

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 524.523

Романовская Анна Михайловна

Определение фундаментальных параметров магнитных
химических пекулярных звезд методами спектроскопии

01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д.ф.-м.н. Т.А. Рябчикова

Москва – 2020

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Фундаментальные параметры выборки Ар-звезд.	22
1.1 Литературные данные исследуемых звезд	22
1.2 Наблюдения	23
1.3 Метод определения фундаментальных параметров	25
1.4 Построение моделей атмосфер	27
1.4.1 Определение магнитного поля и скорости вращения звезд	27
1.5 Оценка содержания химических элементов	32
1.6 Исследование стратификации элементов Fe, Cr и Ca в атмо- сферах Ар-звезд	40
1.7 Определение фундаментальных параметров выборки Ар-звезд	48
1.7.1 Учет межзвездного покраснения, параллаксов звезд и построение спектального распределения энергии.	50
1.8 Сравнение фундаментальных параметров с интерферометри- ческими измерениями	55
1.9 Положение Ар-звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела . .	66
1.10 Положения, выносимые на защиту	69
Глава 2. Влияние различных факторов на спектральное рас- пределение энергии.	75
2.1 HD 220825	75
2.1.1 Влияние стратификации химических элементов на спектральное распределение энергии	75

2.1.2	Влияние неоднородности поверхностного содержания на определение фундаментальных параметров.	77
2.2	HD 120198	78
2.2.1	Влияние Si на спектральное распределение энергии .	78
2.3	HD 118022	80
2.3.1	Стратификация элементов в зависимости от фазы вращения звезды.	82
2.3.2	Влияние химического состава на SED.	84
2.4	Положения, выносимые на защиту	89

Глава 3. Исследование зависимости содержания редкоземельных элементов от эффективной температуры. 90

3.1	Выбор звезд исследования и описание наблюдательного материала	91
3.2	Определение параметров атмосфер	91
3.2.1	Эффективная температура и ускорение силы тяжести	91
3.2.2	Определение модуля напряженности магнитного поля, усредненного по поверхности звезды, и скорости вращения	93
3.3	Анализ содержания редкоземельных элементов	95
3.3.1	Определение содержания химических элементов методом расчета синтетического спектра по заданной модели атмосферы.	95
3.3.2	Зависимость содержания от эффективной температуры	96
3.3.3	Сравнение температурных зависимостей содержания редкоземельных элементов и элементов железного пика.	103
3.3.4	Зависимость РЗЭ-аномалий от магнитного поля.	105
3.4	Заключение	107
3.5	Положения, выносимые на защиту	109

Заключение	110
Приложение 1	114
Литература	119

Введение

Актуальность работы

Магнитные химически пекулярные (Ap) звезды принадлежат к группе звезд Главной Последовательности (ГП) спектральных классов от B5 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 [1] до десятков килогаусс (см. Каталог [2]). Самое сильное поверхностное магнитное поле (модуль усредненного по видимой части поверхности вектора магнитного поля) $\langle B_s \rangle = 34$ кГс было измерено Бэбкоком в спектре HD 215441 [3]. Магнитные звезды также являются медленными ротаторами со скоростью вращения менее 100 км с^{-1} , предположительно из-за магнитного торможения [4]. Ap-звезды имеют ту же массу, светимость и профили линий водорода, что и нормальные звезды ГП с аналогичной температурой.

Наличие сильных магнитных полей существенно влияет на химический состав атмосферы у Ap-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 изобилия были объяснены Мишо [5]. Атомная и ионная диффузия элемента происходит под действием сил гравитационного давления, направленных к центру звезды, и сил радиационного давления, выталкивающих частицы во внешние слои атмосферы. Магнитное поле стабилизирует атмосферу Ap-звезды и может напрямую влиять на диффузию химических элементов, в частности Fe и

Cr. Диффузия ионов изменяется, когда они движутся поперек магнитного поля, поэтому разница в диффузии нейтральных частиц и ионов считается основным механизмом создания поверхностных химических неоднородностей. Разделение элементов приводит к созданию вертикальных градиентов химического состава, которые могут создавать наблюдаемые аномалии в содержании. Расчеты диффузии некоторых элементов, в основном, легких элементов и элементов группы железа (Fe peak elements) показывают, что в результате этого процесса образуются неравномерные распределения химических элементов по глубине в атмосфере [6–8]. Расчеты подтверждают полученные из наблюдений распределения этих элементов в атмосферах нескольких Ar звезд, а также наблюдаемый рост средних по глубине содержаний Cr и Fe с эффективной температурой в диапазоне 6000-10000 К (см. например, обзоры [9, 10]). Поскольку процесс диффузии очень медленный, то в атмосферах нормальных звезд процессу разделения элементов в атмосфере препятствуют конвективные (в звездах с эффективными температурами менее 7000 К) и турбулентные движения (в более горячих атмосферах), а также меридиональная циркуляция при быстром вращении, типичном для звезд спектрального класса A и B. Магнитные поля в атмосферах Ar-звезд стабилизируют атмосферу, благоприятствуя процессу диффузии.

Для редкоземельных элементов (РЗЭ), которые являются своеобразной 'визитной карточкой' Ar-звезд, теоретических расчетов диффузии нет, хотя наблюдения свидетельствуют о возможном наличии слоев с избытком этих элементов. Рябчикова и др. в работе [11] 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 недостаточно для более полного представления о температурном поведении содержания редкоземельных элементов.

Исследования стратификации химических элементов методом спектральных наблюдений показали, что большинство элементов вплоть до Ba в основном концентрируются ближе к фотосфере (глубокие слои атмосферы) с резким уменьшением их содержания в верхних слоях [12]. Более тяжелые редкоземельные элементы (РЗЭ) сосредоточены в верхних слоях атмосферы звезды [13].

Наличие градиентов вертикального распределения химических элементов в атмосфере звезды проявляется в виде особенностей в наблюдаемом линейчатом спектре [14]. К числу основных особенностей относятся:

1. Невозможность описать наблюдаемый профиль сильных линий (ядро и крылья) в рамках химически-однородной атмосферы
2. Зависимость содержания, определяемого по индивидуальным линиям, от потенциала возбуждения, т.е. от глубины формирования линии
3. Нарушение ионизационного баланса (разное содержание элемента по линиям в разных стадиях ионизации). Картина химической стратификации зависит от эффективной температуры T_{eff} и напряженности магнитного поля $\langle B_s \rangle$ звезды [7, 8].

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 [15]. Для Ap-звезд стандартные фотометрические и спектроскопические калибровки, разработанные для определения фундаментальных параметров нормальных звезд, часто неприменимы. В магнитных звездах наличие магнитных полей и значительных индивидуальных аномалий химиче-

ского 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 была предложена самосогласованная процедура одновременного моделирования спектра и распределения потока Шуляком Д.В. в работе [12] для Ар-звезды HD 24712. Затем методика была использована в работе [16] для одной из ярчайших Ар-звезд α Cir. После этого этим методом были определены фундаментальные параметры еще нескольких Ар-звезд ([15, 17–19]). Успешность предложенного метода подтверждена прямыми измерениями радиусов пяти Ар-звезд с использованием интерферометрических наблюдений ([20–24]).

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 [25]. Одновременно с интерферометрическими наблюдениями в рамках программы сопровождения был проведен спектроскопический анализ звезд эталонной группы. В эталонную группу было включено 14 звезд. Автором диссертации проведен анализ для 8-ми звезд из эталонной выборки, а также проанализированы еще 2 звезды дополнительно.

