0 мин. Эта короткая временная серия данных не позволила им определить главную пульсационную частоту с большей точностью и обнаружить другие частоты.

Наши обработанные данные спектрографа UVES для звезды HD 143487 содержат 62 спектра, полученных за 1.4 часа. Анализ этих спектров показывает явное наличие пульсаций в линиях Nd II, Nd III, Pr III и ядре профиля водородной линии H $\alpha$ . Линии REE металлов показывают амплитуды 20 – 30 м/с, а амплитуда ядра водородной линии достигает 100 м/с. Такие низкие амплитуды наряду с уверенным показателем FAP показывают хорошую точность наших измерений. Линии железа не показывают переменность. Усредненный период P = 9.631 ± 0.053 был определен с помощью усреднения из периодов линий ионов Nd II, Nd III и Pr III. С учетом неточностей в данном анализе, все группы линий показывают примерно одну и ту же пульсационную фазу.

Соответствующие амплитудные спектры представлен на Рис. 18. Основной пульсационный пик обнаружен с лучшим отношением сигнала к шуму, чем в работе [61].



Рис. 18. Амплитудные спектры звезды HD 143487.

Данный рисунок также показывает пульсационный сигнал на низких частотах с амплитудой  $\approx 20$  м/с и периодом  $\approx 42$  мин во всех переменных ионах и даже в средней кривой лучевых скоростей Fe I. Тщательный анализ показал,

что соответствующий пик, но с меньшей амплитудой, также присутствует в измерениях лучевых скоростей с меньшей амплитудой в теллурических линиях в области 6300 Å и 6900 Å. Поэтому, мы предполагаем, что этот низкочастотный сигнал скорее всего связан с инструментальным эффектом. Звезда HD 143487 является единственной звездой в нашей выборке, которая показывает данный артефакт.

HD 143487, <i>P</i> = 9.63 ± 0.05 мин				
Ион	N	$A (\mathrm{m} \mathrm{s}^{-1})$	φ	FAP
Nd II	30	29.8±3.8	$0.02{\pm}0.04$	9.1E-6
Pr III	4	30.1±4.6	0.95±0.05	1.6E-4
Nd III	12	25.4±4.3	0.08±0.05	7.4E-4
Ηα	1	109.2±19.0	0.90±0.06	9.3E-4
Ce II	10	22.18±4.0	0.01±0.06	1.5E-3
Se II	3	26.4±4.9	0.94±0.06	2.6E-3
Fe I	4	21.9±6.5		3.2E-1
Fe II	2	17.5±5.5		4.6E-1

Таблица 14. Результаты частотного анализа звезды HD 143487.

Примечание - В колонках приведены те же самые обозначения, что и в Таблице 5.

Используя несколько линий REE с триплетоподобным зеемановским расщеплением, было определено магнитное поле  $\langle B \rangle = 4.75 \pm 0.05$  kG, которое заметно превышает  $\langle B \rangle = 4.2$ –4.3 kG, найденное в работе [31]. Было замечено, что линия Fe II 6149 Å, на которой авторы частично основывали свои измерения магнитного поля, сильно блендирована в спектре звезды HD 143487 (см Рис 7) и не может обеспечивать реальную оценку магнитного
поля. С другой стороны, измеренное значение  $v_e \sin i = 1.5$  км/с находится в разумном согласии с их измерениями  $v_e \sin i = 2$  км/с.

#### 3.10. HD 5823

Звезда HD5823, классифицированная ранее как F2 SrEuCr [1], находится в области температур, занятой гоАр звездами на диаграмме H-R. Поиски пульсации в этом объекте проводились несколько раз с помощью фотометрических наземных исследований, но ни в работе [25], ни в работе [26] не смогли обнаружить пульсационной переменности. Эти авторы наблюдали звезду HD 5823 в течение трех различных ночей с верхним пределом обнаружения фотометрической переменности 0.5–1.0 mmag.

Проведенный нами анализ спектров UVES не выявил значимую периодическую переменность кривых лучевых скоростей. Как видно из Рис. 7, спектр звезды HD 5823 показывает относительно широкие спектральные линии по сравнению со спектрами других звезд нашей программы. Измеренное значение  $v_e \sin i = 13.5$  км/с было определено по магнитнонечувствительной линии Fe I. Интересно, что эта звезда также показывает довольно сильное магнитное поле  $\langle B \rangle = 8.5$  kG, которое было найдено из сравнения с синтетическим спектром. Линия Fe II 6149 Å указывает на то, что она частично расщеплена магнитным полем.

Из-за большой ширины спектральных линий звезды HD 5823 не удалось достичь той же точности в анализе лучевых скоростей, как и в других Ар звездах. Амплитудные спектры, полученные из средних кривых лучевых скоростей NdIII, Nd II и Ce II показаны на Рис. 19. Верхний предел обнаружения осцилляций лучевых скоростей у звезды HD 5823 достигает 100–200 м/с. Это означает, что низкоамплитудные, схожими с теми, что найдены в звездах HD132205, HD 148593 и HD 151860, могли быть легко упущены.



Рис. 19. Амплитудные спектры звезды HD 5823.

# 3.11. HD 178892

Эта Ap SrCrEu звезда обладает одним из сильнейших магнитных полей среди Ap звезд. Сильное продольное магнитное поле достигает 7.5 kG в максимуме [62]. В работе [36] было детально исследовано магнитное поле, построена модель атмосферы и проведен химический анализ этой звезды основываясь на высоко-разрешенных спектрах. Авторы измерили

 $\langle B \rangle = 17.1 - 18.0$  kG из расщепленных магнитным полем спектральных линий и определили период вращения 8.2478 д. из фотометрии ASAS. Подходящая дипольная модель магнитного поля предполагает угол наклона i = 37 и напряженность поля на полюсе  $B_p \approx 23$  kG. Анализ химического состава этой звезды показывает свойственные для гоАр звезд черты [36]. Основываясь на этих результатах, авторы предположили, что эта звезда может быть исследована на предмет быстрых осцилляций. Однако, до наших наблюдай не было проведено никакого фотометрического или спектроскопического мониторинга.

Для текущего анализа звезды HD 178892 было использовано 67 спектров, полученных на спектрографе UVES. Анализ быстрой спектральной переменности усложнился сильным магнитным расщеплением большинства линий. Для облегчения поиска пульсаций, спектральные линии выбирались с малым значением фактора Ланде. Несмотря на относительную высокую точность, достигнутую для средних кривых лучевых скоростей некоторых линий ионов REE, пульсации не были найдены. Амплитудные спектры Nd II, Nd III, Ce II и Cr II представлены на Рис. 20. Верхний предел обнаружения пульсаций лучевых скоростей составляет ~ 10 м/с в области частот, типичных для гоАр звезд. Это исключает присутствие пульсаций с амплитудами, сравнимыми с найденными в других гоАр звездах в нашем исследовании.

Оцененная проекция скорости вращения  $v_e \sin i = 10$  км/с находится в хорошем соответствии с найденным ранее значением  $v_e \sin i = 9 \pm 1$  км/с в работе [36]. Нами также было определено значение среднего магнитного поля  $\langle B \rangle = 18.5$  kG, что согласуется с измерениями в работе [36].



Рис. 20. Амплитудные спектры звезды HD 178892.

#### 3.12. HD 185204

Звезда HD185204 является еще одной слабо изученной холодной Ар звездой с явными химическими аномалиями и сильным магнитным полем. Она классифицирована как A2 SrEuCr [1] и была исследована на возможную пульсационную переменность в работе [26]. Полученные фотометрические наблюдения [26] за две ночи не показали осцилляций, превышающих ~1

mmag. В работе [63] авторы обнаружили в спектре звезды HD 185204 линии, расщепленным магнитным полем, и из спектров, полученных за две ночи наблюдений, они определили  $\langle B \rangle = 5.7 \pm 0.2$  kG и  $v_e \sin i = 4$  км/с. Также, авторы сообщили, что эта звезда является многообещающим объектом для поиска быстрых осцилляций.

Для текущего исследования было использовано два набора данных UVES, один с 38 и другой с 50 спектрами. Дальнейший анализ сфокусирован на последнем более длинном временном ряде. Так как в данной звезде спектральные линии узкие, то это позволяет нам измерить кривые лучевых скоростей линий ионов REE с хорошей точностью.

Проведя частотный анализ, на Рис. 21 нами проиллюстрированы амплитудные спектры для Nd III, Nd II, Ce II и Ca I. Нет никакого свидетельства пульсационной переменности с верхним пределом амплитуды лучевых скоростей 20–40 м/с. Анализ первого набора данных дал похожий результат, хотя точность измерений была немного хуже из-за меньшего количества спектров. Таким образом, спектроскопическим методом подтвержден статус звезды HD 185204 как непульсирующей поАр с достаточно хорошей точностью.

Определение модуля магнитного поля с помощью зеемановского расщепления дает значение  $\langle B \rangle = 5.4$  kG. В тоже время, проекция скорости вращения на луч зрения составляет  $v_e \sin i = 4.5$  км/с. Учитывая точность  $\sim 0.1$  kG для измерений магнитного поля, разница с измерениями магнитного поля в работе [63] существенна и, возможно, указывает на реальную переменность с большим периодом вращения.



Рис. 21. Амплитудные спектры звезды HD 185204.

