

На правах рукописи

Романовская Анна Михайловна

**Определение фундаментальных параметров
магнитных химически-пекулярных звезд
методами спектроскопии**

01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук.

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Рябчикова Татьяна Александровна, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института астрономии РАН, г. Москва

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н. Романюк Иосиф Иванович, заведующий лабораторией исследований звездного магнетизма ФГБУН Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН), п. Нижний Архыз
к.ф.-м.н., Потравнов Илья Сергеевич, старший научный сотрудник лаборатории инфракрасных методов в астрофизике ФГБУН Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН), г. Иркутск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Республика Крым, пгт. Научный

Защита состоится 21 февраля 2022 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

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

Автореферат разослан «24» декабря 2021 года.

Учёный секретарь диссертационного совета

Д 002.280.01, к.ф.-м.н.

Н. В. Чупина

Общая характеристика работы

Актуальность работы

С помощью космических миссий HIPPARCOS и GAIA удалось измерить с достаточной точностью расстояния и собственные движения около двух миллиардов звезд, что позволяет построить динамическую модель Вселенной. Для того, чтобы построить физико-динамическую модель Вселенной, необходимо знать фундаментальные характеристики звезд: радиусы, светимости, температуры, массы. Это уже гораздо более сложная и трудоемкая задача. При известных расстояниях самым быстрым способом определения фундаментальных параметров является использование калибровок различных фотометрических систем. Как правило, калибровки строятся по наблюдениям звезд с известными параметрами, определенными различными, в том числе прямыми методами измерений, причем используется либо солнечная металличность, либо металличность масштабируемая с содержанием на Солнце. Однако, существует группа звезд - магнитных химически-пекулярных Ар-звезд - для которых эти калибровки не подходят.

Ар-звезды принадлежат к группе звезд Главной Последовательности (ГП) спектральных классов от В5 до F5. Они отличаются наличием в их атмосферах глобальных магнитных полей преимущественно полоидального типа, интенсивность продольного компонента которых меняется в широких пределах от нескольких десятков гаусс до десятков килогаусс. Магнитные звезды также являются медленными ротаторами со скоростью вращения менее 100 км с^{-1} , предположительно из-за магнитного торможения. Ар-звезды имеют ту же массу, светимость и профили

линий водорода, что и нормальные звезды ГП с аналогичной температурой и солнечным глобальным химическим составом.

Наличие сильных магнитных полей существенно влияет на химический состав атмосферы у Ар-звезд. В спектрах этих звезд наблюдаются аномально интенсивные для соответствующего спектрального класса линии, анализ которых приводит к значениям содержаний некоторых химических элементов в их атмосферах, на порядки превышающие содержания в атмосфере Солнца. Наблюдаемые аномалии химического состава были объяснены Мишо [4] как результат диффузии элементов под действием противоположно направленных сил: гравитационного и радиационного давлений. Магнитные поля в атмосферах Ар-звезд стабилизируют атмосферу, благоприятствуя процессу диффузии. Разделение элементов приводит к созданию вертикальных градиентов химического состава (стратификация), которые могут создавать наблюдаемые аномалии в содержании.

Для редкоземельных элементов (РЗЭ), которые являются своеобразной 'визитной карточкой' Ар-звезд, теоретических расчетов диффузии нет, хотя наблюдения свидетельствуют о возможном наличии слоев с избытком этих элементов. Рябчикова и др. в работе [5] показали, что в холодных пекулярных звездах с температурой меньше 8000 К содержание редкоземельных элементов Pr и Nd, определенное по линиям второй стадии ионизации, на 1–2 порядка выше, чем по линиям первой стадии ионизации (РЗЭ-аномалия). В звездах горячее 8000 К РЗЭ-аномалия уменьшается почти до нуля. До настоящего времени детальное исследование редкоземельных элементов по двум стадиям ионизации было проведено для элементов Pr и Nd в атмосферах трех десятков звезд, в основном, в температурном диапазоне 6000–8500 К, что явно недо-

статочно для более полного представления о температурном поведении содержания редкоземельных элементов.