Существуют различные точки зрения на эволюционный статус магнитных пекулярных звезд. Согласно работе [26], было исследовано положение 30 Ар-звезд с измеренными поверхностными магнитными полями на диаграмме Герцшпрунга-Рассела (ГР) и показано, что нет Ар-звезд с $M \leq 3M_{\odot}$, лежащих в первой половине ГП, т.е. магнитные поля у этих звезд появляются после значительного времени жизни на ГП. В этой работе эффективные температуры T_{eff} звезд определялись по калибровкам

Женевской и Стремгреновской фотометрических систем. Позднее, статистический анализ положения Ар-звезд на ГР-диаграмме был проведен в работе [27] на гораздо большей выборке звезд. Результаты этого анализа не подтвердили выводы [26] и, кроме того, была показана тенденция к уменьшению магнитного поля с возрастом звезды. Эффективные температуры для большинства звезд выборки были определены по калибровкам Женевской фотометрической системы [28]. Положение звезды на эволюционном треке определяется температурой T_{eff} и светимостью L , а, следовательно, радиусом R звезды. В обеих вышеуказанных работах при определении эффективной температуры индивидуальные аномалии, а также неоднородное распределение химических элементов по глубине атмосферы не учитывались. Спектроскопическое определение эффективной температуры и радиуса по наблюдаемому распределению энергии с учетом результатов детального анализа химического состава было сделано только для небольшого количества звезд (см. [18] и ссылки внутри).

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 точная спектроскопических определений для использования их в исследованиях эволюции магнитных пекулярных звезд. Исследование эволюционных эффектов в группе Ар-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.

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. Проведено исследование стратификации Fe, Cr и Ca для группы звезд, и ее влияние на спектральное распределение энергии.
2. Показано, что спектроскопический (косвенный) метод определения фундаментальных параметров (радиусов звезд) сравним по точности с прямыми методами измерений (интерферометрия). Это позволяет расширить границы определений точных параметров для слабых по яркости объектов, для которых интерферометрические наблюдения пока невозможны. Сравнение с фундаментальными параметрами, полученными по фотометрическим калибровкам, показало, что несмотря на более низкую точность фотометрического метода, его можно использовать для статистических исследований.

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 K, 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 обнаружено влияние содержания кремния на SED в ультрафиолетовой области спектра: заниженное содержания Si приводит к увеличению потока в области 1500\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 магнитного поля, поскольку изменение положения скачка коррелирует с изменением величины магнитного поля.
5. На расширенной выборке звезд подтверждено наличие аномалии редкоземельных элементов Pr и Nd, которое впервые было получено в работе [11]. Впервые получены подобные аномалии в содержании Ce и Eu. Температурное поведение Ce-аномалии (различие в содержаниях элемента, определенных отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации) указывает на резкое уменьшение этой аномалии с ростом температуры, однако падение сдвинуто в сторону более высоких температур по сравнению с Pr и Nd. Для Eu получено постепенное умень-

шение наблюдаемой аномалии с ростом эффективной температуры. 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 - описывают 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.

Положения, выносимые на защиту по результатам диссертационной работы

- 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.

- 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.
- Показано, что, несмотря на более низкую точность фотометрического метода, фундаментальные параметры, полученные по фотометрическим калибровкам, можно использовать для статистических исследований.
- 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 Ар-звезд самосогласованным методом спектроскопии и ниже ошибки определения температуры по фотометрии.
- 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 магнитного поля, поскольку изменение положения скачка коррелирует с изменением величины магнитного поля.
- На расширенной выборке звезд подтверждено наличие аномалии редкоземельных элементов Pr и Nd, которое впервые было получено в работе [11]. Впервые получены подобные аномалии в содержании Ce и

Eu. Температурное поведение Ce-аномалии (различие в содержаниях элемента, определенных отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации) указывает на резкое уменьшение этой 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. Полученные результаты свидетельствуют об одинаковом характере стратификации РЗЭ в атмосферах Ар-звезд.

Апробация работы

Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах и представлены как на российских, так и на зарубежных конференциях и семинарах.

- Результаты диссертации были представлены в качестве устных и стендовых докладов:
 - 46-ая студенческая научная конференция "Физика Космоса Ур-ФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 30 января - 03 февраля 2017 г, устный доклад "Стратификация химических элементов в атмосфере магнитной пекулярной (Ar) звезды HD 188041".
 - Всероссийская астрономическая конференция, ВАК-2017, Ялта, 17-22 сентября, 2017 г., устный доклад "Фундаментальные параметры CP-звезд методами спектроскопии: сравнение с данными интерферометрии".
 - 47-ая студенческая научная конференция "Физика Космоса г. Екатеринбург, Россия, 29 января - 02 февраля 2018 г., устный доклад "Определение фундаментальных параметров CP-звезд

- методами спектроскопии: сравнение с данными интерферометрии".
- 14th Summer School on Modern Astrophysics, г. Москва, Россия, 02-13 июля 2018 г. (<http://astrosoma.ru/index.php/student-talks>).
 - Международная конференция “Physics of Magnetic Stars” Special Astrophysical Observatory, Russia 1–5 October, 2018. Устный доклад "Is the surface chemical inhomogeneity in Ap stars caused by vertical stratification? The cases of Cr and Fe in 78 Vir".
 - 48-ая студенческая научная конференция "Физика Космоса г. Екатеринбург, Россия, 28 января - 01 февраля 2019 г., устный доклад "Изменение с фазой вращения вертикальной стратификации элементов Fe и Cr в атмосфере Ap-звезды 78 Vir".
 - XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии в секции "The Periodic Table through Space and Time г. Санкт-Петербург, 10-13 сентября 2019г. Постерный доклад "Abundances in atmospheres of Ap-stars: HD 188041 (V1291 Aql), HD 111133 (EP Vir), HD 118022 (78 Vir), HD 204411 and HD 110066 (AX CVn)".
 - Международная конференция "Physics of stars and planets: atmospheres, activity and magnetic fields Shamakhy, Azerbaijan, September 16-20, 2019. устный доклад "Fundamental parameters of Ap-stars 78 Vir (HD 118022) and AX CVn (HD 110066)".
 - 49-ая студенческая научная конференция "Физика Космоса г. Екатеринбург, Россия, 27 - 31 января 2020 г., устный доклад "Спектроскопия vs интерферометрия: сравнение радиусов CP-звезд".
 - Всероссийская конференция "Наземная астрономия в России. XXI век САО РАН, 21-25 сентября 2020 г., устный доклад "Сравнение фундаментальных параметров Ap-звезд, полученных по

- спектроскопии и по интерферометрии".
- Международная конференция "OBA stars: Variability and Magnetic Fields St. Petersburg State University, 26-30 апреля 2021 г., устный доклад "Comparison of the fundamental parameters of Ap stars HD 120198 and HD 220825 derived from spectroscopy and interferometry".
 - Всероссийская астрономическая конференция, ВАК-2021, Москва, 23-28 августа 2021 г., устный доклад "Сравнение фундаментальных параметров Ap-звезд, полученных по спектроскопии и интерферометрии".
 - На конкурсе молодых ученых Института астрономии РАН в ноябре 2017, 2018, 2019, 2020 гг., а также на астрофизических семинарах:
 - Конкурс молодых ученых ИНАСАН, 3.11.2017, доклад "Определение фундаментальных параметров CP-звезд методами спектроскопии: сравнение с данными интерферометрии".
 - Конкурс молодых ученых ИНАСАН, 15.11.2018 г., доклад "Изменение вертикальной стратификации элементов Fe и Cr с фазой вращения в атмосфере Ap-звезды 78 Vir".
 - Конкурс молодых ученых ИНАСАН, 24.11.2019 г., доклад "Сравнение радиусов Ap-звезд, полученных по спектроскопии и по интерферометрии".
 - Конкурс молодых ученых ИНАСАН, 05.11.2020 г., доклад "Benchmarking the fundamental parameters of Ap stars with optical long-baseline interferometric measurements".