# 3.13. ВЫВОДЫ

В данной главе был представлены результаты спектроскопического поиска пульсаций в атмосферах холодных магнитных Ар звезд с помощью спектров высокого спектрального и временного разрешения, полученных на спектрографе UVES одного из телескопов VLT ESO (Чили). Было обработано порядка 700 спектров с помощью разработанного нами программного комплекса экстрактации и нормализации на континуум. В результате

пульсационного анализа удалось обнаружить пульсации для 9 из 12 объектов. Этот хороший показатель результативности поиска гоАр звезд делает данное исследование самым эффективным, которое когда-либо проводилось. Для всех звезд по фотометрическим калибровкам были определены фундаментальные характеристики, а для звезды HD 177765 проведен анализ химического состава по усредненному спектру.

Из девяти объектов, для которых удалось обнаружить переменность лучевых скоростей в высоко дисперсионных спектрах, две звезды HD 119027 и HD 185256 были ранее известны как roAp звезды по фотометрии. До этого исследования время-разрешенный спектральный анализ для данных объектов не производился. В данном исследовании у них были обнаружены спектроскопические переменности спектральных линий, которые свойственны roAp звездам. Для трех звезд HD 69013, HD 96237 и HD 143487, наличие пульсаций, определенных по спектроскопии, было независимо представлено в работах [8,9], в которых авторы использовали менее качественный спектральный материал по сравнению с данным исследованием. В данной работе удалось добиться подтверждения наличия пульсационной переменности этих звезд с большей точность. Впервые найдены пульсации в атмосферах холодных Ар звезд HD 132205 HD 148593, HD 151860 и HD 177765. Последняя звезда особенно интересна тем, что показывает переменность с периодом ~ 24 мин, который является самым большим периодом из всех известных Ар звезд.

Все звезды, для которых удалось обнаружить спектроскопическую пульсационную переменность лучевых скоростей, показывают осцилляции в ионах редкоземельных химических элементов. К тому же, звезды HD 95237, HD 132205, HD 143487, HD 177765 и HD 185256 показывают переменность в ядре профиля водородной линии Hα. Типичные пульсационные амплитуды новых гоАр звезд находятся в диапазоне 100 м/с и ниже. Звезда HD 132205 пульсирует с амплитудами ниже 50 м/с. У звезды HD 177765 были обнаружены пульсации меньше 10 м/с в линиях Fe I. Пульсационные периоды

вновь открытых пульсирующих звезд (за исключением HD 177765) лежат в диапазоне от 7.1 до 13.9 мин. Последующие исследования звезды HD 177765 по фотометрическим наблюдениям космического телескопа *Kepler* временной серии за 81 день подтвердили обнаруженный в данной главе пульсационный период, а также нашли еще два [45].

Для трех звезд, HD 5823, HD 178892 и HD 185204, не удалось обнаружить переменности лучевых скоростей спектральных линий с амплитудами меньше 100м/с. Относительно быстрое вращение звезды HD 5823 делает невозможным обнаружение точных значений лучевых скоростей. Тем не менее, верхний предел возможных пульсаций в этой звезде не слишком большой. Для оставшихся двух звезд HD 178892 и HD 185204 можно исключить пульсации с амплитудами лучевых скоростей, превышающими 10 - 20 м/с в линиях Nd II и Nd III. Очень сильное магнитное поле  $\langle B \rangle = \sim 18.5$ kG у звезды HD 178892 делает данную звезду необычной среди других roAp кандидатов. Известна только еще одна roAp звезда HD 154708 с похожим значением магнитного поля  $\langle B \rangle = 24.5 \text{ kG}$  [64], у которой амплитуды пульсаций линий ионов REE достигают 60 м/с. Магнитное расщепление спектральных линий в звездах HD 178892 и HD 154708 влияет на точность скоростей. С вычисления лучевых повышением точности как фотометрических, так и спектроскопических наблюдений, вероятность обнаружить пульсации в звездах, ранее считавшимися непульсирующими, увеличивается. Как видно из данной главы, слабые осцилляции были обнаружены в восьми объектах, ранее классифицированных как поАр. Это означает, что диапазон пульсационных амплитуд roAp звезд не имеет четкого нижнего порога, и распространяется от нескольких км/с в звездах, наподобие HD 83368 [64] и HD 99563 [65], до порядка ~20 м/с, как показано для звезды HD 75445[66] и в данной работе. Также, авторы [67] и [68] обнаружили пульсации порядка ~20 м/с в звезде *β*CrB. Более того, наблюдения с помощью космического телескопа *Kepler* обнаружили пульсации с амплитудами ниже,

чем нескольких десятков µmag [67]. Скорее всего, все холодные звезды, попадающие в полосу нестабильности, пульсационно-нестабильны.

# ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ВОЗБУЖДЕНИЯ БЫСТРЫХ ПУЛЬСАЦИЙ В АР ЗВЕЗДАХ

## 4.1. Движущий механизм быстрых пульсаций

Механизм, отвечающий за возбуждение осцилляций, наблюдаемых в гоАр звездах, до сих пор полностью не изучен. На протяжении многих лет было много предположений относительно этого механизма, начиная от прямого воздействия силы Лоренца до магнитной сверхустойчивости и механизма непрозрачности [23]. Нестабильные радиальные моды высокого порядка, похожие на те, которые наблюдаются в гоАр звездах, были найдены в моделях из работ [10,69,70,71]. Эти модели существенно различаются. В работе [69] автор считал, что гоАр звезды могут иметь хромосферу и сделал специальную модификацию зависимости температура – оптическая глубина таким образом, чтобы вызвать инверсию температуры при малых оптических глубинах. В другой работе [10] считали, что сильное магнитное поле, существующее в roAp звездах, подавляет конвекцию в некоторых регионах возле магнитных полюсов. Таким образом, была создана пятнистая модель, в которой только магнитные экваториальные регионы сохраняют конвекцию. Кроме того, они рассмотрели модели с включенным в них полярным ветром. В работе [70] автор рассмотрел модели, в которых конвекция полностью подавлена и в которых прямой эффект магнитного поля принимает участие в осцилляциях. Далее в работе [71] авторы рассмотрели обе модели с подавленной конвекцией и без нее и разным химическим составом. Несмотря на различия в физических приближениях, все эти модели возбуждения радиальных осцилляций высокого порядка были получены как результат неадиабатических вычислений, которые берут свое начало от механизма непрозрачности, действующего в области ионизации водорода.

Даже при том, что расчеты, описанные выше, предсказывают возбуждение радиальных пульсаций высокого порядка, не все наблюдаемые пульсационные свойства гоАр звезд хорошо воспроизводятся в этих моделях. В частности, модели, кажется, не прогнозируют нестабильность очень высоких частотах, значительно выше стандартной акустической предельной частоты, наблюдаемой в некоторых гоАр звездах. Кроме того, возникли трудности в воспроизведении наблюдаемого красной границы полосы нестабильности [23,71]. Диапазон частот, возбуждаемых механизмом непрозрачности, сильно зависит от эффективной температуры звезды и ее светимости. Таким образом, сравнение между предсказаниями моделей и наблюдениями требует точного определения этих величин.

# 4.2. Параметры из наблюдений

Угловые диаметры четырех гоАр звезд  $\alpha$ Cir [72],  $\beta$ CrB [73], 10Aql [74] и  $\gamma$ Equ [75] были недавно получены, используя Sydney University Stellar Interferometer (SUSI) для первой звезды, и интерферометра из Центра астрономии большого углового разрешения (Center for High Angular Resolution Astronomy, CHARA), для последних трех звезд.

Эти угловые диаметры были использованы для получения эффективной температуры звезд путем, который менее зависит от моделирования сложных атмосферных структур этих звезд. чем основанные на анализе фотометрических или спектроскопических данных традиционные методы. Более того, для вычисления звездных светимостей также были вычислены болометрические потоки для этих звезд и использованы в сочетании с параллаксом, основываясь на калибровочных спектрах и фотометрии. Эффективные температуры и светимости, найденные в работах упомянутых выше, будут использованы как входные данные для моделей. В дальнейшем мы будем ссылаться на эти входные данные как на интерферометрические входные данные. Они указаны в Таблице 15 вместе с фотометрическими и спектроскопическими определениями температур, опубликованными В литературе для этих звезд.

Имя звезды		Интерфером	етрические	Спектроско	опические	Фотометрические		
		данн	ње	данн	ње	данные		
HD		$T_{eff}(K)$	$L_{o}$	$T_{eff}(K)$	$L_{o}$	$T_{eff}(K)$	$L_{o}$	
201601	γEqu	$7364 \pm 235$	$12.8 \pm 1.4$	$7550\pm50$	12.6 ± 0.9	$7621 \pm 200$	$12.6 \pm 0.9$	
176232	10Aql	$7900\pm200$	18.5 ± 1.6	$7550\pm50$	18.7 ± 0.9	$7925\pm200$	$20.9\pm2.0$	
137909	βCrB	$7980 \pm 180$	25.3 ± 2.9	$8100 \pm 50$	23.7 ± 1.9	$7430\pm200$	27.5 ± 1.3	
128898	αCir	$7420\pm170$	$10.5 \pm 0.6$	$7500 \pm 130$	$10.7 \pm 0.3$	$7673\pm200$	$11.0 \pm 0.3$	

Таблица 15. Эффективные температуры и светимости для четырех принятых в данной таблице взяты из работ [72,74,75].