Аномальный химический состав вместе со стратификацией влияет на спектральное распределение энергии (Spectral energy distribution – SED) через поглощение в линиях, что может отличать его от SED у нормальных звезд. В магнитных звездах наличие магнитных полей и значительных индивидуальных аномалий химического состава требует детального изучения звездной химии, чтобы построить адекватную модель атмосферы, которая может наиболее точно описать наблюдаемое распределение энергии. Поэтому для анализа атмосфер Ар-звезд Д.В. Шуляком [6] была предложена самосогласованная процедура одновременного моделирования спектра и распределения потока, примененная для анализа атмосферы Ар-звезды HD 24712. Затем методика была использована в работе [7] для одной из ярчайших Ар-звезд α Cir. Этим методом были определены фундаментальные параметры еще нескольких Ар-звезд. В этом методе кроме параметров атмосферы: эффективной температуры T_{eff} , ускорения силы тяжести $\log g$, и металличности, также оценивается радиус звезды R/R_{\odot} .

Точность определения фундаментальных параметров, полученных спектроскопическими методами, определяется путем их сравнения с прямыми определениями радиуса (температуры и светимости) звезды с помощью интерферометрических наблюдений. Для осуществления этой задачи была выбрана эталонная группа Ар-звезд, интерферометрические наблюдения которых собраны в статье [8]. Выборка звезд в эталонную группу осуществлялась в соответствии с инструментальными ограничениями, которые требовали, чтобы звезды были яркими ($V^m < 6$) и с относительно высокими угловыми диаметрами > 0.2 mas. Одновремен-

но с интерферометрическими наблюдениями в рамках программы сопровождения был проведен спектроскопический анализ звезд эталонной группы. В эталонную группу было включено 14 звезд, для пяти из которых спектроскопический анализ был уже проведен. Поэтому одной из основных задач диссертации явилось проведение самосогласованного спектроскопического анализа оставшихся звезд эталонной группы, сравнение фундаментальных параметров звезд группы, полученных независимыми методами интерферометрии и спектроскопии, и оценка точности определения параметров по спектроскопии.

Цели диссертационной работы

1. Проведение самосогласованного спектроскопического анализа, оценка химического состава и получение значений фундаментальных параметров группы магнитных пекулярных звезд: HD 4778, HD 108662, HD 110066, HD 111133, HD 118022, HD 120198, HD 153882, HD 188041, HD 204411 и HD 220825. Определение их положения на диаграмме Герцшпрунга-Рассела.
2. Сравнение фундаментальных параметров, полученных методами спектроскопии, с прямыми измерениями радиусов звезд методами интерферометрии и оценка точности спектроскопических определений для использования их в исследованиях эволюции магнитных пекулярных звезд. Исследование эволюционных эффектов в группе Ar-звезд.
3. Исследование влияния стратификации химических элементов на наблюдаемые химические неоднородности на поверхности звезд.

4. Исследование факторов, влияющих на спектральное распределение энергии.
5. Увеличение количества исследуемых звезд в диапазоне эффективных температур 7000-10000 К для детального исследования температурной зависимости РЗЭ-аномалий не только для Pr и Nd, но для Ce и Eu.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Определены фундаментальные параметры звезд HD 4778, HD 108662, HD 110066, HD 111133, HD 118022, HD 120198, HD 153882, HD 188041, HD 204411 и HD 220825 методом спектроскопии с учетом аномального химического состава и стратификации.
2. Показано, что спектроскопический анализ, т.е. непрямой метод определения фундаментальных параметров - позволяет получить параметры с точностью, сравнимой с интерферометрическими определениями, что дает возможность расширить границы определений точных параметров для слабых по яркости объектов, для которых интерферометрические наблюдения пока невозможны.
3. Результаты исследования факторов (поверхностная неоднородность химического состава, стратификация элементов), влияющих на SED показали, что переменность потока соответствует изменению эффективной температуры ± 100 К, что является типичной ошибкой определения для Ar-звезд самосогласованным методом спектроскопии и ниже ошибки определения температуры по фотометрии.

4. Исследование изменения положения скачка содержания элементов по глубине (стратификации) элементов Fe, Sr и Ca с фазой вращения показало, что поверхностная неоднородность химического состава Ар-звезд может быть вызвана изменением профилей стратификации. Это, вероятно, связано со структурой магнитного поля, поскольку изменение положения скачка коррелирует с изменением величины магнитного поля.
5. Впервые получено различие в содержаниях Ce и Eu, определенных отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации (аномалия). Поведение Ce-аномалии указывает на резкое уменьшение аномалии с ростом температуры, однако падение сдвинуто в сторону более высоких температур по сравнению с Pr и Nd. Для Eu получено постепенное уменьшение наблюдаемой аномалии с ростом эффективной температуры. На расширенной выборке звезд подтверждено наличие аномалии редкоземельных элементов Pr и Nd, которое впервые было получено Коули и Бордом [9] и расширено Рябчиковой [5]. Полученные результаты свидетельствуют об одинаковом характере стратификации РЗЭ в атмосферах Ар-звезд.