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, No 4, с. 286–298, (2017). Англ.: Т. А. Ryabchikova, **A. M. Romanovskaya**. Investigation of the Dependence of Rare-Earth Element Abundances on the Effective Temperature and Magnetic Field in the Atmospheres of Chemically Peculiar (Ap) Stars. *Astronomy Letters*, Vol. 43, № 4, pp. 252–264, (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 Ap-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 and Astrophysics*, v. 642, id. A101, (2020).

6. **Romanovskaya A.**, Shulyak D., Ryabchikova T., Sitnova T. "Fundamental parameters of Ap-stars GO And, 84 UMa and κ Psc. *Astronomy and Astrophysics*, принята в печать, (2021).

Другие публикации автора по теме диссертации

1. **Романовская А.М.**, Рябчикова Т.А. Аномалии химического состава и стратификация элементов в атмосферах Ap-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 Ap-звезды HD 110066 (АХ CVn) // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2019г.). - Москва: Изд-во Янус-К, - 2019. - С.
3. **Романовская А.М.**, Рябчикова Т.А., Шуляк Д.В. "Фундаментальные параметры Ap-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 Cr 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. **A.M. Romanovskaya**, T.A. Ryabchikova, D.V. Shulyak. "Fundamental parameters of Ap-stars 78 Vir (HD 118022) and AX CVn (HD 110066) *Astronomical Journal of Azerbaijan*, Vol. 15, № 1, p. 39-44 (2020).

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают результаты, полученные соискателем. В работе 1 соискателем проведен подбор модели атмосферы 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, Cr и Ca, также в работе 5 дополнительно выполнен расчет болометрических потоков для эталонной выборки звезд, и предоставление данных для сравнения с интерферометрическими параметрами. В работе 6 соискателем

также выполнен анализ факторов, влияющих на спектральное распределение энергии.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Число страниц в диссертации 134, рисунков 41, таблиц 15. Список литературы содержит 138 наименований.

Во Введении представлен краткий обзор содержания диссертации, объектов исследования, описана актуальность диссертационной работы, цели, задачи, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлена информация по апробации результатов, научным публикациям по результатам исследований соискателя и его вкладу.

В главе 1 "Фундаментальные параметры выборки Ар-звезд" изложен метод определения фундаментальных параметров по спектроскопии. Моделирование атмосфер проводилось с учетом содержания химических элементов и стратификации Fe, Cr и Ca. Также показано положение звезд исследования на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, где подтверждается наблюдаемое уменьшение величины магнитного поля с возрастом звезды для звезд с массами больше $2.5M_{\odot}$. В последнем параграфе проводится сравнение полученных параметров с прямыми измерениями интерферометрии.

В главе 2 "Факторы, влияющие на спектральное распределение энергии" изложен анализ влияния фазовой переменности на спектральное распределение энергии для звезд HD 220825 и HD 118022. Исследовано изменение химического состава и стратификации элементов Fe, Cr, Ca с фазой вращения для звезды HD 118022. Также рассмотрено влияние Si на SED в атмосфере звезды HD 120198.

В главе 3 "Исследование зависимости содержания редкоземельных элементов от эффективной температуры и магнитного поля в Ар-звездах" приводится исследование зависимости CePrNdEu-аномалий (раз-

личие в содержаниях элемента, определенных отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации) от эффективной температуры для 26 магнитных химически-пекулярных звезд.

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

Глава 1. Фундаментальные параметры выборки Ar-звезд.

В данной главе диссертационной работы 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 спектроскопии. Моделирование атмосфер проводилось с учетом аномального химического состава их атмосфер и стратификации элементов Fe и Cr по глубине атмосферы. Определено положение звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела.

Результаты исследования опубликованы в работах 2, 4, 5, 6 (см. в списке публикаций, рекомендованных ВАК во Введении).

1.1. Литературные данные исследуемых звезд

Фундаментальные параметры исследуемых звезд были получены различными методами в предыдущих работах (таблица 1.1). Здесь и далее в скобках указана погрешность измерения последних цифр. Последние определения параметров были выполнены методом интерферометрии [25]. [27] оценил эффективную температуру и светимость звезд посредством калибровки фотометрической системы Женевы с использованием пересмотренных параллаксов Hipparcos [29]. Радиусы звезд рассчитывались по формуле Стефана-Больцмана. [30] определили эффективные температуры по системе Женевы и фотометрии системы Str omgren, а светимости были получены с учетом болометрических поправок. [31] определили T_{eff} из подгонки теоретического потока к наблюдаемому спектральному распределению энергии; $\log g$ в данной работе принималось равным $\log g = 4.0$. [32]

определял основные параметры различными методами, представленными в таблице. [33] собрал фундаментальные параметры из разных источников; T_{eff} приведенный в таблице 1.1, был получен методом инфракрасных потоков.

1.2. Наблюдения

Спектры высокого разрешения для звезд HD 4778, HD 108662, HD 110066, HD 120198, HD 153882, HD 220825 были получены со спектрополяриметром ESPaDOnS, установленном на канадско-франко-гавайском (CFHT) телескопе, который находится в обсерватории Мауна Кеа). Разрешающая сила спектрографа $\lambda/\delta\lambda = R = 68000$ во всех длинах волн.

Для звезды HD 118022 взяты спектры высокого разрешения и высокого отношения сигнал/шум для исследования вертикального распределения элементов Cr и Fe в 8 фазах вращения от минимума до максимума магнитного поля (0.095, 0.162, 0.211, 0.371, 0.490, 0.623, 0.721 и 0.927). Для первых 7 фаз спектры были получены с помощью спектрополяриметра NARVAL, установленного на 2-м телескопе TBL (Telescope Bernard Lyot) в Пик-дю-Миди. Его разрешающая способность $\lambda/\delta\lambda = R = 65000$, спектральная область 3700–10000 Å. Для фазы в максимуме магнитного поля 0.927 у HD 118022 и для звезд HD 111133, HD 188041 спектры был получен с помощью спектрографа UVES (UV-Visual Echelle Spectrograph), установленного на телескопе VLT (Very Large Telescope) на Европейской южной обсерватории (ESO) с диаметром главного зеркала 8.2 метра. Его спектральное разрешение $\lambda/\delta\lambda = R = 80000$, а спектральный диапазон охватывает ближнюю ультрафиолетовую и инфракрасную области спектра: 3100–10000 Å.

Все спектры от спектрографов ESPaDOnS и NARVAL в ходе работы были приведены к уровню континуума. Обработка спектров описана в статье Рябчикова и др. (2008).

Для построения распределения энергии в спектре были использованы фотометрические/спектрофотометрические наблюдения в различных спектральных диапазонах. Для УФ-диапазона 1900–3000 Å использовались наблюдения телескопа International Ultraviolet Explorer (IUE)¹⁾, а также использована УФ-фотометрия со спутника TD1 (European Space Research Organisation (ESRO) satellite) [40] с помощью телескопа S2/68, который измерял в ультрафиолетовом диапазоне абсолютные потоки в 4-х узких полосах: 1565, 1965, 2365 и 2740 Å. В оптическом диапазоне были использованы спектрофотометрические наблюдения из каталога Адельмана [41] и/или спектрофотометрии Брегера из каталога [42] и/или фотометрии Джонсона в фильтре V из онлайн базы данных ADS SIMBAD²⁾. В ближнем инфракрасном диапазоне фотометрические данные взяты из каталога 2MASS (2Micron All-Sky Survey - [43]), который содержит обзор всего неба в фильтрах J (1.25 мкм), H (1.65 мкм), и Ks (2.17 мкм). Наблюдения переведены в абсолютные потоки по калибровкам из работы [44].