Считается, что среди классических методов, используемых для определения эффективных температур, спектроскопические исследования высокого разрешения дают наиболее точные значения для СР звезд. В подходящие моделирования звезд расширенные частности, для Ap атмосферные модели были использованы в работе [44] для получения фундаментальных параметров нескольких гоАр звезд, включая те, которые рассматриваются здесь. В дальнейшем данные параметры будут называться как спектроскопические. Данные параметры T<sub>eff</sub> и L получены из моделей атмосфер и спектроскопии высокого разрешения работ [57,76,77]. Таблица 15 показывает, что для трех из четырех звезд в данной выборке, эффективная температура, полученная из спектроскопических моделей, близка по своим интерферометрических наблюдений. значениям с результатами Лля дополнительного сравнения были рассмотрены эффективные температуры, полученные из фотометрии. Выбор в пользу фотометрических значений из работы [78] был сделан по причине использования таких методов вычисления, как и в настоящей работе по сравнению с другими фотометрическими определениями температур. Следовательно, ЭТОТ набор результатов

фотометрических данных может быть рассмотрен как гомогенный. В Таблице 15 приведены *фотометрические* входные данные из работы [78] для T<sub>eff</sub> и *L*.

В дополнение к эффективным температурам и светимостям, проверка на предлагаемые неадиабатические вычисления требуют знаний пульсационных свойств гоАр звезд, в частности, характерные частоты наблюдаемых мод. Они представлены в Таблице 16 для четырех рассматриваемых звезд. Точные значения частот отдельных мод не важны, а важен диапазон, в котором эти моды возбуждаются.

Заметим, что недавнее наблюдения гоАр звезд с помощью NASA спутника *Kepler* [67,79] также, как и предыдущая дискуссия о природе гоАр звезды  $\beta$ CrB [28,80], ясно показывает, что амплитуды осцилляций в гоАр звездах могут во многих случая быть ниже возможности их обнаружения. Кроме того, из наблюдений космическим телескопом *Kepler* гоАр звезд, амплитуды могут отличаться на порядок. Таким образом, для попытки тестирования теоретических моделей, каждая область частот, представленная в Таблице 16, должна быть учтена как наименьший возможный диапазон. Частоты взяты из работ [80,81,82,83].

То есть для согласия с наблюдениями, теоретические модели должны предсказывать возбуждение мод в нужном частотном диапазоне, но не обязательно только в этом диапазоне.

HD	Звезда	Диапазон частот (mHz)		
201601	γEqu	<sup>a)</sup> 1.31 - 1.42		
176232	10 Aql	<sup>b)</sup> 1.39 - 1.45		
137909	βCrB	<sup>c)</sup> 1.03		
128898	αCir	<sup>d)</sup> 2.26 - 2.57		

Таблица 16. Диапазон частот пульсаций для четырех моделируемых звезд.

#### 4.3. Входные данные для вычислений

Для проведения линейного неадиабатического вычисления для четырех звезд, рассмотренных в данной главе, использовались приближения, представленные в работе [10].

Далее будет представлено детальное описание соответствующих моделей и физических параметров, а также коротко приведены важные для текущего обсуждения аспекты. Вычисления модели звезды основаны на двух программах.

Первая программа генерирует равновесную модель оболочки, которая не включает в себя генерацию энергии ядра звезды, а вторая программа решает линейное неадиабатическое уравнение для радиальных осцилляций. Модель предусматривает сильное магнитное поле, которое присутствует в гоАр звездах, которое, в свою очередь, подавляет конвекцию как минимум в области магнитного полюса.

Две опции возможны касательно подавления конвекции. Первая подавляет конвекцию всех широтах, представляя сферически на симметричную равновесную модель. Вторая симулирует модель, в которой конвекция подавлена только до некоторой широты, отмерянной от магнитного Для последнего случая рассчитываются сферически полюса. две модели. Одна с полностью симметричные равновесные подавленной конвекцией, конвекцией, нормальной подчиняющаяся И другая с нелокальному закону смешивания [84]. Эти две равновесные модели согласовываются таким образом, что гарантируется, что они имеют общую внутреннюю структуру. Это сделано с помощью подгонки светимости и радиуса одной модели до тех пор, пока такая же температура, давление и содержание гелия не получатся в двух моделях ниже конвективной оболочки. В случае, когда конвективная оболочка подавлена на всей широте, используя нелокальное зависимое от времени уравнение [85], решается линейное неадиабатическое уравнение.

В дополнении к определению угловой области вокруг магнитного полюса, в котором конвекция подавляется, и фиксации параметров, связанных с конвекцией, для предложенного надиабатичского вычисления требуется задать следующие параметры:

a) Минимальная Температурная оптическая толща τ<sub>min</sub>. стратификация в атмосфере определяется из отношения температураоптическая толща  $T(\tau)$ , применённого к моделям Kurucz [86]. Значение  $\tau_{min}$ является свободным параметром модели. Для осцилляций с частотами ниже акустической предельной частоты (cut-off frequency), форма собственной функции в распространении вглубь должна быть относительно независимой от применённого значения  $\tau_{min}$ . Тем не менее, в случае высоких частот осцилляций, которые наблюдаются в roAp звездах, форма собственной функции ниже фотосферы более чувствительна к деталям в верхних слоях атмосферы. Учитывая вышесказанное, далее будет рассмотрено влияние на результат двух разных значений  $\tau_{min}$  в данных вычислениях, обозначенных,  $\tau_{min}$  $= 3.5 \text{ x } 10^{-5}$  и  $\tau_{\min} = 3.5 \text{ x } 10^{-4}$ 

**б) Профиль гелия в равновесной модели.** Профиль гелия в моделях с подавленной конвекцией определен по закону, описанному в работе [10], без полярного ветра (т.е. с аккумулирующим параметром А равным нулю, ступенчатый профиль):

$$Y = Y_{surf} + (x_2 + x_3)(Y_{int} - Y_{surf})$$
(36)

где x<sub>2</sub> и x<sub>3</sub> – содержание гелия в первой и второй стадии ионизации.

Профиль характеризуется одиночным параметром Y<sub>surf</sub>, который устанавливает содержание гелия на поверхности. Здесь должно сохраняться условие

$$\mathbf{X} + \mathbf{Y} + \mathbf{Z} = 1 \tag{37}$$

Где X, Y и Z – относительное содержание водорода, гелия и «металлов», соответственно. В данных вычислениях рассматривается осажденный гелий, когда конвекция подавлена, что приводит к малому содержания гелия во

внешних слоях, в частности где и происходит ионизация водорода. Когда конвекционная оболочка присутствует (используется далее в так называемой экваториальная модель), профиль гелия считается однородным и соответствует солнечному содержанию. Эти предположения подтверждаются результатами работы [87]. Чтобы увидеть эффективность влияния оседания гелия на результат, в дальнейшем будет рассмотрено два случая относительно поверхностного содержания гелия  $Y_{surf} = 0.1$  и  $Y_{surf} = 0.01$  (используется далее в так называемой полярная модель).

в) Пропускание и отражение пульсационных волн. Внешнее граничное условие является температурным минимумом в пульсационной модели. В некоторых гоАр звездах частоты наблюдаемых осцилляций больше, чем предельная (cut-off) акустическая частота. Другими словами, данная волна распространятся дальше в атмосферу, и рассеивается. В связи с этим, авторы [88] предположили, что сочетание осцилляций с магнитным полем во внешних слоях гоАр звезд производит преобразование части первоначальной энергии акустической волны в магнитную энергию. Авторы также отметили, что магнитная часть энергии не исчезает, позволяя фракции волновой энергии сохраняться в каждом пульсационном цикле.

В неадиобатическом вычислении рассматривается прямой эффект влияния магнитного поля на осцилляции. Отражение волн от поверхности в данном случае не учитывается. Отсюда естественные граничные условия накладываются на внешнюю среду, которая позволяет волне распространятся прочь, если эта частота выше акустической частоты. Это граничное условие, как опция пульсационного кода, было получено из решения плоско параллельной изотермической атмосферы. Далее будем называть его как *пропускающая* граничная среда. Не смотря на вышенаписанное, механизм отражения высоко частотных мод не учитывается в этой немагнитной модели. Для попытки учесть эффект таких физических механизмов, автор [10] рассмотрел вторую опцию для внешних граничных условий, которая полностью отражает волны. Далее будем называть его *отражающая* граничная среда.

Данные граничные условия были получены для вычисления уравнений на бесконечной изотермической атмосфере. Общие свойства моделей, используемых для вычислений, представлены в Таблице 17. В таблице столбцах указаны два идентификатора звезды, модельная масса, модельный радиус, полученный из интерферометрических, спектроскопических и фотометрических входных данный соответственно, внутреннее содержание водорода и гелия, поверхностное содержание гелия, минимальная оптическая толща и внешние граничные условия в пульсационном коде. Для последних трех значений использовалось два варианта. Так называемая стандартная модель вычислялась со следующими параметрами:  $\tau_{min} = 3.5 \times 10^{-5}$ ,  $Y_{surf} = 0.01$ , и отражающая граничная среда. Все данные модели будут вычислены с учетом внешнего и внутреннего содержания гелия и водорода:  $Y_{int} = 0.278$  и  $X_{int} =$ 0.705. Данные значения свойственны для солнечного содержания [89,90]. Для параметров масс звезд были приняты следующие значения: для  $\gamma$ Equ M = 1.75М<sub>☉</sub>, для 10Aql M = 1.95 M<sub>☉</sub>, для  $\beta$ CrB M = 2.05 M<sub>☉</sub>, и M = 1.70 M<sub>☉</sub> для  $\alpha$ Cir. Эти значения с ошибкой  $\pm 0.05 \ {
m M}_{\odot}$  были получены, основываясь на эволюции звезд, принимая во внимания спектроскопические параметры из Таблицы 15 и химический состав оболочки, упомянутой выше.