Научная новизна

Следующие результаты получены впервые:

1. Проведен детальный анализ атмосфер звезд HD 4778, HD 108662, HD 110066, HD 111133, HD 118022, HD 120198, HD 153882, HD 188041, HD 204411 и HD 220825 методом спектроскопии с использованием спектров высокого разрешения и отношения сигнала к шуму. Про-

ведено исследование стратификации Fe, Cr и Ca для группы звезд, и ее влияние на спектральное распределение энергии.

2. Показано, что спектроскопический метод определения фундаментальных параметров сравним по точности с прямыми методами измерений, основанных на интерферометрии. Это позволяет расширить границы определений точных параметров для слабых по яркости объектов, для которых интерферометрические наблюдения пока невозможны.
3. На примере звезд HD 118022 и HD 220825 впервые проведено исследование влияния поверхностной неоднородности химического состава на определение параметров атмосферы. Показано, что наблюдаемая переменность потока из-за неоднородного распределения химических элементов по поверхности звезды соответствует изменению эффективной температуры ± 100 К, что является типичной ошибкой определения для Ар-звезд самосогласованным методом спектроскопии и ниже ошибки определения температуры по фотометрии. Это позволяет использовать одну эффективную температуру для моделирования атмосферы звезды. Для звезды HD 120198 обнаружен эффект непрозрачности, обусловленный фотоионизацией Si I на $\lambda_{thr} = 1520\text{\AA}$.
4. Исследование изменения стратификации элементов Fe, Cr и Ca с фазой вращения показало, что поверхностная неоднородность химического состава Ар-звезд может быть вызвана изменением профилей стратификации (изменение положения скачка содержания элементов по глубине). Это, вероятно, связано со структурой маг-

нитного поля, поскольку изменение положения скачка коррелирует с изменением величины магнитного поля.

5. Впервые получено различие в содержаниях Се и Еu, определенных отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации (аномалия). Поведение Се-аномалии указывает на резкое уменьшение аномалии с ростом температуры, однако падение сдвинуто в сторону более высоких температур по сравнению с Pr и Nd. Для Еu получено постепенное уменьшение наблюдаемой аномалии с ростом эффективной температуры. На расширенной выборке звезд подтверждено наличие аномалии редкоземельных элементов Pr и Nd, которое впервые было получено Коули и Бордом [9] и расширено Рябчиковой [5]. Полученные результаты свидетельствуют об одинаковом характере стратификации РЗЭ в атмосферах Ар-звезд.

Научная и практическая значимость

Результаты диссертационной работы показывают, что спектроскопические наблюдения, т.е. непрямой метод определения фундаментальных параметров - позволяют определять параметры с точностью, сравнимой с интерферометрическими определениями. Это позволяет расширить границы определений точных параметров для слабых по яркости объектов, для которых интерферометрические наблюдения пока невозможны. Тем не менее, сравнение с фундаментальными параметрами, полученными по фотометрическим калибровкам, показало, что несмотря на более низкую точность фотометрического метода, его можно использовать для статистических исследований. Исследование влияния поверхностной неоднородности химического состава, типичной для Ар-звезд,

на выходящий поток показало, что переменность потока соответствует изменению эффективной температуры ± 100 К, что является типичной ошибкой определения фундаментальных параметров для Ар звезд в самосогласованном методе спектроскопии. Этот результат позволяет использовать одну эффективную температуру для исследования Ар-звезд, несмотря на химическую неоднородность их поверхности.

Методология и методы исследования

Задачи диссертации решались при помощи следующего программного обеспечения: ATLAS9 [10], LLmodels [11], BinMag6 [14], Synmast [12], DdaFit [11]. Использовались базы данных VALD3 [13] и Simbad (URL: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>).

Достоверность представленных результатов

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов определения фундаментальных параметров магнитных химически-пекулярных Ар-звезд подтверждается сравнением с теоретическими и наблюдательными данными других авторов и обсуждением полученных результатов на конференциях и семинарах. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Апробация работы

Результаты диссертации были представлены на конференциях в качестве устных и стендовых докладов.