- HD 4778: УФ-данные доступны как в архивах IUE, так и в TD1; в оптическом диапазоне нет спектрофотометрии Адельмана, поэтому мы используем только фотометрию Джонсона и фотометрические измерения 2MASS в ИК-диапазоне.
- HD 108662: отсутствуют данные в УФ диапазоне, доступны наблюдения Адельмана и 2MASS.
- HD 110066: доступны данные TD1, IUE, Адельмана и 2MASS.
- HD 111133: TD1, Adelman, 2MASS
- HD 118022: доступны наблюдения с TD1, IUE, каталогов Брегера и Адельмана в оптической области и 2MASS для ИК-диапазона.

¹⁾<http://archive.stsci.edu/iue/>

²⁾<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

- HD 120198: доступны фотометрические и спектрофотометрические данные из каталогов IUE, TD1, Адельмана и 2MASS.
- HD 153882: TD1, Adelman, 2MASS
- HD 188041: IUE, TD1, Adelman, 2MASS
- HD 220825: данные IUE и TD1 отсутствуют, поэтому мы используем только измерения Адельмана и 2MASS для построения спектрального распределения энергии.

1.3. Метод определения фундаментальных параметров

Основным методом исследования в настоящей работе является само-согласованный итерационный анализ высокоточных спектров Ар-звезд и распределения потока в широком диапазоне длин волн, предложенный и реализованный в работе [16].

Спектроскопический метод определения фундаментальных параметров магнитных Ар звезд усложняется наличием в атмосферах таких звезд глобального магнитного поля. Это необходимо учитывать на каждом этапе работы. Данный метод применим ко всем звездам выборки и включает следующие этапы итерационного процесса:

1. Первоначальная оценка параметров атмосферы звезды по фотометрическим индексам и расчет модели атмосферы звезды с этими параметрами по программе ATLAS9 [45], в которой поглощение в линиях учитывается как часть общей непрозрачности при расчете выходящего излучения с использованием метода функции распределения (ODF – Opacity Distribution Function).
2. Оценка модуля вектора магнитного поля, усредненного по поверхности звезды, по Зеемановскому расщеплению спектральных линий.

3. Расчет синтетического спектра с учетом магнитного поля по программе Synmast [46], атомные параметры для расчета спектральных линий берутся из базы данных спектральных линий VALD3 [47].
4. Оценка содержания химических элементов через измерение эквивалентных ширин одиночных или малоблендированных линий. В ряде случаев содержание оценивается путем синтеза профилей линий, где учитываются магнитное поле, изотопная структура и т.д. Влияние магнитного поля в формирование профилей линий учитывается в обоих подходах.
5. Выборка линий, наиболее подходящих для исследования стратификации. Линии должны иметь разные энергии возбуждения E_i , различную интенсивность при близких значениях энергии возбуждения E_i , что позволяет рассматривать их формирование на разных оптических глубинах. Кроме того, необходимо иметь линии элемента в различных состояниях ионизации (I и II), поскольку они также формируются на разных глубинах атмосферы.
6. Расчет стратификации элементов Ca, Cr, Fe по программе DdaFit [48].
7. Уточнение параметров атмосфер звезд (T_{eff} , $\log g$) через сравнение рассчитанных потоков с наблюдаемыми для сетки моделей, рассчитанных по программе LLmodels [48] вокруг стартовых параметров путем вариации последних. LLmodels учитывает индивидуальные аномалии химического состава и стратификацию содержания элемента при расчете поглощения, поэтому точнее, чем ATLAS9 моделирует структуру атмосферы Ap-звезды. Теоретический поток масштабируется расстоянием до звезды и квадратом радиуса звезды. При этой процедуре использовался известный из измерений параллакс звезды и одновременно варьировался радиус звезды. В результате в процессе

подгонки (фитирования) теоретического потока к наблюдаемому мы получаем кроме T_{eff} , $\log g$ и радиус.

8. Полученная в результате подгонки потоков новая модель атмосферы используется в следующей итерации, начиная с пункта 3 (кроме пункта 5, поскольку выборка спектральных линий для анализа стратификации происходит один раз). Расчеты продолжаются до сходимости значений всех параметров, включая содержание элементов и стратификацию. Обычно, достаточно от 3-х до 5-и итераций.

1.4. Построение моделей атмосфер

Стартовые значения параметров атмосфер взяты из работ: 10000g40 (HD 4778) [27], 10300g43 (HD 108662) [49], 8850g40 (HD 110066) [27], (HD 111133) [37], 9500g40 (HD 118022) [37], 10500g40 (HD 120198) [27], 9250g40 (HD 153882) [30], 8800g40 (HD 188041) [37], 9300g38 (HD 220825) [39]. Здесь и далее в имени модели указаны эффективная температура и логарифм ускорения свободного падения, например, $\log g = 4.0$ в названии модели указан как g40.

1.4.1. Определение магнитного поля и скорости вращения звезд

Магнитное поле играет важную роль в формировании спектральных линий и поэтому оно должно учитываться при расчете спектра. Предполагается, что поверхностное магнитное поле является постоянным с глубиной и определяется радиальной и меридиональной составляющими вектора магнитного поля, модуль которого $\langle B_s \rangle$ получается из магнитного расщепления спектральных линий в неполяризованном наблюдаемом спектре (эффект Зеемана), количество которых определяется квантовыми числами перехода, а расстояние между компонентами линии – величиной напряженности магнитного поля, фактором Ланде и магнитными кванто-

выми числами M . Уровень с главным квантовым числом J расщепляется на $2J+1$ подуровней с $M = -J, \dots, +J$. В спектрах звезд наиболее удобной линией для определения напряженности магнитного поля является линия Fe II 6149 Å, так как эта линия расщепляется на 2 компоненты линейной поляризации и 2 компоненты круговой поляризации. Например, в звезде HD 188041 (см. 3.1), расстояние между центрами тяжести компонентов круговой и линейной поляризации одинаковое. При любом значении поля мы наблюдаем в этой линии расщепление на 2 компоненты. Их смещение можно определить через формулу:

$$\Delta\lambda = 4.67 \times 10^{-13} \lambda^2 |B| g_{\text{eff}} \quad (1.1)$$

В спектрах звезд есть и другие линии элементов, расщепляющихся на 2 и более компонент под влиянием магнитного поля (см., например, для HD 188041 рис. 3.1), по которым можно оценить напряженность магнитного поля. Трудность заключается в том, что результирующий профиль зависит от геометрии магнитного поля на части поверхности, с которой приходит излучение, и в спектре очень мало линий с чистым магнитным расщеплением, как Fe II 6149 Å, или чистые триплеты с одним центральным компонентом линейной поляризации и двумя компонентами круговой поляризации, имеющими достаточно большой фактор Ланде. Магнитное поле в Ар-звездах меняется с фазой вращения звезды, поэтому для отдельных фаз можно только оценить усредненную по поверхности величину модуля поля и примерный вклад радиальной и меридиональной составляющих вектора, которые влияют на интенсивность спектральной линии. Синтетический спектр с заданной моделью атмосферы, химическим составом и стратификацией (если имеются соответствующие расчеты) и магнитным полем (радиальная и меридиональная компоненты) рассчитывался по программе Synmast. Параметры спектральных линий – длина волны, энергии и главные квантовые числа уровней, факторы Ланде – были получены