Таблица 17. Параметры моделей. Стандартная модель отмечена черным цветом, в то время как измененные параметры – красным. Для полярной модели рассматривается два поверхностных содержания гелия  $Y_{surf} = 0.01$  и  $Y_{surf} = 0.1$ , в то время как для экваториальной модели данное распределение однородно  $Y_{surf} = Y_{int}$ .

HD	Звезда	Macca (M <sub>o</sub> )	R <sub>int</sub> (R <sub>☉</sub> )	R <sub>spe</sub> (R <sub>o</sub> )	R <sub>pho</sub> (R <sub>☉</sub> )	X <sub>int</sub>	Y <sub>int</sub>	$\mathbf{Y}_{surf}$	$ au_{ m min}$	Граничные условия
201601	γEqu	1.75	2.20	2.08	2.04	0.705	0.278	0.01 – <mark>0.1</mark>	$3.5 \times 10^{-5} - 3.5 \times 10^{-4}$	reflect. – transm.
176232	10 Aql	1.95	2.31	2.53	2.43	0.705	0.278	0.01 – <mark>0.1</mark>	$3.5 \times 10^{-5} - 3.5 \times 10^{-4}$	reflect. – transm.
137909	βCrB	2.05	2.64	2.48	2.67	0.705	0.278	0.01 – <mark>0.1</mark>	$3.5 \times 10^{-5} - 3.5 \times 10^{-4}$	reflect. – transm.
128898	αCir	1.70	1.96	1.94	1.88	0.705	0.278	0.01 – <mark>0.1</mark>	$3.5 \times 10^{-5} - 3.5 \times 10^{-4}$	reflect. – transm.

### 4.4. Модели

Рисунки 20, 21 и 22 показывают основные результаты неадиабатических вычислений, полученных для четырех выбранных звезд  $\alpha$ Cir,  $\beta$ CrB, 10Aql и  $\gamma$ Equ. При вычислении пульсаций принята временная зависимость типа  $e^{-i\omega t}$ , где угловая частота выражается

#### $\omega = \omega_r + i\eta$

В таком случае, осцилляции в действительности не стабильны, если показатель роста η больше нуля.

#### 4.4.1. Экваториальная модель

Экваториальная стандартная модель рассчитывалась с использованием интерферометрических однородным данных И содержанием гелия. Показатели темпа роста как функции циклической частоты  $v = \omega/2\pi$ , полученные для экваториальных моделей данных четырех звезд. представлены на Рис. 22. Здесь представлены результаты для каждой звезды для трех различных моделей, включающие стандартную модель, схожую модель, но с отличным значением минимальной оптической толщи и с другим граничным условием в пульсационной программе. Радиальные порядки мод были выбраны такие, которые охватывают область наблюдаемых частот. Здесь, соответственно, порядки n=10-36 для случаев  $\gamma$ Equ, 10 Aql и  $\beta$ CrB, и порядки n=19-39 в случае αCir.

Во всех случаях и для всех четырех звезд  $\gamma$ Equ, 10 Aql,  $\beta$ CrB и  $\alpha$ Cir в экваториальных моделях в области частот, где осцилляции наблюдаются, моды были стабильными. Из анализа давления газа и вклада турбулентного давления, полученного при вычислении кумулятивного рабочего интеграла [10], было найдено, что во всех этих моделях турбулентное давления отвечает за стабилизацию мод высокого порядка, как было найдено в моделях [10].

Из Рис. 22 следует также, что кроме мод высокого порядка (больше, чем n = 25 для 10 Aql и  $\beta$ CrB, и больше, чем n = 30, для  $\gamma$ Equ и  $\alpha$ Cir), показатель темпа роста практически не зависит от принятых в моделях минимальной оптической толщи и от граничных условий пульсационного кода. Предполагается, что все экваториальные модели имеют гомогенный химический состав в оболочке.



Рис. 22. Нормализованный темп роста для экваториальных моделей. Моды нестабильны, когда показатель роста больше нуля. Для каждой звезды результаты представлены для стандартной модели (окружности), для случая

τ<sub>min</sub> = 3.5х10<sup>-5</sup> (квадраты) и для пропускающей граничной среды
 (треугольники). Вертикальные полосы указывают на область наблюдаемых
 частот, а горизонтальная линия соответствует нулевому показателю темпа

## 4.4.2. Полярная модель

Показатели темпа роста для полярной модели, избранных четырех звезд представлены на Рис 21. Результаты представлены для тех же самых условий, которые были указанных в экваториальной модели (раздел 4.4.1). Дополнительно рассмотрена еще одно условие, связанное с поверхностным содержание гелия Y<sub>surf</sub> = 0.1.



Рис. 23. Нормированный показатель роста для полярной модели (т.е. с подавленной конвекцией в оболочке). Панели показывают результат для разных звезд. В добавок к трем параметрам, описанным на Рис. 22, дополнительно представлена четвертая модель с условием *Y*<sub>surf</sub> = 0.1 (правосторонние треугольники). Остальные обозначения такие же, как и на Рис. 20.

Расчеты показывают, что для полярных моделей показатели темпов роста положительны в интервале радиальных порядков 18 - 24. При этом для звезд 10 Aql и  $\beta$ CrB эффект более выражен, чем для более холодных звезд  $\gamma$ Equ и  $\alpha$ Cir. В действительности, для последних двух звезд не было найдено положительно значение темпа роста в этой области радиальных порядков с большим значением  $\tau_{min}$ . Также из Рис. 23 хорошо видно, что набор положительных величин показателя темпа роста зависит от принятых в полярных моделях даже при умеренных значений радиального порядка зависит от принятых параметров, применяемых в пульсационном коде.

При расчетах стандартной полярной модели мы использовали те же параметры, что и при расчете экваториальных моделей (полученных из интерферометрии). Поверхностное содержание гелия при этом принималось равным  $Y_{surf} = 0.01$ . Для оценки того, насколько принимаемые фундаментальные характеристики звезды влияют на рассчитываемую модель, мы также рассчитали сетку моделей при значениях параметров, полученных из спектроскопических и фотометрических наблюдений.

Сравнение стандартной модели с разными входными параметрами представлено на Рис. 24. Для новых моделей (с фотометрическими и спектроскопическими входными данными) заметно перекрытие областей с положительным показателем темпа роста с ожидаемыми частотами. Видно, что значения частот, при которых наблюдается положительный показатель темпа роста, зависит от величин принимаемых фундаментальных параметров звезды.



Рис. 24. Сравнение нормированного показателя роста для полярных моделей с разными входными параметрами. Панели показывают результаты полярных моделей звезд, вычисленных с входными данными из интерферометрии (круги), спектроскопии (ромбы) и фотометрические входные параметры (треугольники)

# 4.4.3. Комбинированная модель.

Для определения положения возбужденной моды необходимо рассмотреть показатель темпа роста,  $\eta_c$ , в комбинированной модели полярных и экваториальных областях. Применяя сферическую систему координат (r,  $\theta$ ,  $\varphi$ ), и используя обозначение  $\mu = \cos\theta$ , можно получить уравнение из работы [10]:

$$\eta_{nlm}^{c} \approx \eta_{n0}^{p} \int_{\tilde{\mu}}^{1} (Y_{l}^{m})^{2} d\mu d\phi + \eta_{n0}^{eq} \int_{0}^{\tilde{\mu}} (Y_{l}^{m})^{2} d\mu d\phi =$$
(38)

$$= (1 - \Lambda_l^m) \left( \frac{\Lambda_l^m}{1 - \Lambda_l^m} \eta_{n0}^p + \eta_{n0}^{eq} \right)$$

Здесь  $\eta_{n0}^{p}$  показатель темпа роста радиальной моды порядка n для полярной модели и  $\eta_{n0}^{eq}$  – показатель темпа роста для экваториальной модели,  $Y_{l}^{m}$  – сферическая гармоническая функция, где *l* и *m* представляют степень мод и азимутальный порядок соответственно.

Геометрический фактор  $\Lambda_l^m$ , который учитывает размер полярной области (далее – пятно), записывается формулой:

$$\Lambda_{l}^{m} = (2l+1) \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \int_{\tilde{\mu}}^{1} (P_{l}^{m})^{2} d\mu$$
(39)

где µ = cosv – угловой размер пятнас центром на магнитном полюсе, в котором конвекция считается подавленной. Заметим, что уравнение (38) предполагает, что показатели темпа роста нерадиальных мод могут быть определены из самих радиальных мод. Как утверждается в работе [10], данное замечание оправдано для низких степеней мод высоких радиальных порядков. Из выражения (38) можно также видеть, что мода нестабильна в комбинированной модели при следующем условии:

$$\frac{\Lambda_l^m}{1 - \Lambda_l^m} \eta_{n0}^p > -\eta_{n0}^{eq} \tag{40}$$

Иллюстрация фактора  $\Lambda_l^m/(1 - \Lambda_l^m)$  для мод порядка до l = 2 представлена на Рис. 25, который взят из работы [10]. Запомнив это, можно проверить показатель темпа роста в экваториальной и полярной модели для каждой из наших четырех звезд и сравнить результаты вычислений с наблюдениями.