- Международные конференции:

1. “14th Summer School on Modern Astrophysics”, г. Москва, Рос-

сия, 02-13 июля 2018 г.

2. “Physics of Magnetic Stars” Special Astrophysical Observatory, Russia 1–5 October, 2018.
3. XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии в секции “The Periodic Table through Space and Time”, г. Санкт-Петербург, 10-13 сентября 2019 г.
4. “Physics of stars and planets: atmospheres, activity and magnetic fields”, Shamakhy, Azerbaijan, September 16-20, 2019 г.
5. “OBA stars: Variability and Magnetic Fields”, St. Petersburg State University, 26-30 апреля 2021 г.

- Всероссийские конференции:

1. ВАК-2017, Ялта, 17-22 сентября, 2017 г.
2. “Наземная астрономия в России. XXI век”, САО РАН, 21-25 сентября 2020 г.
3. ВАК-2021, Москва, 23-28 августа, 2021 г.
4. Студенческие научные конференции “Физика Космоса”, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2017, 2018, 2019, 2020 гг.

Личный вклад автора Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают результаты, полученные соискателем. В работе 1 соискателем проведен подбор моделей атмосфер из фотометрических индексов и анализ содержания редкоземельных элементов

в атмосферах 26 магнитных звезд. В работах 2, 3, 4, 6 соискателем проведен анализ химического состава атмосфер исследуемых звезд и анализ стратификации элементов Fe, Cг и Ca. Также в работе 5 дополнительно выполнен расчет болометрических потоков для эталонной выборки звезд, и предоставлены данные для сравнения с интерферометрическими параметрами. В работе 6 соискателем выполнен анализ факторов, влияющих на спектральное распределение энергии.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из Введения, трех глав и заключения. Число страниц в диссертации 139, рисунков 42, таблиц 15. Список литературы содержит 150 наименований. По теме диссертации опубликовано 14 работ, из них 6 входит в перечень ВАК.

Содержание работы

Во Введении описана актуальность диссертационной работы, описаны объекты исследования, представлены цели, задачи и новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлена информация по апробации результатов, научным публикациям по результатам исследований соискателя и его вкладу и описано содержание диссертационной работы.

В главе 1 “Фундаментальные параметры выборки Ар-звезд” изложен метод определения фундаментальных параметров по спектроскопии. Представлены результаты определения фундаментальных параметров атмосфер следующих звезд: HD 4778, HD 108662, HD 110066, HD 111133, HD 118022, HD 120198, HD 153882, HD 188041, HD 220825 методом спек-

троскопии.

Моделирование атмосфер проводилось с учетом аномального химического состава их атмосфер и стратификации элементов Fe и Cr по глубине атмосферы. Фундаментальные параметры звезд (эффективная температура T_{eff} , светимость L/L_{\odot} , радиус R/R_{\odot}) получены из подгонки теоретического спектрального распределения энергии (SED) к наблюдаемому. Процесс итерационный и на каждой итерации пересчитывается химический состав и стратификация. Зная расстояние, при процедуре сравнения теоретического распределения энергии с наблюдаемым мы варьируем только параметры атмосферы (T_{eff} , $\log g$) и радиус звезды.

Стартовые параметры атмосфер были взяты из литературных источников и определялись по фотометрическим калибровкам.

Получены содержания для 36-ти элементов, значения содержаний для элементов вплоть до Ba были получены по линиям нейтральных атомов и первых ионов, а для редкоземельных элементов (РЗЭ) мы использовали линии первых и вторых ионов. Для 9-ти звезд за исключением HD 204411 получена типичная картина аномалий Ar-звезд типа SrCrEu: в атмосферах Ar-звезд наблюдается дефицит легких элементов CNO по сравнению с солнечными значениями, завышенное содержание элементов железной группы, особенно Cr и Sr, а Ni, наоборот, показывает практически солнечное содержание и значительный избыток редкоземельных элементов на 3–4 dex. У звезды HD 204411 наблюдается несколько иная картина: дефицит CNO такой же, содержание элементов железного пика практически солнечное, а РЗЭ близки к солнечным.