из базы данных VALD3. Программа `BinMag6` позволяет подогнать рассчитанные по `Synmast` профили линий к наблюдаемым профилям путем вариации компонентов магнитного поля и содержания элемента. Список линий и оцененные с помощью программы `BinMag6` по этим линиям значения радиальной и меридиональной компонент магнитного поля приведены в таблице 1.4.1. Разброс в значениях поля отражает очень приблизительное представление геометрии магнитного поля – постоянное по величине поле с постоянным углом наклона вектора к поверхности звезды в каждой точке. Тем не менее, такое представление позволяет довольно хорошо учитывать влияние магнитного поля на определяемый химический состав. Для HD 188041 усредненный по компонентам для разных линий модуль вектора магнитного поля составляет 3.73(13) кГс, для HD 111133 разные линии дают соответствующие величины 4.2 и 4.8 кГс, что согласуется с результатами предыдущих исследований (см., например, [50]). Сравнение наблюдаемых и теоретических профилей избранных спектральных линий показано на рис. 1.1 (HD 188041) и на рис. 1.2 (HD 111133).

Для части звезд значения магнитного поля $\langle B_s \rangle$ были взяты из литературных источников, поскольку в работе были использованы те же спектры: HD 111133 – $\langle B_s \rangle = 4.0$ кГс, HD 118022 – $\langle B_s \rangle = 3.0$ кГс, HD 188041 – $\langle B_s \rangle = 3.6$ кГс из работы [37], HD 204411 – $\langle B_s \rangle =$ кГс из работы [37].

Для звезд HD 4778, HD 120198 и HD 220825 из-за довольно большой скорости вращения $v \sin i$ невозможно было оценить модуль поверхностного магнитного поля $\langle B_s \rangle$ по зеемановскому расщеплению или по магнитному дифференциальному уширению [51]. Поэтому значения $\langle B_s \rangle$ взяты также из литературных данных: 2.6 кГс для HD 4778 [52]; 1.6 кГс для HD 120198 и 2.0 кГс для HD 220825 [53]. Также мы получили значения $v_e \sin i$ из нескольких бленд линий с разной чувствительностью к магнитному полю с принятым ранее значением $\langle B_s \rangle$. Окончательные значения следующие: $v_e \sin i = 31.6 \pm 3.8$ км с⁻¹ (HD 4778), $v_e \sin i = 56.0 \pm 0.5$ км с⁻¹ (HD 120198) и $v_e \sin i =$

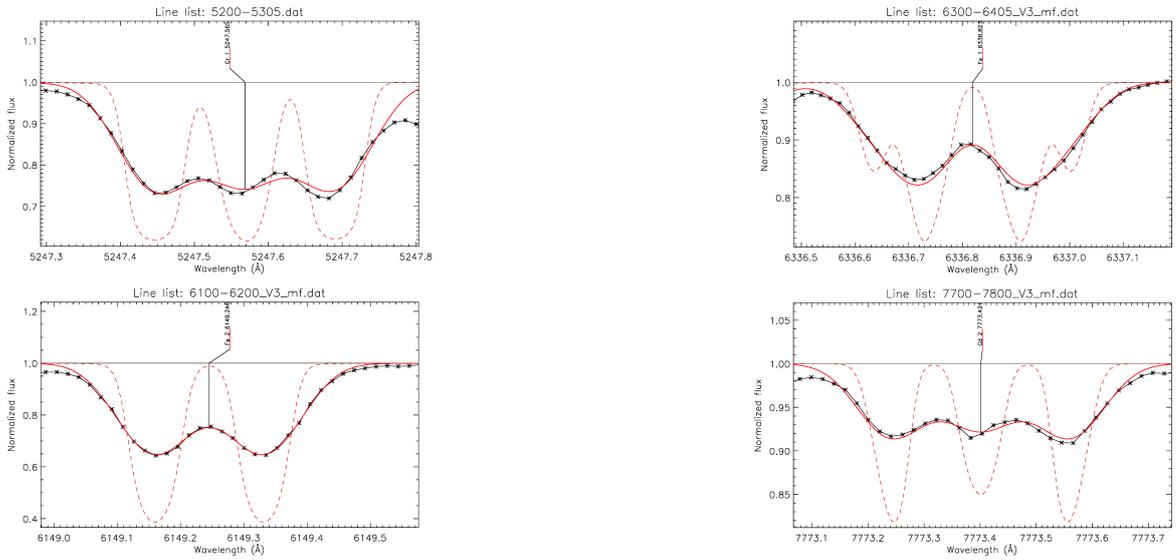


Рис. 1.1. Расщепление линий Cr I 5247.565 Å, Fe I 6336.623 Å, Fe II 6149.246 Å и Gd II 7773.421 Å на компоненты в магнитном поле, указанном в таблице 1.4.1 для звезды HD 188041 (штриховая красная линия). Вертикальная линия указывает на центр несмещенной линии. Наблюдения спектра звезды HD 188041 показаны точками. Теоретический профиль линии после свертки с инструментальным профилем и скоростью вращения показан сплошной красной линией.

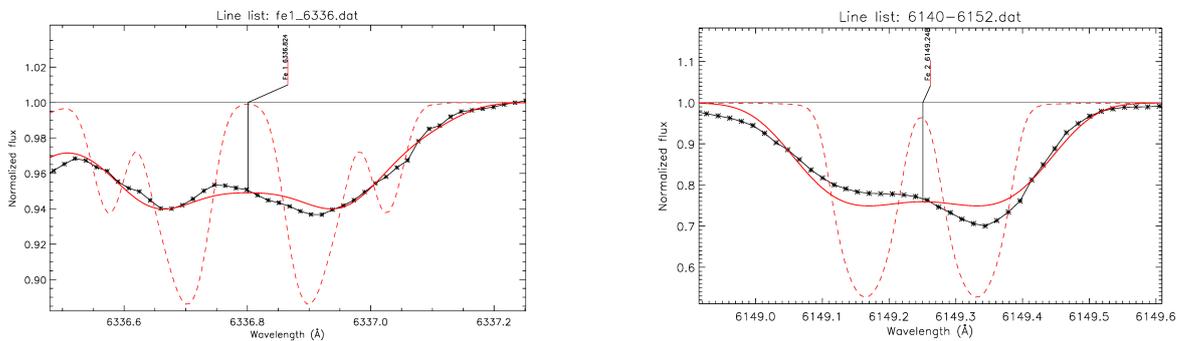


Рис. 1.2. То же, что на рис. 1.1 для HD 111133. Показаны линии Fe I 6336.623 Å Fe II 6149.246 Å.

$38.4 \pm 1.5 \text{ км с}^{-1}$ (HD 220825). Эти значения согласуются с литературными данными из онлайн-базы данных SIMBAD.

