

На правах рукописи

Алентьев Дмитрий Викторович

**ПОИСК БЫСТРЫХ ПУЛЬСАЦИЙ
В АТМОСФЕРАХ ХОЛОДНЫХ АР ЗВЕЗД**
01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва

2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент, старший научный сотрудник
Цымбал Вадим Вячеславович

Официальные оппоненты: кандидат физико-математических наук,
Пахомов Юрий Васильевич
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт Астрономии
Российской академии наук,
старший научный сотрудник

доктор физико-математических наук,
профессор
Панчук Владимир Евгеньевич
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук,
главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Крымская астрофизическая
обсерватория Российской академии наук»,
Республика Крым, пгт. Научный

Защита состоится 27 февраля 2018 г. в 15-00 на заседании диссертационного
совета Д 002.280.01 при Институте астрономии РАН по адресу: 119017, г.
Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии
РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>

Автореферат разослан _____ 2018г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 002.280.01

Чупина Н. В.

Общая характеристика работы

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 roAp 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 roAp 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 roAp 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 получить с помощью спектральных наблюдений. 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 экстракции и нормализации на континуум спектров, полученных на спектрографе UVES в «красном» режиме с центральной длиной волны $\lambda = 600$ 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 γ Ар 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 γ Ар звезд: HD 132205, HD 148593, HD 151860 и HD 177765.
- Показана схожесть химического состава звезды HD 177765 с другой γ Ар звездой β CrB, что в совокупности с самым длинным периодом $P = 23,6$ мин говорит о ее проэволюционировавшем статусе.

- Подтверждена γ Ar классификация обнаруженных ранее фотометрическим методом звезд HD 119027 и HD 185256
- Определены более точные значения амплитуд и периодов пульсаций известных γ Ar звезд HD 69013, HD 96237 и HD 143487.
- Показано отсутствие характерной для γ Ar переменности у звезд HD 5823, HD 178892 и HD185204, считавшимися кандидатами в γ Ar звезды.
- Показано, что основная теория возбуждения пульсаций (Balmforth N. J. et al, 2001) адекватно описывает динамику трех из четырех хорошо изученных γ Ar звезд: γ Eri, β CrB 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 длиной волны $\lambda = 600$ нм.
- Впервые открытая звезда HD 177765 с рекордным значением периода пульсаций расширила границы наблюдаемых периодов γ Ar звезд.
- Результаты частотного анализа и определенные фундаментальные параметры исследованных звезд могут помочь при дальнейшем описании внутризвездных процессов.
- Многократно наблюдаемые с помощью фотометрических наблюдений Ar звезды и не отождествленные как γ Ar, 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 длиной волны $\lambda = 600$ 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 γ Equ, β CrB 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.

1. 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
2. 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
3. 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 Ar 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 γ Ar звезд описан алгоритм выборки кандидатов на данные объекты, основанный на каталоге [1]. Приведен список кандидатов для дальнейшего исследования. Наблюдательный материал, состоящий из 723 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 приводится описание разработанной программы для экстракции и нормализации на континуум спектров UVES в «красном» режиме, составленной на основе развития программы [2]. В разделе 2.4.1 для определения фундаментальных 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 силы тяжести посредством описания профиля водородной 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 γ Ar 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 гоАр звезд период пульсаций - 23,6 мин. Для звезды HD 177765 определен химический состав, который схож с другой гоАр звездой β CrB [5], и оценены эффективная температура и ускорение силы тяжести по моделированию водородной линии H α . Для двух ранее известных, как фотометрические гоАр 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 гоАр 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 гоАр 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 α Cir, β CrB, 10Aql и γ Eri, 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 γ Ar звездах достаточно хорошо описывает только три (β CrB, 10Aql и γ Equ) из четырех звезд.

В заключении сформулированы основные результаты.

1. Разработан программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме вести экстракцию и обработку эшелле спектров спектрографа UVES в «красном» режиме с центральной длиной волны $\lambda = 600$ нм.
2. 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.
4. Показано, что среди всех известных γ Ar 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 γ Ar звезд HD 69013, HD 96237 и HD 143487 и подтверждена γ Ar классификация обнаруженных ранее фотометрическим методом звезд HD 119027 и HD 185256.

6. Показано отсутствие характерной для γ Ар переменности у звезд HD 5823, HD 178892 и HD185204, считавшимися кандидатами в γ Ар.
7. Результаты моделирования пульсаций звезд γ Equ, 10 Aql, β CrB и α Cir на основе общепринятой модели возбуждения пульсаций достаточно хорошо предсказывают наблюдаемые частоты трех γ Ар звезд γ Equ, 10 Aql и β CrB. В отличие от указанных звезд, частота пульсаций звезды α Cir 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 $H\alpha$, которые показывают пульсации.

Список цитированной литературы

1. Renson P., Manfroid J. // Catalogue of Ap, HgMn and Am stars // *Astronomy and Astrophysics*, 2009, Volume 498, Issue 3, pp.961-966
2. 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
3. Tsymbal V. // STARSP: A Software System For the Analysis of the Spectra of Normal Stars // *M.A.S.S.; Model Atmospheres and Spectrum Synthesis* ASP Conference Series, 1996, Vol. 108; ed. Saul J. Adelman; Friedrich Kupka; and Warner W. Weiss, p.198
4. 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
5. 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
6. Martinez P. // The Cape Oscillating Ap Star Survey // Ph.D. Thesis, 1993, University of Cape Town, South Africa
7. 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
8. Elkin V. G., Kurtz D. W., Woters 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

9. 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

Бесплатно

Алентьев Дмитрий Викторович

Поиск быстрых пульсаций в атмосферах холодных Ар звезд.

Заказ №_____ Уч. изд. л. – 1.0 Тираж 100

Типография