Рис. 25<sup>1</sup>. Зависимость геометрического фактора  $\Lambda_l^m/(1 - \Lambda_l^m)$  для мод l = 0, m = 0 (сплошная линия), l = 1, m = 0 (пунктирная линия), l = 2, m = 0 (штриховая линия), l = 1, m = 1 (штрих-пунктирная линия) и l = 2, m = 2 (коротки штрих – длинный штрих линия) от углового радиуса полярной области.

### 4.5. Результаты моделирования

В случае **10** Aql и  $\beta$ CrB возбуждения, происходящие в полярной модели, не зависят от  $\tau_{min}$  и Y<sub>surf</sub>, но зависят от граничного условия на пропускание волны. Вполне разумно предположить, что варьируя такие входные параметры, как эффективная температура T<sub>eff</sub> и светимость L, в пределах ошибки, можно так настроить вычисление, что показатели темпа роста будет

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Источник: Balmforth N. J et al. "On the excitation mechanism in roAp stars", MNRAS, 2001, Vol 323, Is 2, pp. 362-372, Fig 4

положительными в требуемом диапазоне частот. Более того, похожее использование разброса входных параметров может легко привести к результату, в котором наблюдаемые частоты в этих двух звездах расположены на частоте полярного максимального показателя темпа роста.

Анализ показателей темпов роста, получаемых в экваториальных моделях 10 Aql показывает, что их абсолютное значение примерно достигает максимума ( $\eta/\omega_r \sim 5-10 \ge 10^3$ ) для рассматриваемого диапазона частот. Учитывая  $\Lambda_l^m/(1 - \Lambda_l^m)$  (смотри Рис. 25), можно ожидать появление возбуждений в этих моделях в заданной области частот в том случае, если угловой радиус пятна с подавленной конвекцией будет больше, чем  $v \sim 30^\circ$ . Также было обнаружено, что при наличии пятна такого размера, легче возбуждаются моды l = 1 и 2 и m = 0, в то время как для радиальной моды l = 0 требуется пятно с размерами  $\upsilon > 60$ .

Подобные исследование показателей темпов роста в экваториальных моделях в случае  $\beta$ CrB показывают, что их абсолютное значение в интересуемом диапазоне частот определенно меньше, чем показатель темпа роста, найденный в полярных моделях. Отношение между ними составляет порядка пяти. Оценка поверхностного фактора  $\Lambda_l^m/(1 - \Lambda_l^m)$  приводит к заключению, что осесимметричные моды l = 1 и 2 могут возбуждаться при сравнительно небольшом угловом радиусе  $\upsilon \sim 20^\circ$ , в то время как радиальные моды начинают возбуждаться, если пятно простирается более чем на 35°.

Рассмотрим случай  $\gamma$ Equ. Имея возможность немного изменить входные параметры с их погрешностями, как было сказано ранее, можно сделать заключение, что возбуждение мод происходит в необходимой для нас области частот во всех полярных моделях, рассмотренных в данной работе, за исключением больших значений  $\tau_{min}$ . Тем не менее, сравнивая результаты в полярной и экваториальной моделях, мы получаем совсем другую картину по сравнению с той, которая возникает в моделях 10 Aql и  $\beta$ CrB. В данном случае абсолютное значение показателя темпа роста в экваториальных моделях в 5 раз больше, чем показатель роста в полярных моделях. Следовательно, для

возбуждения колебаний в комбинированной модели требуется подавление конвекции практически на всех широтах. Исключение составляет мод колебаний l = 1 и m = 0. Данные моды становятся нестабильны, если v больше или равно 60°. Подавление конвекции в достаточно большой угловой области может быть следствием влияниям магнитного поля звезды, присущего у  $\gamma$ Equ. Среднее значение модуля магнитного поля  $B \sim 4.0$  kG определено в работе [91]. Однако, не ясно, как магнитное поле может подавить конвекцию, когда оно становится горизонтальным. То есть, что будет в случае магнитного поля вблизи магнитного экватора [91], если предположить у  $\gamma$ Equ дипольную структуру. К сожалению, пока нет четких доказательств гипотезы подавления конвекции до широт, близких к экватору и, возможно следует, что для этого требуется другой механизм подавления конвекции.

Наконец, рассмотрим случай со звездой  $\alpha$ Cir. В отличие от других звезд, наблюдения этой звезды действительно представляют проблему ДЛЯ механизма возбуждения пульсаций, рассматриваемую нами. Исследование положительного показателя темпа роста в полярных моделях αCir должно привести нас к заключению, что если бы высокочастотные осцилляции были возбуждены в этой звезде, то их частоты должны быть в районе 1.7 mHz, а не там, где они наблюдаются на самом деле ~ 2.4 mHz. В соответствии с Рис. 26, который взят из работы [23], полярные модели могут предсказать нестабильные моды с частотами порядка 3.2 mHz. Но они предсказываются для моделей с меньшими светимостями, которые располагаются близко к ZAMS. Таким образом, поскольку известные нам фундаментальные характеристики звезды αCir (~1.97 R<sub>☉</sub>) не совпадают с положением холодных непроэволюционировавших звезд на диаграмме H-R, можно сделать вывод о том, что существующая теория не может описать колебания с частотами, больше предельной акустической частоты для таких звезд.



Рис. 26<sup>1</sup>. Диаграмма H-R для области, где предполагаются возбуждения в roAp звездах. Числа показывают частоту в mHz наиболее нестабильной моды для каждой модели.

# 4.6. Обсуждение результатов моделирования

Теоретическое моделирование пульсаций требует точного определения фундаментальных параметров. Как это было показано, модели гоАр звзед очень чувствительны даже к незначительным изменениям фундаментальных параметров. Таким образом, их химически пекулярная природа усложнят определение эффективной температуры. Угловой диаметр определен достаточно точно с помощью интерферометрических наблюдений для четырех гоАр звезд  $\alpha$ Cir,  $\beta$ CrB, 10Aql и  $\gamma$ Equ. Моделирование пульсаций

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Источник: Рис. 4 статьи Cunha M. S. «A theoretical instability strip for rapidly oscillating Ap stars», MNRAS, 2002, V. 333, Is. 1, pp. 47-54

данных звезд показывает, что для трех из них  $\beta$ CrB, 10Aql и  $\gamma$ Equ область возбуждающихся мод хорошо согласуется с наблюдаемыми частотами у этих звезд. Данное заключение справедливо для построенных в сответствии с [10,23] нашими моделями. Основываясь на сравнении результатов моделей и наблюдаемых частот звезд  $\beta$ CrB, 10Aql и  $\gamma$ Equ, можно поставить ограничение на максимальный размер области, в которой конвекция должна быть подавлена.

Анализ более высокочастотных колебаний звезды  $\alpha$ Cir v = 2.26 -2.57 mHz не удовлетворяет ни одной из рассматриваемых моделей возникновения пульсаций. Объяснение этого эффекта может быть связано с различием предельных значений акустической частоты. Исследование стандартной модели для четырех звезд данной выборки приводит к следующим значениям предельных акустических частот: v<sub>c</sub> ~ 1.5 mHz для 10 Aql,  $v_c \sim 1.6$  mHz для  $\gamma$ Equ,  $v_c \sim 1.1$  mHz для  $\beta$ CrB,  $v_c \sim 1.9$  mHz для  $\alpha$ Cir. Сравнение с Таблицей 16 показывает, что первые три звезды 10 Aql, уEqu и βCrB действительно имеют наблюдаемые осцилляции с частотами, ниже предельной частоты, в то время как в случае  $\alpha$ Cir она превышает ее. Возможно несовпадение модельных расчетов с наблюдениями связано с тем, что при моделировании не учитывалось влияние магнитного поля на пульсации. частотой, Известно, что осцилляции С превышающей предельную акустическую частоту, чувствительны к динамике атмосферных слоев звезды, где магнитное поле играет важную роль. Тем не менее, заключение о том, что наблюдаемые частоты отличаются от модельной частоты, может говорить о существовании внутренних различий между случаем αCir и другими тремя звездами.

Стоит отметить, что при исследовании экваториальных моделей  $\alpha$ Cir c разной атмосферой или диффузией гелия, нам удалось найти случаи, в которых моды схожи с наблюдаемыми, и, когда показатель роста отрицателен, но близок к нулю в ожидаемой нами области частот. Как пример такого результата с похожим солнечным соотношением  $T(\tau)$  было получено из

модели С работы [92]. На Рис. 27 представлены результаты моделирования в рамках нашей экваториальной модели (с конвекцией) с учетом осаждения гелия при поверхностном содержании Y<sub>surf</sub> = 0.08. Исследование рабочего интеграла показывает, что в этом случае сильный вклад энергии приходит из области ионизации водорода. В данном случае за механизм возникновения осцилляций отвечает турбулентное давление.

В действительности, схожий механизм возникновения осцилляций найден звездах типа δ-Scuti [93] для мод радиального порядка. К сожалению, наши модели не поддерживают полную динамику таких высокочастотных осцилляций. Тем не менее, наши результаты показывают, что возбуждение мод с частотами выше предельной акустической частоты в области ионизации водорода вполне возможны в моделях с конвекцией.