Когда это было возможно, мы измеряли магнитное поле, как это было сделано для нескольких звезд (HD 108662, HD 110066, HD 153882). При подгонке профилей спектральных линий варьировались содержание элемента, модуль вектора напряженности магнитного поля, усредненного по поверхности звезды $\langle B_s \rangle$, и проекция скорости вращения на луч зрения $v \sin i$. Для этого были выбраны несколько чувствительных к магнитному полю линий Fe, Cr (см. Табл. 1.4.1). Использовалось приближение однородного распределения магнитного поля по поверхности звезды. Вообще говоря, программа Synmast позволяет варьировать три компоненты вектора магнитного поля, радиальную, меридиональную и тангенциальную. Поскольку магнитное расщепление линий в спектрах звезд HD 108662 и HD 153882 замывается из-за достаточно большой скорости вращения, а магнитное поле оценивалось по дифференциальному магнитному уширению (см. рис. 4, [54]), то мы варьировали только радиальную компоненту поля, т.е. геометрия магнитного поля звезды была представлена однородным радиальным полем. При таком подходе $\langle B_s \rangle = \langle B_r \rangle$. Такая же модель была использована и для звезды HD 110066, хотя скорость вращения ее существенно меньше. Стартовая величина проекции скорости вращения оценивалась по линии Fe I $\lambda 5434.52 \text{ \AA}$, которая слабо чувствительна к магнитному полю из-за почти нулевого фактора Ланде ($g_{\text{eff}} = 0.1$).

В звезде HD 108662 магнитное поле получилось оценить лишь по линии Fe II $\lambda 6149.246 \text{ \AA}$ и инфракрасной линии Mn II $\lambda 7347.826 \text{ \AA}$. $v_e \sin i = 20.4 \pm 0.44$, соответственно, было получено по этим линиям и согласуется с литературными данными из онлайн-базы данных SIMBAD.

Магнитное поле звезды HD 110066 в работе Матиса [4] оценивалось в среднем как $\langle B_s \rangle = 4080 \text{ Гс}$ и определялось по наиболее удобной для таких измерений линии Fe II $\lambda 6149.246 \text{ \AA}$. Нам удалось найти еще одну линию,

Fe II λ 8352.828 Å, с зеемановским расщеплением такого же типа. Кроме того, мы использовали еще несколько линий в спектре, по которым хорошо видно расщепление на две или три компоненты. Так, мы получили величину модуля вектора напряженности магнитного поля, усредненного по поверхности звезды, $\langle B_s \rangle = 4015(180)$ Гс, а $v \sin i = 3.3(3)$ км с⁻¹. В скобках приведена стандартная ошибка в последних знаках.

Для звезды HD 153882 в литературе приведены значения для эффективного магнитного поля $\langle B_z \rangle$ (проекция вектора поля по лучу зрения, см. Матис (1991)). Поле меняется в пределах ± 1600 Гс. Из-за значительной скорости вращения звезды магнитное расщепление профилей не наблюдается даже у линий с большими факторами Ланде, поэтому оценка поля производилась по дополнительному дифференциальному магнитному уширению. Мы получили $\langle B_s \rangle = 3800(200)$ Гс, а $v \sin i = 20.0(3)$ км с⁻¹. На рис. 1.4.1 показаны примеры оценки магнитного поля в атмосферах звезд исследования. Для сравнения представлены профили линии Fe I λ 5434.52 Å с практически нулевым фактором Ланде. Для HD 153882 поле оценивалось по магнитному уширению, и поэтому сплошной и штриховой линиями показаны теоретические расчеты с магнитным полем из табл. 1.4.1 и с нулевым значением поля соответственно. Скорость вращения оценивалась по магнитно-нечувствительной линии. Синтетические спектры с полем и без поля показаны для содержания Fe, полученного по подгонке с магнитным полем.

Средние значения магнитных полей и полученные скорости вращения были в дальнейшем использованы для расчетов содержания элементов и стратификации.

1.5. Оценка содержания химических элементов

Среднее содержание химических элементов определялось с учетом магнитного (зеемановского) расщепления спектральных линий. Оценка со-

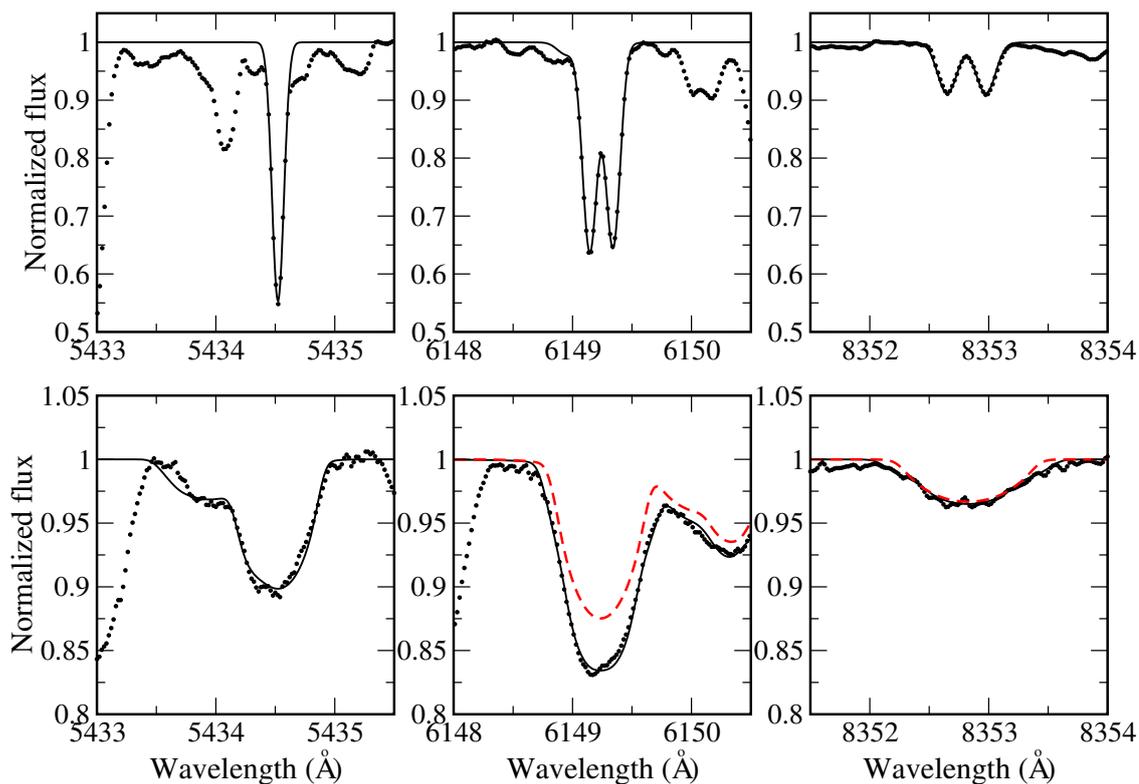


Рис. 1.3. Оценка магнитного поля в атмосферах звезд HD 110066 (верхний ряд) и HD 153882 (нижний ряд) по линиям Fe I λ 5434.52 ($g_{\text{eff}}= 0.1$), Fe II λ 6149.246 ($g_{\text{eff}}= 1.35$) и Fe II λ 8352.828 ($g_{\text{eff}}= 1.29$). Наилучшее согласие теоретических расчетов с наблюдениями (звездочки) показано сплошной черной линией; расчеты с нулевым полем показаны красной штриховой линией.

держания была проведена двумя различными методами. Первый метод (быстрый) позволяет через измеряемые эквивалентные ширины спектральных линий рассчитать содержание элемента по программе WIDSYN [18], учитывающей магнитное расщепление. Во втором, более точном, методе происходит подгонка синтетического профиля спектральной линии к наблюдаемому. При этом варьируются следующие параметры: скорость вращения по лучу зрения $v_e \sin i$, лучевая скорость V_r , радиальная $\langle B_r \rangle$ и в случае необходимости меридиональная $\langle B_m \rangle$ компоненты магнитного поля. Подгонка теоретических профилей линий к наблюдаемым производилась с помощью программы BINMAG6 [55]. Для повышения точности определения по программе WIDSYN отбирались неблендированные или наименее блендированные линии, в которых возможные бленды дают незначительный вклад в основную линию. Если разброс по данным, полученным с программой WIDSYN, был значительный, то для большей точности анализ содержания проводился по второму методу.