При расчете стратификации использовалась ступенчатая модель распределения элемента по глубине атмосферы. Стратификационный анализ был начат с химически-однородной атмосферы с одинаковыми

содержаниями как для нижних, так и для верхних слоев атмосферы, которые затем варьируются вместе с другими параметрами (положение и ширина скачка содержания) для достижения наилучшего согласия между рассчитанными и наблюдаемыми профилями спектральных линий. Сильный скачок содержания наблюдается в основном у холодных звезд (6000–8000 К), причем с увеличением эффективной температуры T_{eff} скачок содержания уменьшается и смещается в верхние слои атмосферы. В результате, удалось провести анализ стратификации Fe, Cr для звезд HD 108662, HD 110066, HD 111133, HD 118022, HD 153882, HD 188041, HD 204411. Для остальных звезд (HD 4778, HD 120198, HD 220825) из-за высокой T_{eff} и $v \sin i$ стратификацию корректно определить не удалось и модели атмосфер рассчитывались только с учетом аномального химического состава.

Сравнение параметров, полученных методами спектроскопии и интерферометрии, показывает довольно хорошее согласие между ними для всех звезд: спектральные радиусы в среднем на 5% меньше интерферометрических, что находится в пределах 2σ интерферометрических измерений. Светимости согласуются даже лучше. Однако для звезд с $T_{\text{eff}} > 9000$ К спектроскопические температуры значительно больше интерферометрических (Рис. 1). Одна из возможных причин разброса T_{eff} может быть в точности оценки радиусов. Радиус и температура связаны законом Стефана-Больцмана, поэтому при постоянном потоке изменение радиусов будет соответствовать $(R_{\text{spec}} - R_{\text{interf}}) \sim (T_{\text{spec}} - T_{\text{interf}})^{-2}$. Мы заметили, что разница между спектроскопическими и интерферометрическими определениями радиусов заметно больше для звезд с малыми угловыми диаметрами $\theta < 0.3$ mas, что очень близко к текущему инструментальному пределу интерферометрических измерений. Исклю-

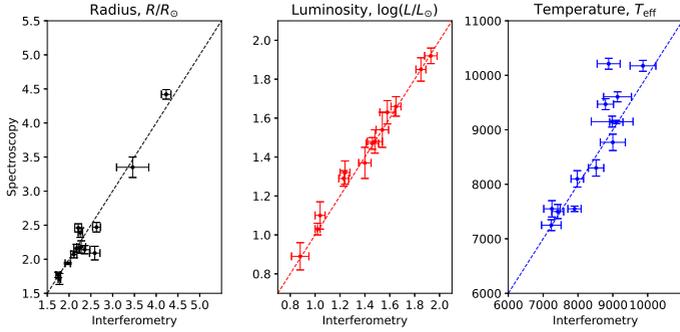


Рис. 1. Сравнение радиусов, светимости и эффективных температур, полученных методами спектроскопии интерферометрии.

чение составляет HD 220825, у которой интерферометрический и спектроскопический радиусы примерно одинаковы, но отсутствуют данные в УФ области, что влияет на определение интегрального потока. Поэтому определение параметров по спектроскопии более точное, поскольку в данном методе используется не интегральный поток, а происходит подгонка к наблюдаемому распределению энергии.

В главе 2 “Факторы, влияющие на спектральное распределение энергии” изложен анализ влияния фазовой переменности, вызванной химической неоднородностью поверхности, на SED для звезд HD 220825 и HD 118022. Для данных звезд были доступна спектрофотометрия, а также для HD 118022 спектры в разных фаз вращения, поэтому мы смогли исследовать возможные влияния неоднородного химического состава на SED.

Для оценки влияния изменения потока, вызванного пятнами поверхностного содержания для звезды HD 220825, были использованы усредненные спектрофотометрические данные (черные закрашенные круж-

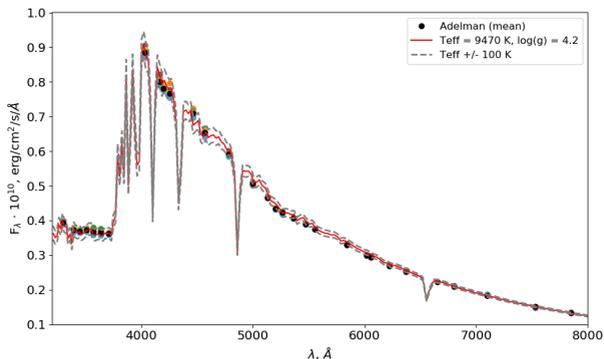


Рис. 2. Сравнение наблюдаемых спектрофотометрических данных Адельмана (цветные символы) и теоретического спектрального распределения энергии для HD 220825. Сплошная красная линия показывает теоретическое распределение энергии, рассчитанное для окончательной самосогласованной модели атмосферы HD 220825 с параметрами $T_{\text{eff}} = 9470$ К и $\log g = 4.2$. Серые пунктирные линии иллюстрируют эффект изменения T_{eff} на ± 100 К. Усредненные спектрофотометрические данные представлены закрашенными черными кружками.