Среди всех известных гоАр звезд, существует 11 других объектов с частотами, превышающими ~ 2 mHz. К сожалению, для данных звезд нет достаточно точного определения параллакса, и только для двух из них получено значение радиуса из спектроскопических исследований. Такими звездами являются HD 24712 (HR 1217), которая пульсирует на частотах ~2.6 - 2.8 mHz [94], и HD 137949 (33Lib), которая пульсирует в диапазоне ~1.8 - 2.0 mHz [95]. Их радиусы были определены с помощью атмосферных моделей:  $R = 1.778 R_{\odot}$  для HD 24712 [57] и  $R = 2.13 R_{\odot}$  для 33 Lib [96].



Рис. 27. Нормированный показатель роста в экваториальной модели с разными атмосферными характеристиками с фотометрическими входными данными. Кругами показана модель схожая со стандартной, но с оседанием гелия и *Y<sub>serf</sub>* = 0.08. Треугольниками показана модель с солнечной атмосферой, в которой отношение T( $\tau$ ) получено из модели C [92], принимая  $\tau_{min} = 10^{-4}$ .

Оказывается, что с фундаментальными параметрами [57] звезда HD 24712 находится под красной частью полосы нестабильности, описанной в работе [23]. Это означает, что стандартная полярная модель этой звезды не приведет К появлению нестабильных мод высокой частоты. Если проигнорировать этот факт и рассмотреть увеличение показателя роста с радиусом (игнорируя малую зависимость от массы), то центр будет в районе 2.0 mHz, что далеко от наблюдаемых значений. По этим причинам можно предположить, что звезда HD 24712 является примером группы roAp звезд, чьи пульсации не могут быть объяснены возбуждениями в полярной модели с подавленной конвекцией. С другой стороны, другая звезда HD 137949, расположенная внутри полосы нестабильности, может быть описана стандартными полярными моделями. Если мы рассмотрим точно такое же

масштабирование, то для объяснения пульсаций получим радиус ~  $1.8 R_{\odot}$ . Таким образом, либо эта звезда горячее с температурой более  $T_{eff} = 8000 \text{ K}$  [97], либо, что более вероятно, это еще один пример звезд, наблюдаемые частоты осцилляций которых выше предельной акустической частоты.

Таким образом, если мы расширим текущую выборку из четырех звезд, добавив в нее HD 24712 и HD 137949, для которых нет интерферометрических данных, но есть определение радиусов по расширенным звездным моделям, то обнаружим, что половина из них проявляет осцилляции в моделях с подавленной конвекцией. Эти частоты близки, но все равно ниже предельной акустической частоты. Вторая же половина звезд имеет осцилляции с превышающими предсказанные моделями частотами. Таким образом, существует группа гоАр звезд, возникновение осцилляций в которых нельзя описать с помощью теории [10]. Данное заключение трудно устранить, изменяя такие входные параметры, как внутреннюю металличность или содержание гелия.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулируем основные результаты диссертационной работы.

- 1. Проведена разработка программного комплекса, позволяющего в автоматическом режиме вести экстракцию и нормализацию на континуум эшелле спектров спектрографа UVES VLT (Чили) в «красном» режиме с центральной длинной волны  $\lambda = 600$  нм. Данный комплекс включает в себя все основные этапы обработки спектров. С помощью разработанного программного обеспечения было обработано более семисот спектров высокого разрешения спектрографа UVES для двенадцати звезд HD 132205, HD 148593, HD 151860, HD 177765, HD 119027, HD 185256, HD 69013, HD 96237, HD 143487, HD 5823, HD 178892 и HD 185204.
- На основе фотометрических данных в системе Strömgren с помощью программы TEMPLOGG для всех выше перечисленных звезд были определены такие фундаментальные характеристики, как эффективная температура и ускорение силы тяжести.
- 3. Анализ обработанных усредненных спектров с помощью программ SYNTHMAG и BINMAG позволил определить, а в ряде случаев подтвердить, такие величины как проекция скорости вращения на луч зрения и значения магнитных полей. Определение указанных параметров для ряда исследованных звезд проведено впервые, а для остальных существенно повышена точность.
- С помощью программы WIDTHMF определен химический состав звезды HD 177765. Для определения эффективной температуры и ускорения силы тяжести звезды с помощью программы SYNTHV проведена аппроксимация линии водорода Hα.
- 5. Проведен частотный анализ осцилляций всех исследованных звезд и показано, что звезды HD 132205, HD 148593, HD 151860 и HD 177765

должны быть отнесены к классу гоАр звезд. Периоды этих новых гоАр звезд, соответственно, равны 7.14, 10.7, 12.3 и 23.6 мин. Выявлено, что среди всех известных гоАр звезд, вновь обнаруженная звезда HD 177765 имеет рекордно длинное значение периода пульсаций – 23.6 мин.

- 6. Спектроскопическим методом определены более точные значения амплитуд и периодов пульсаций гоАр звезд HD 69013, HD 96237 и HD 143487, а также подтверждена гоАр классификация обнаруженных ранее фотометрическим методом гоАр звезд HD 119027 и HD 185256. Исследование спектров звезд HD 5823, HD 178892 и HD 185204 показало отсутствие в них характерных для гоАр звезд пульсаций.
- 7. Проведено моделирование пульсаций на основе экваториальной, полярной и комбинированной моделей для четырех хорошо изученных гоАр звезд  $\gamma$ Equ, 10 Aql,  $\beta$ CrB и  $\alpha$ Cir. При этом были использованы фундаментальные параметры звезд, полученные из данных ПО интерферометрии, спектроскопии и фотометрии, а также учтены различные граничные условия. Показано, что результаты моделирования пульсаций в рамках общепринятой теории достаточно наблюдаемые хорошо описывают частоты трех ИЗ четырех рассматриваемых roAp звезд уEqu, 10 Aql и BCrB, для которых наблюдаемые частоты лежат ниже предельной акустической частоты. В случае звезды αCir, частота которой находится выше предельной акустической требуется иной механизм частоты, возможно возникновения пульсаций, учитывающий в том числе магнитное поле.

Наши результаты показывают, что спектроскопические методы поиска roAp звезд с большей вероятностью могут отождествить эти звезды, которые являлись кандидатами в roAp, но не были отождествлены с помощью фотометрических методов. Поэтому, для дальнейшего поиска roAp звезд, у которых не удалось обнаружить пульсации с помощью фотометрических методов, необходимы спектральные наблюдения с высокой дисперсией. Последующие открытие гоАр звезд с частотами выше предельной акустической частоты может помочь улучшить теорию возбуждения пульсаций, так как текущая теория их не предсказывает.
Автор выражает искреннюю благодарность всем, кто способствовал выполнению данной работы:

- Научному руководителю доценту Цымбалу В. В. за поставленную задачу, мотивацию и помощь при ее выполнении.
- Профессору Уппсальского университета Кочухову О. за предоставленный наблюдательный материал, программное обеспечение и правильные советы.
- Ведущему научному сотруднику Института астрономии РАН Рябчиковой Т. А. за бесценные консультации в области спектроскопии.
- Старшему научному сотруднику Центра астрофизики Университета Порту М. Cunha за помощь в освоении теории звездных пульсаций.
- Профессору Бержанскому В.Н. за обсуждение работы.
- Всем участникам семинаров Крымской Астрофизической Обсерватории и Специальной Астрофизической Обсерваторииза конструктивную критику.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. Renson P., Manfroid J.Catalogue of Ap, HgMn and Am stars // Astronomy and Astrophysics, 2009, Volume 498, Issue 3, pp.961-966
- Lyashko D. A., Tsymbal V. V. Makaganiuk V. A., Processing of Echellé spectra // Spectroscopic methods in modern astrophysics. Proceedings of the conference held 13-15 September 2006, Moscow, Russia. Eds. L. Mashonkina, M. Sachkov, p. 100-114
- Tsymbal V. STARSP: A Software System For the Analysis of the Spectra of Normal Stars // M.A.S.S.; Model Atmospheres and Spectrum SynthesisASP Conference Series, 1996, Vol. 108; ed. Saul J. Adelman; Friedrich Kupka; and Warner W. Weiss, p.198
- Kochukhov O. Spectrum synthesis for magnetic, chemically stratified stellar atmospheres // Physics of Magnetic Stars. Proceedings of the International Conference, 2006, held in the Special Astrophysical Observatory of the Russian AS, Eds: I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev, p. 109-118
- Ryabchikova T. Nesvacil N., Weiss W. W., Kochukhov O., Stütz Ch., The spectroscopic signature of roAp stars // Astronomy and Astrophysics, 2004, v.423, pp.705-715
- Martinez P. The Cape Oscillating Ap Star Survey // Ph.D. Thesis, 1993, University of Cape Town, South Africa
- Kurtz D. W., Martinez P. Discovery of 10.2-minute Oscillations in the Ap Sr (EuCr) Star HD 185256 // Information Bulletin on Variable Stars, 1995, No. 4209, #1
- Elkin V. G., Kurtz D. W., Worters H. L., Mathys G., Smalley B. The discovery of rapid oscillations in the magnetic Ap stars HD 69013 and HD 96237 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, Volume 411, Issue 2, pp. 978-982