Сначала было определено содержание через измеренные эквивалентные ширины спектральных линий с помощью программы WIDSYN [18]. Здесь теоретические эквивалентные ширины вычисляются из синтеза полного спектра переноса поляризованного излучения. Расчеты содержаний элементов проводились в предположении, что поверхностное магнитное поле является постоянным с глубиной атмосферы и определяется радиальной составляющей вектора магнитного поля $\langle B_r \rangle$.

Для звезд HD 4778, HD 108662, HD 120198, HD 153882, HD 220825 из-за довольно высокой скорости вращения $v_e \sin i$ и богатого линейчатого спектра сложно было выбрать неблендированные линии, подходящие для измерения эквивалентной ширины. Поэтому для получения более точных значений мы использовали метод подгонки синтетического профиля спектральной особенности к наблюдаемому. В этом методе необходимо варьировать следующие параметры: скорость вращения вдоль луча зрения $v_e \sin i$,

радиальную скорость V_r , радиальную $\langle B_r \rangle$ и, при необходимости, меридиональную $\langle B_m \rangle$ составляющую магнитного поля, а также элементарную избыток. Подгонка теоретических профилей линий к наблюдаемым проводилась с помощью программы BINMAG6 вместе с кодом SYNMAST. Здесь и далее содержание дается как логарифм отношения количества атомов данного элемента к общему количеству атомов всех элементов $\log(N_{el}/N_{tot})$. Примеры сравнения двух методов определения численности представлены в таблице 1.3 для звезды HD 220825. Здесь видно, что оценка содержания по методу спектрального синтеза в среднем меньше, однако в пределах ошибок данные, полученные по двум методам, согласуются.

Также мы провели сравнительный анализ содержаний Fe (для звезды HD 111133) и Nd (для звезды HD 188041), полученных обоими методами, с использованием 23 линий Fe I, II и 11 линий Nd III. На рис. 1.4 показано это сравнение для линий Fe. Благодаря тщательному выбору спектральных линий, в которых отсутствуют сильные бленды, содержания, которые получены обоими методами, достаточно хорошо согласуются. Соответствующее содержание Fe составляет -3.26(29) WIDSYN по сравнению с -3.26(26) SYNMAST. Аналогичное удовлетворительное согласие было получено и по содержанию Nd.

Для элементов вплоть до Ba значения содержаний были получены по 36 элементам по линиям нейтральных и первых ионов, а для редкоземельных элементов (РЗЭ) мы использовали линии первых и вторых ионов. Для всех элементов, кроме O, содержания были получены в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Содержание кислорода в звездах определялось по линиям инфракрасного триплета O I 7771–7775 Å с учетом отклонения от ЛТР (NLTE). Мы приняли модель атома O I из [56], которая была обновлена путем включения точных данных о столкновениях с электронами и атомами водорода, как описано в [57] и [58] соответственно.

Изотопическая структура Ba II и Eu II была учтена, но мы прене-

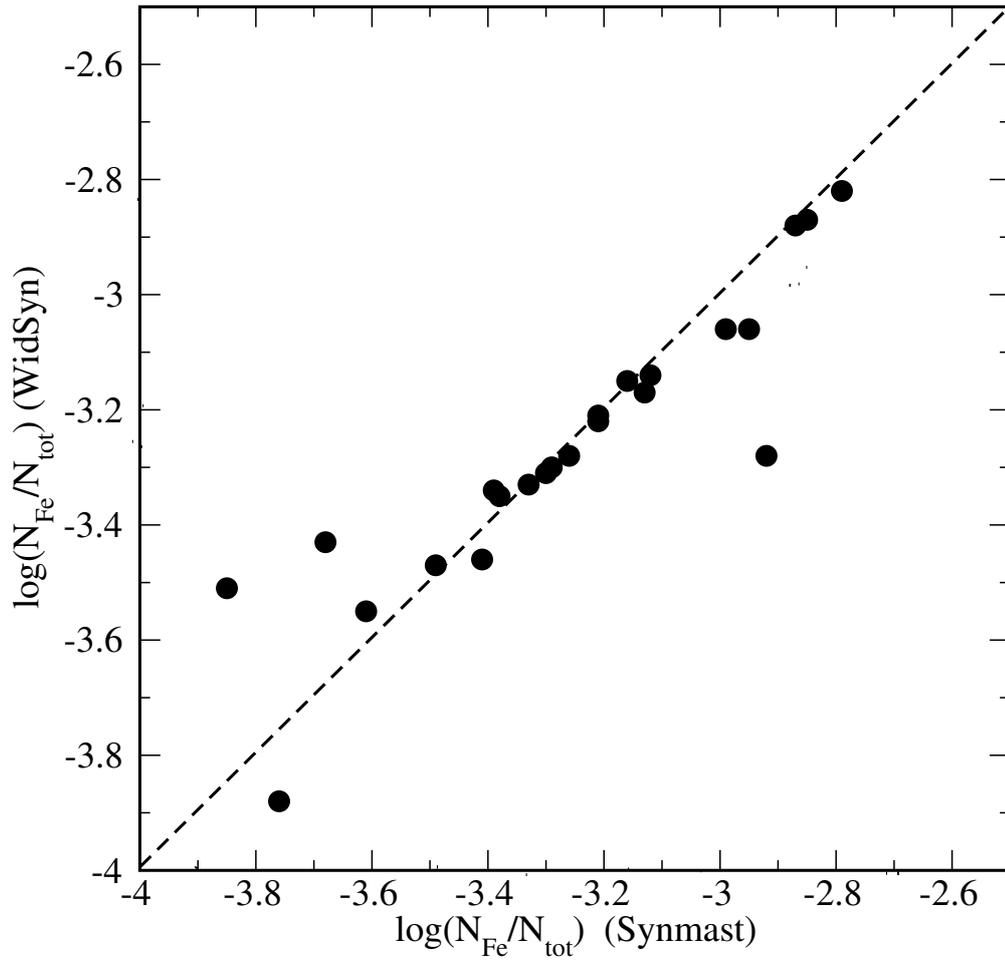


Рис. 1.4. Сравнение между содержанием Fe в атмосфере HD 111133, полученным по эквивалентным ширинам WIDSYN и по фитированию профиля линии кодом SYNMAST.

брегли сверхтонким расщеплением (HFS – hyperfine splitting) из-за сложного взаимодействия между сверхтонким и магнитным расщеплением [59]. Поэтому содержание элементов с нечетными изотопами (Mn, Co, Pr, Eu, Tb) могло быть завышенным.

Окончательные содержания в атмосферах звезд программы вместе с количеством линий, использованных в анализе, собраны в Таблице 1.1 в Приложении и показаны на Рис. 1.5 относительно солнечных значений.

Для 9-ти звезд за исключением HD 204411 получен типичный тренд содержания Ar-звезд типа SrCrEu (см. рис. 1.6а): 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, также типичным для Ar звезд является значительный избыток редкоземельных элементов на 3–4 dex, что согласуется с работами [15, 61]. Однако обнаружено странное поведение Ba: наблюдается минимальный избыток, в отличие от нормальных A-звезд, где Ba имеет максимальный избыток среди всех тяжёлых элементов (см. рис. 1.6б). У звезды HD 204411 наблюдается несколько иная картина: дефицит CNO такой же, содержание элементов железного пика практически солнечное, а РЗЭ близки к солнечным. Этот вопрос рассматривается подробно в разделе 1.9.