ки) вместе со данными, полученными в разных фазах (закрашенные закрашенные кружки) на рис. 2. Мы сравнили наблюдения и рассчитанную теоретическую SED с окончательно принятыми параметрами для HD 220825: $T_{\text{eff}} = 9470$ и $\log g = 4.2$. Чтобы оценить влияние переменности на определение параметров, мы рассчитали модели с параметрами $T_{\text{eff}} = 9470(100)$ К и $\log g = 3.8, 4.0$. Видно, что вариаций температуры в пределах ± 100 К достаточно для описания наблюдений во всех фазах вращения. В то же время изменение $\log g$ мало влияет на SED. Таким образом, мы заключаем, что вариации потока, вызванные неоднородностью поверхности, приводят к изменению температуры в пределах ± 100 К, что является типичной ошибкой в оценках температуры Арзвезд методом спектроскопии.

Было исследовано вертикальное распределение содержания Fe, Cr, Ca для 8-ми фаз вращения магнитной Ar-звезды 78 Vir (HD 118022). Основные изменения наблюдаются в содержании железа, хрома и кальция в верхних слоях атмосферы и в положении скачка содержания элементов, что, по-видимому, коррелирует с экстремумами продольного магнитного поля. Представляется маловероятным, что небольшие изменения поверхностного содержания элементов могут быть вызваны изменением только содержания в верхних слоях атмосферы, поскольку оба изменения происходят скорее в противофазе. Однако положение скачка изменяется синхронно с поверхностным изменением химического состава: содержание увеличивается – граница скачка смещается выше в атмосфере и наоборот.

В двух фазах вращения в экстремумах магнитного поля было исследовано влияние полученного химического состава для данных фаз на спектральное распределение энергии. В целом, картина стратификации осталась прежней. Как и в случае звезды HD 220825, изменение T_{eff} в пределах ± 100 К позволяет описать наблюдаемое распределение энергии в фазах экстремума магнитного поля и химического состава.

Можно сделать вывод, что для Ar звезд достаточно использовать одну модель атмосферы для всей поверхности звезды.

В главе 3 “Исследование зависимости содержания редкоземельных элементов от эффективной температуры и магнитного поля в Ar-звездах” приводится исследование зависимости CePrNdEu-аномалий (различия в содержаниях элемента, определенных отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации) от эффективной температуры для 26 магнитных химически-пекулярных звезд.

Результаты нашего исследования показывают, что с ростом темпе-

ратуры как РЗЭ-аномалии, так и сами содержания резко уменьшаются, приближаясь к ионизационному равновесию при $T_{\text{eff}} \sim 8500\text{--}9500$ К. В целом подтверждается полученное ранее для элементов Pr и Nd ступенчатое падение наблюдаемых аномалий в области эффективных температур 8000–9000 К. Наилучшее согласие получено для Nd, поскольку этот элемент имеет достаточное количество надежных линий первых и вторых ионов в оптической области. Для Pr часть наших результатов следует ступенчатому уменьшению с ростом температуры, однако, большая часть звезд показывает не ступенчатое, а более плавное уменьшение Pr-аномалии с температурой. Впервые полученное температурное поведение Ce-аномалии также указывает на ступенчатое уменьшение этой аномалии с ростом температуры, однако, резкое падение сдвинуто в сторону более высоких температур по сравнению с Nd. Для Eu мы получили постепенное уменьшение наблюдаемой аномалии с ростом эффективной температуры, что согласуется с небольшим количеством наблюдательных данных, полученных ранее.