- Elkin V. G., Kurtz D. W., Mathys G., Freyhammer L. M. The discovery of two new rapidly oscillating Ap stars, HD92499 and HD143487 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2010, Volume 404, Issue 1, pp. L104-L108
- 10.Balmforth N. J., Cunha M. S., Dolez N., Gough D. O., Vauclair S. On the excitation mechanism in roAp stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2001, Volume 323, Issue 2, pp. 362-372
- 11.Kurtz D. W., Martinez P. Observing roAp Stars with WET: A Primer // Baltic Astronomy, 2000, v.9, p.253-353
- 12.Kochukhov O. Pulsation in the atmosphere of roAp stars // Communications in Asteroseismology, 2008, Vol.157, p. 228-233
- 13.Saio H., Ryabchikova T., Sachkov M. Pulsations in the atmosphere of the roAp star HD24712 - II. Theoretical models // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, Volume 403, Issue 4, pp. 1729-1738
- 14.Ryabchikova T., Sachkov M., Kochukhov O., Lyashko D. Pulsation tomography of rapidly oscillating Ap stars. Resolving the third dimension in peculiar pulsating stellar atmospheres // Astronomy and Astrophysics, 2007, Volume 473, Issue 3, pp.907-922
- 15.Khomenko E., Kochukhov O. Simulations of Magnetoacoustic Pulsations in Atmospheres of Rapidly Oscillating Ap Stars // The Astrophysical Journal, 2009, Volume 704, Issue 2, pp. 1218-1238
- Cox J. P. Theory of Stellar Pulsation / Cox J. P. -Princeton University Press, 1980
- 17. Ledoux P., Walraven Th. Variable stars // Handbuch der Physik, 1958, Bd.
  51, Chapter IV, pp. 353 604
- 18.Landau L. D., Lifshitz E. M. Fluid mechanics //Pergamon Press, Oxford, 1966
- 19.Mkrtichian D. E., Hatzes A. P., Saio H., Shobbrook R. R. The detection of the rich p-mode spectrum and asteroseismology of Przybylski's star // Astronomy and Astrophysics, 2008, Volume 490, Issue 3, pp.1109-1120

- 20.Saio H., Gautschy A. Axisymmetric p-mode pulsations of stars with dipole magnetic fields // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2004, Volume 350, Issue 2, pp. 485-505
- 21.Kochukhov O. Indirect Imaging of Nonradial Pulsations in a Rapidly Oscillating Ap Star // The Astrophysical Journal, 2004, Volume 615, Issue 2, pp. L149-L152
- 22.Bigot L., Kurtz D. W. Theoretical light curves of dipole oscillations in roAp stars // Astronomy & Astrophysics, 2011, Volume 536, id.A73, 12 pp
- 23.Cunha M. S. A theoretical instability strip for rapidly oscillating Ap stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2002, Volume 333, Issue 1, pp. 47-54
- 24.Théado S., Dupret M.-A., Noels A., Ferguson J. W. New light on the driving mechanism in roAp stars. I. Effects of metallicity // Astronomy and Astrophysics, Volume 493, 2009, Issue 1, pp.159-174
- 25.Nelson M. J., Kreidl T. J. A seven-year northern sky survey of AP stars for rapid variability // Astronomical Journal, 1993, vol. 105, no. 5, p. 1903-1914
- 26.Martinez P., Kurtz D. W. The Cape rapidly oscillating Ap star survey. III. Null results of searches for high-overtone pulsation. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1994, Vol. Vol. 271, No. 1, p. 129 – 15
- 27.Balona L. A., Cunha M. S., Kurtz D. W., Brandão I. M., Gruberbauer M. Kepler observations of rapidly oscillating Ap, δ Scuti and γ Doradus pulsations in Ap stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, Volume 410, Issue 1, pp. 517-524
- 28.Hatzes A. P., Mkrtichian D. E. Radial velocity variations in pulsating Ap stars
   III. The discovery of 16.21-min oscillations in β CrB // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2004, Volume 351, Issue 2, pp. 663-666
- 29.Elkin V. G., Riley J. D., Cunha M. S., Kurtz D. W., Mathys G. The discovery of a luminous, rapidly oscillating Ap star, HD 116114, with a 21-minute pulsation period // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, Volume 358, Issue 2, pp. 665-670

- 30.Kochukhov O., Bagnulo S., Lo Curto G., Ryabchikova T. Discovery of very low amplitude 9-minute multiperiodic pulsations in the magnetic Ap star HD 75445 // Astronomy and Astrophysics, 2009, Volume 493, Issue 3, pp.L45-L48
- 31.Freyhammer L. M., Elkin V. G., Kurtz D. W., Mathys G., Martinez P. Discovery of 17 new sharp-lined Ap stars with magnetically resolved lines // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, Volume 389, Issue 1, pp. 441-460
- 32.Kochukhov O., Ryabchikova T., Weiss W. W., Landstreet J. D., Lyashko D. Line profile variations in rapidly oscillating Ap stars: resolution of the enigma // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, Volume 376, Issue 2, pp. 651-672
- 33.Kaiser A. Determination of Fundamental Parameters with Stroemgren Photometry // Astrophysics of Variable Stars, Pecs, Hungary, 5-10 September 2005, Sterken, C. and Aerts, C. (eds). ASP Conference Series, Vol. 349, p. 257. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2006
- 34.Moon T. T., Dworetsky M. M. Grids for the determination of effective temperature and surface gravity of B, A and F stars using uvby-beta photometry // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1985, vol. 217, p. 305-315
- 35.Napiwotzki R., Schoenberner D., Wenske V. On the determination of effective temperature and surface gravity of B, A, and F stars using Stromgren UVBY beta photometry // Astronomy and Astrophysics, 1993, vol. 268, no. 2, p. 653-666
- 36.Ryabchikova T., Kochukhov O., Kudryavtsev D., Romanyuk I., Semenko E. et al. HD 178892 - a cool Ap star with extremely strong magnetic field // Astronomy and Astrophysics, 2006, Volume 445, Issue 3, pp.L47-L50
- 37.Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., Stempels H. C., Weiss W. W. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // Astronomy and Astrophysics Supplement, 1999, v.138, p.119-133

- 38.Ryabchikova T., Sachkov M., Weiss W. W., Kallinger T., Kochukhov O. Pulsation in the atmosphere of the roAp star HD 24712. I. Spectroscopic observations and radial velocity measurements // Astronomy and Astrophysics, 2007, Volume 462, Issue 3, pp.1103-1112
- 39.Kochukhov O., Ryabchikova T. Time-resolved spectroscopy of the roAp star gamma Equ // Astronomy and Astrophysics, 2001, v.374, p.615-628
- 40.Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophysical Journal, 1982, Part 1, vol. 263, p. 835-853
- 41.Horne J. H., Baliunas S. L. A prescription for period analysis of unevenly sampled time series // Astrophysical Journal, 1986, Part 1, vol. 302, p. 757-763
- 42.Mathys G., Kharchenko N., Hubrig S. A kinematical study of rapidly oscillating AP stars // Astronomy and Astrophysics, 1996, v.311, p.901-910
- 43.Mathys G., Hubrig S., Landstreet J. D., Lanz T., Manfroid J. The mean magnetic field modulus of AP stars // A & A Supplement series, 1997, Vol. 123, 353-402
- 44.Shulyak D., Tsymbal V., Ryabchikova T., Stütz Ch., Weiss W. W. Line-byline opacity stellar model atmospheres // Astronomy and Astrophysics, 2004, v.428, p.993-1000
- 45.Holdsworth D. L. Detection of new pulsations in the roAp star HD 177765 // Information Bulletin on Variable Stars, 2016, No. 6185, #1
- 46.Biémont E., Palmeri P., Quinet P. A New Database of Astrophysical Interest // Astrophysics and Space Science, 1999, v. 269/270, p. 635-637
- 47.Raassen A. J. J., Uylings P. H. M. On the determination of the solar iron abundance using Fe II lines // Astronomy and Astrophysics, 1998, v.340, p.300-304
- 48.Castelli F., Kurucz R. L. New Fe II energy levels from stellar spectra // Astronomy and Astrophysics, 2010, Volume 520, id.A57, 30 pp

- 49.Lawler J. E., Wickliffe M. E., den Hartog E. A., Sneden C. Improved Laboratory Transition Parameters for Eu II and Application to the Solar Europium Elemental and Isotopic Composition // The Astrophysical Journal, 2001, Volume 563, Issue 2, pp. 1075-1088
- 50.Wyart J.-F., Tchang-Brillet W.-Ü. L., Churilov S. S., Ryabtsev A. N. Extended analysis of the Eu III spectrum // Astronomy and Astrophysics, 2008, Volume 483, Issue 1, 2008, pp.339-359
- 51.Wraight K. T., Fossati L., Netopil M., Paunzen E., Rode-Paunzen M. et al. A photometric study of chemically peculiar stars with the STEREO satellites
  I. Magnetic chemically peculiar stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, Volume 420, Issue 1, pp. 757-772
- 52.Hauck B., North P. Photometric properties of AP stars in the Geneva system // Astronomy and Astrophysics, 1982, vol. 114, no. 1, Oct. 1982, p. 23-40
- 53.Maitzen H. M., Vogt N. Photoelectric photometry of peculiar and related stars. II Delta-a-photometry of 339 southern Ap-stars // Astronomy and Astrophysics, 1983, vol. 123, no. 1, p. 48-60
- 54.Maitzen H. M., Paunzen E., Vogt N., Weiss W. W. Hβ photometry of southern CP2 stars: is the uvbybeta luminosity calibration also valid for peculiar stars?
  // Astronomy and Astrophysics, 2000, v.355, p.1003-1008
- 55.Martinez P., Koen C., Sullivan D. J. A frequency analysis of the p-mode pulsations of the AP SrEu(Cr) star HD 119027 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1998, Volume 300, Issue 1, pp. 188-192
- 56.Martinez P., Marang F., van Wyk F., Roberts G. R. A search for rotational photometric variability in the pulsating Ap star HD 119027 // The Observatory, 1998, vol. 118, p. 153-158
- 57.Shulyak D., Ryabchikova T., Kochukhov O. Fundamental parameters of bright Ap stars from wide-range energy distributions and advanced atmospheric models // Astronomy & Astrophysics, 2013, Volume 551, id. A14, 10 pp

- 58.Sachkov M., Kochukhov O., Ryabchikova T., Huber D., Leone F. et al. Pulsations in the atmosphere of the rapidly oscillating Ap star 10Aquilae // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, Volume 389, Issue 2, pp. 903-918
- 59.Hubrig S., Szeifert T., Schöller M., Mathys G., Kurtz D. W. New measurements of magnetic fields of roAp stars with FORS 1 at the VLT // Astronomy and Astrophysics, 2004, v.415, p.685-689
- 60.Hubrig S., Kharchenko N., Mathys G., North, P. Rapidly oscillating Ap stars versus non-oscillating Ap stars // Astronomy and Astrophysics, 2000, v.355, p.1031-1040
- 61.Elkin V. G., Kurtz D. W., Mathys G., Freyhammer L. M. The discovery of two new rapidly oscillating Ap stars, HD92499 and HD143487 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2010, Volume 404, Issue 1, pp. L104-L108
- 62.Kudryavtsev D. O., Romanyuk I. I., Elkin V. G., Paunzen E. New magnetic chemically peculiar stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, Volume 372, Issue 4, pp. 1804-1828
- 63.Elkin V. G., Kurtz D. W., Nitschelm C. Magnetic stars from a FEROS cool Ap star survey // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, Volume 420, Issue 3, pp. 2727-2735
- 64.Kurtz D. W., Elkin V. G., Cunha M. S., Mathys G., Hubrig S. The discovery of 8.0-min radial velocity variations in the strongly magnetic cool Ap star HD154708, a new roAp star // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, Volume 372, Issue 1, pp. 286-292
- 65.Elkin V. G., Kurtz D. W., Mathys G. The discovery of remarkable 5 kms<sup>-1</sup> pulsational radial velocity variations in the roAp star HD99563 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, Volume 364, Issue 3, pp. 864-872
- 66.Kochukhov O., Bagnulo S., Lo Curto G., Ryabchikova T. Discovery of very low amplitude 9-minute multiperiodic pulsations in the magnetic Ap star HD

75445 // Astronomy and Astrophysics, 2009, Volume 493, Issue 3, 2009, pp. L45-L48

- 67.Balona L. A., Cunha M. S., Kurtz D. W., Brandão I. M., Gruberbauer M. Kepler observations of rapidly oscillating Ap, δ Scuti and γ Doradus pulsations in Ap stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, Volume 410, Issue 1, pp. 517-524
- 68.Kochukhov O., Ryabchikova T., Bagnulo S., Lo Curto G. A search for very low amplitude magnetoacoustic pulsations with HARPS // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 2008, vol. 38, no. 2, p. 423-424
- 69.Gautschy A., Saio H., Harzenmoser H. How to drive roAp stars// Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1998, Volume 301, Issue 1, pp. 31-41
- 70.Saio H. A non-adiabatic analysis for axisymmetric pulsations of magnetic stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, Volume 360, Issue 3, pp. 1022-1032
- 71.Théado S., Dupret M.-A., Noels A., Ferguson J. W. New light on the driving mechanism in roAp stars. I. Effects of metallicity// Astronomy and Astrophysics, 2009, Volume 493, Issue 1, pp.159-174
- 72.Bruntt H., North J. R., Cunha M., Brandão I. M., Elkin V. G. et al. The fundamental parameters of the roAp star α Circini // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, Volume 386, Issue 4, pp. 2039-2046
- 73.Bruntt H., Kervella P., Mérand A., Brandão I. M., Bedding T. R. et al. The radius and effective temperature of the binary Ap star β CrB from CHARA/FLUOR and VLT/NACO observations // Astronomy and Astrophysics, 2010, Volume 512, id.A55, 7 pp
- 74.Perraut K., Borgniet S., Cunha M., Bigot L., Brandão I. et al. The fundamental parameters of the roAp star 10 Aquilae // Astronomy & Astrophysics, 2013, Volume 559, id.A21, 8 pp

- 75.Perraut K., Brandão I., Mourard D., Cunha M., Bério Ph. et al. The fundamental parameters of the roAp star γ Equulei // Astronomy and Astrophysics, 2011, Volume 526, id.A89, 6 pp
- 76.Kochukhov O., Shulyak D., Ryabchikova T. A self-consistent empirical model atmosphere, abundance and stratification analysis of the benchmark roAp star α Circini // Astronomy and Astrophysics, 2009, Volume 499, Issue 3, pp.851-863
- 77.Nesvacil N., Shulyak D., Ryabchikova T. A., Kochukhov O., Akberov A. et al. A self-consistent chemically stratified atmosphere model for the roAp star 10 Aquilae // Astronomy & Astrophysics, 2013, Volume 552, id.A28, 14 pp
- 78.Kochukhov O., Bagnulo S. Evolutionary state of magnetic chemically peculiar stars // Astronomy and Astrophysics, 2006, Volume 450, Issue 2, pp.763-775
- 79.Kurtz D. W., Cunha M. S., Saio H., Bigot L., Balona L. A. et al. The first evidence for multiple pulsation axes: a new rapidly oscillating Ap star in the Kepler field, KIC 10195926 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, Volume 414, Issue 3, pp. 2550-2566
- 80.Kurtz D. W., Elkin V. G., Mathys G. The detection of the very low amplitude 16.2-min pulsation in individual lines of first ionization stage of rare earth elements in the roAp star βCrB // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, Volume 380, Issue 2, pp. 741-748
- 81.Gruberbauer M., Saio H., Huber D., Kallinger T., Weiss W. W. et al. MOST photometry and modeling of the rapidly oscillating (roAp) star γ Equulei // Astronomy and Astrophysics, 2008, Volume 480, Issue 1, pp.223-232
- 82.Huber D., Saio H., Gruberbauer M., Weiss W. W., Rowe J. F. et al. MOST photometry of the roAp star 10 Aquilae // Astronomy and Astrophysics, 2008, Volume 483, Issue 1, pp.239-248
- 83.Bruntt H., Kurtz D. W., Cunha M. S., Brandão I. M., Handler G. et al. Asteroseismic analysis of the roAp star α Circini: 84d of high-precision

photometry from the WIRE satellite // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, Volume 396, Issue 2, pp. 1189-1201

- 84.Gough D. O., Tayler R. J. The influence of a magnetic field on Schwarzschild's criterion for convective instability in an ideally conducting fluid // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1966, Vol. 133, p.85
- 85.Balmforth N. J. Solar pulsational stability. I Pulsation-mode thermodynamics // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1992, vol. 255, p. 603-649
- 86.Shibahashi H., Saio H. Rapid oscillations of AP stars // Astronomical Society of Japan, Publications, 1985, vol. 37, no. 2, p. 245-259
- 87.Théado S., Vauclair S., Cunha M. S. Helium settling and mass loss in magnetic Ap stars. I. The chemical stratification // Astronomy and Astrophysics, 2005, Volume 443, Issue 2, pp.627-641
- 88.Sousa S. G., Cunha M. S. On mode conversion and wave reflection in magnetic Ap stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, Volume 386, Issue 1, pp. 531-542
- 89.Serenelli A. M., Basu S. Determining the Initial Helium Abundance of the Sun // The Astrophysical Journal, 2010, Volume 719, Issue 1, pp. 865-872
- 90.Grevesse N., Noels A. Cosmic abundances of the elements // Symposium in Honour of Hubert Reeves' 60th birthday: Origin and evolution of the elements, 1993, p. 15 – 25
- 91.Ryabchikova T. A., Adelman S. J., Weiss W. W., Kuschnig R. Abundance analysis of roAp stars. III. γ Equulei // Astronomy and Astrophysics, 1997, v.322, p.234-241
- 92.Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of the solar chromosphere.
  III Models of the EUV brightness components of the quiet-sun // Astrophysical Journal Supplement Series, 1981, vol. 45, p. 635-725
- 93.Antoci V., Cunha M., Houdek G., Kjeldsen H., Trampedach R. et al. The Role of Turbulent Pressure as a Coherent Pulsational Driving Mechanism: The

Case of the  $\delta$  Scuti Star HD 187547 // The Astrophysical Journal, 2014, Volume 796, Issue 2, id. 118, 8 pp.

- 94.Kurtz D. W., Cameron C., Cunha M. S., Dolez N., Vauclair G. et al. Pushing the ground-based limit: 14-μmag photometric precision with the definitive Whole Earth Telescope asteroseismic data set for the rapidly oscillating Ap star HR1217 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, Volume 358, Issue 2, pp. 651-664
- 95.Sachkov M., Hareter M., Ryabchikova T., Wade G., Kochukhov O. et al. Pulsations in the atmosphere of the rapidly oscillating star 33 Lib // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, Volume 416, Issue 4, pp. 2669-2677
- 96.Shulyak D., Ryabchikova T., Mashonkina L., Kochukhov O. Model atmospheres of chemically peculiar stars. Self-consistent empirical stratified model of HD 24712 // Astronomy and Astrophysics, 2009, Volume 499, Issue 3, 2009, pp. 879-890