Для наиболее изученного элемента Nd также получено уменьшение Nd-аномалии с ростом величины магнитного поля для холодных звезд. Для горячих звезд Nd-аномалия отсутствует в широком диапазоне величины магнитного поля. Поскольку наличие аномалий в холодных Ar-звездах связано с концентрацией РЗЭ-элементов в верхних слоях атмосферы [15], то с ростом эффективной температуры и магнитного поля нижняя граница слоя РЗЭ, по-видимому, опускается в более глубокие слои, что приводит к исчезновению аномалий. Обнаружена антикорреляция между содержаниями элементов железного пика и редкоземельных элементов, которая служит дополнительным свидетельством различной стратификации этих элементов в атмосферах Ar-звезд.

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы. Даны рекомендации для дальнейшего развития темы диссертации.

В **Приложении 1** представлены дополнительные материалы по Главе 1.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Рябчикова Т.А., **Романовская А.М.** “Исследование зависимости содержания редкоземельных элементов от эффективной температуры и магнитного поля в атмосферах химически-пекулярных (Ap) звезд”. Письма в *Астрономический журнал*, том 43, № 4, с. 286–298, (2017).
2. **Romanovskaya A.**, Ryabchikova T., Shulyak D., Perraut K., Valyavin G., Burlakova T., Galazutdinov G. “Fundamental parameters and evolutionary status of the magnetic chemically peculiar stars HD 188041 (V1291 Aquilae), HD 111133 (EP Virginis), and HD 204411: spectroscopy versus interferometry”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488, 2343, (2019).
3. **A. M. Romanovskaya**, T. A. Ryabchikova, D. Shulyak. “The cause of surface inhomogeneities in the atmosphere of Ap star 78 Vir”. In *Proceedings of the conference "Physics of Magnetic Stars I.I. Romanyuk, I.A. Yakunin and D.O. Kudryavtsev eds, Astronomical Society of the Pacific (San Francisco, USA), ASP Conf. Ser., v. 518, p. 173–179, (2019).*

4. **Романовская А. М.**, Рябчикова Т. А., Шуляк Д. В. “Эволюционный статус Ар-звезд HD 110066 и HD 153882”. Письма в Астрономический журнал, т. 46, с. 353–365, (2020).
5. Perraut K., Cunha M., **Romanovskaya A.**, Shulyak D., Ryabchikova T., Hocdé V., Nardetto N., Mourard D., Meilland A., Morand F., Tallon-Bosc I., Farrington C., Lanthermann C. “Benchmarking the fundamental parameters of Ap stars with optical long-baseline interferometric measurements”. *Astronomy & Astrophysics*, v. 642, p. A101, (2020).
6. **Romanovskaya A. M.**, Shulyak D. V., Ryabchikova T. A., Sitnova T. M. “Fundamental parameters of Ap-stars GO And, 84 UMa and κ Psc.”. *Astronomy & Astrophysics*, v. 655, p. A106, (2021).

Другие публикации автора по теме диссертации

1. **Романовская А.М.**, Рябчикова Т.А. “Аномалии химического состава и стратификация элементов в атмосферах Ар-звезд HD 188041 и HD 111133”. Сборник трудов мемориальной конференции 2018г., посвященной памяти академика А.А. Боярчука, Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2018г.). - Москва: Изд-во Янус-К, - 2018. - С. 29.
2. **Романовская А.М.**, Шуляк Д.В. “Химический состав и стратификация в атмосфере Ар-звезды HD 110066 (АХ CVn)”. Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2019г.). - Москва: Изд-во Янус-К, - 2019. - С. 149.
3. **Романовская А.М.**, Рябчикова Т.А., Шуляк Д.В. “Фундаментальные параметры Ар-звезды HD 108662”. Научные труды Института

Астрономии РАН, том 5, стр. 219-223 (2020)

4. Рябчикова Т.А., **Романовская А.М.** “Стратификация химических элементов в атмосфере магнитной пекулярной (Ap) звезды HD 188041”. Физика Космоса: Труды 46-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 30 янв.-3 февр. 2017 г.) - Екатеринбург. Изд-во Урал. Ун-та. - 2017. - С. 194.
5. Рябчикова Т.А., **Романовская А.М.**, Шуляк Д.В. “Определение фундаментальных параметров CP-звезд методами спектроскопии: сравнение с данными интерферометрии”. Физика Космоса: Труды 47-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 29 янв.-2 февр. 2018 г.) - Екатеринбург. Изд-во Урал. Ун-та. - 2018. - С. 222.
6. **Романовская А.М.**, Рябчикова Т.А., Шуляк Д.В. “Изменение с фазой вращения вертикальной стратификации элементов Fe и Si в атмосфере Ap-звезды 78 Vir”. Физика Космоса: Труды 48-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 28 янв.-1 февр. 2019 г.) - Екатеринбург. Изд-во Урал. Ун-та. - 2019. - С. 192.
7. **Романовская А.М.** “Спектроскопия vs интерферометрия: сравнение радиусов CP-звезд”. Физика Космоса: Труды 49-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 27 - 31 янв. 2020 г.) - Екатеринбург. Изд-во Урал. Ун-та. - 2020. - С. 196.
8. **Romanovskaya A.M.**, Ryabchikova T.A., Shulyak D.V. “Fundamental parameters of Ap-stars 78 Vir (HD 118022) and AX CVn (HD 110066)”. *Astronomical Journal of Azerbaijan*, V. 15, № 1, p. 39-44 (2020).

Цитируемая литература

1. *Ramírez, Iván & Meléndez (2005)* The Effective Temperature Scale of FGK Stars. II. T_{eff} :Color:[Fe/H] Calibrations // *Astrophys. J* — 2005. — V. 626. — Pp. 465-485.
2. *Balona (1994)* Effective Temperature Bolometric Correction and Mass Calibration of O-F // *Astron. and Astrophys* — 1994. — V. 268. — P. 119.
3. *Napiwotzki, Schoenberner, Wenske (1993)* On the determination of effective temperature and surface gravity of B, A, and F stars using Stromgren UBVY beta photometry // *Astron. and Astrophys* — 1993. — V. 268. — Pp. 653-666.
4. *Michaud (1970)* Diffusion Processes in Peculiar a Stars // *Astrophys. J* — 1970. — V. 160. — P. 641.
5. *Ryabchikova et al. (2004)* The spectroscopic signature of roAp stars // *Astron. and Astrophys* — 2004. — V. 423. — Pp. 705-715.
6. *Shulyak, Ryabchikova, Mashonkina & Kochukhov (2009)* Model atmospheres of chemically peculiar stars. Self-consistent empirical stratified model of HD 24712 // *Astron. and Astrophys* — 2009. — V. 499. — Pp. 879-890.
7. *Kochukhov, Shulyak & Ryabchikova (2009)* A self-consistent empirical model atmosphere, abundance and stratification analysis of the benchmark roAp star α Circini // *Astron. and Astrophys* — 2009. — V. 499. — Pp. 851-863.
8. *Perraut et al. (2020)* Benchmarking the fundamental parameters of Ap stars with optical long-baseline interferometric measurements // *Astron. and Astrophys* — 2020. — V. 642. — P. A101.

9. *Cowley and Bord (1998)* The Third Spectrum of Neodymium: Applications to HR 6870 and Gamma Equulei // *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* — 1998. — V. 143. — P. 346.
10. *Kurucz (1993)* ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid // *ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid. Kurucz CD-ROM No. 13. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory* — 1993. — V. 13.
11. *Ryabchikova, Leone, Kochukhov (2005)* Abundances and chemical stratification analysis in the atmosphere of Cr-type Ap star HD 204411 // *Astron. and Astrophys* — 2005. — V. 438. — Pp. 973-985.
12. *Kochukhov (2007)* Spectrum synthesis for magnetic, chemically stratified stellar atmospheres // *Physics of Magnetic Stars* / Ed. by I.I. Romanyuk, D.O. Kudryavtsev, O.M. Neizvestnaya, V.M. Shapoval. — 2007. — Pp. 109-118.
13. *Ryabchikova et al. (2015)* A major upgrade of the VALD database // *Physica Scripta* — 2015. — V. 90. — P. 054005.
14. *Kochukhov (2018)* BinMag: Widget for comparing stellar observed with theoretical spectra // *Software, Astrophysics Source Code Library* — 2018.
15. *Mashonkina, Ryabchikova, & Ryabtsev (2005)* NLTE ionization equilibrium of Nd II and Nd III in cool A and Ap stars // *Astron. and Astrophys* — 2005. — V. 441. — Pp. 309-318.

Благодарности

Диссертантка выражает благодарность Т.А. Рябчиковой за научное руководство, а также благодарит своих коллег и соавторов, в особенности Д.В. Шуляка, Ю.В. Пахомова, Т.М. Ситнову, за помощь в работе и

плодотворное сотрудничество.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-32-90147, работа частично поддержана программой КП19-270 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований". В данной работе использовались базы данных Vizier и VALD.