Дефицит гелия, He, наблюдается у звезд HD 108662, HD 120198 и HD 220825, так как линия He I 4471 Å практически не видна в их спектрах. Соответственно, для этих звезд рассчитывались He-weak модели атмосфер с содержанием гелия $\log(\text{He}/N_{tot}) = -4.05$ и с содержанием водорода $\text{H}/N_{tot} = 0.99$. В атмосферах остальных звезд линии He I присутствуют, поэтому рассчитывались He-norm модели со следующим содержанием H и He: $\log(\text{He}/N_{tot}) = -1.05$ и $\text{H}/N_{tot} = -0.91$, соответственно.

В Табл. 1.1 в Приложении для некоторых звезд можно заметить довольно большую разницу в содержании, полученную по линиям последова-

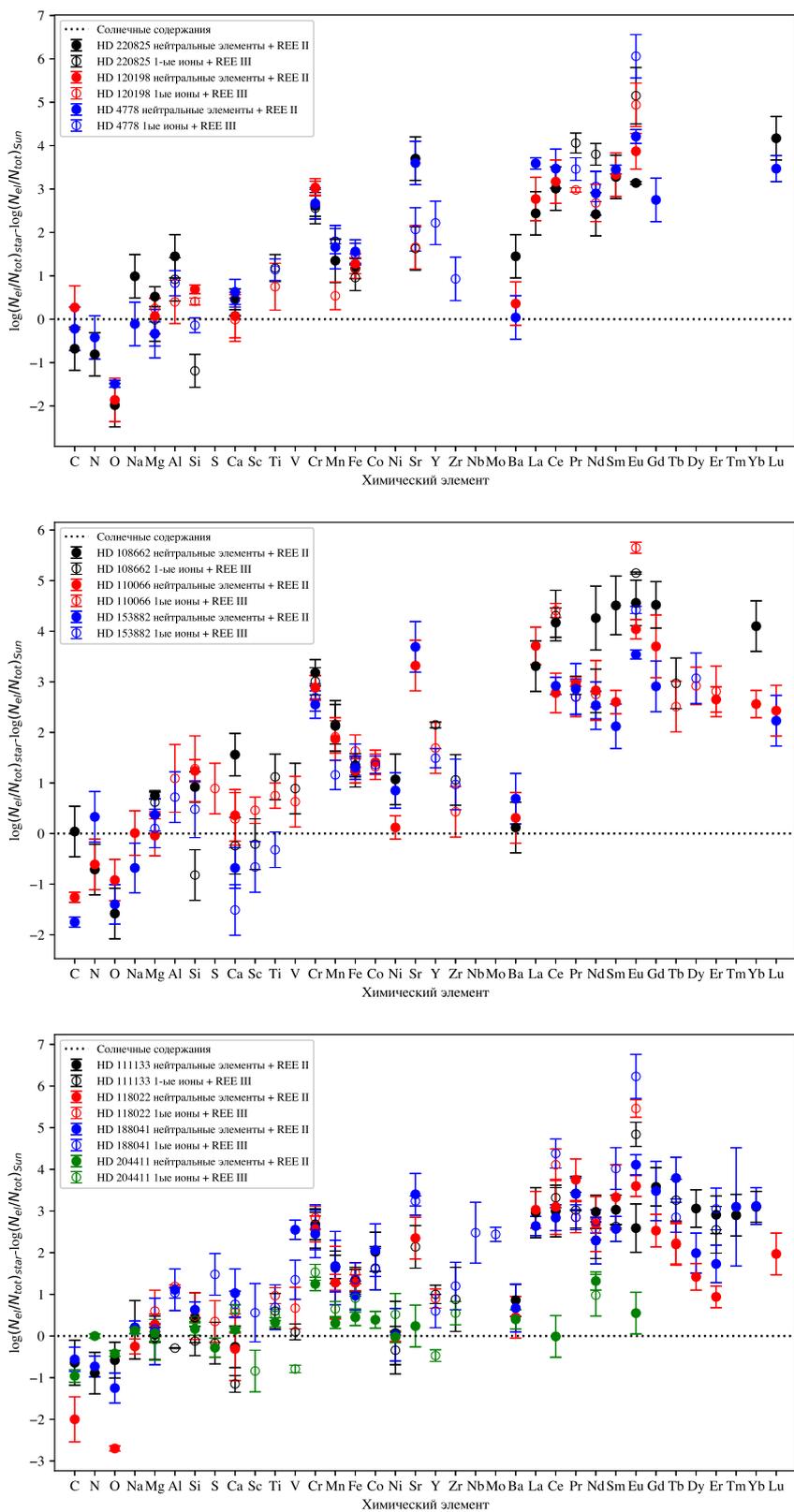
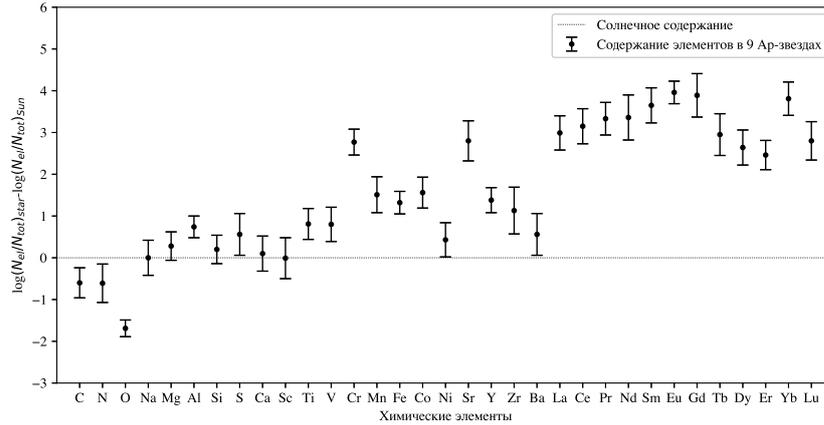
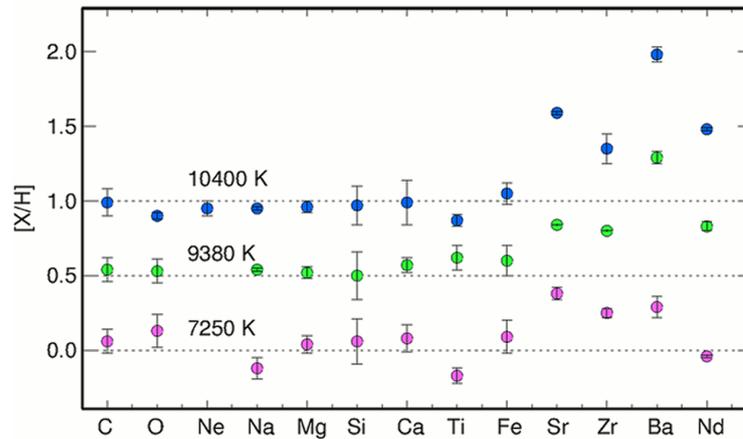


Рис. 1.5. Содержания элементов в атмосферах Ар-звезд относительно солнечных значений.



(а)



(б)

Рис. 1.6. (а) – Средние значения содержаний элементов в атмосферах 7-ми Ар-звезд относительно солнечных значений. (б) – Средние значения в атмосферах А звезд [60].

тельных стадий ионизации некоторых элементов, например Ca, Cr, Fe, Eu. Обычно это может быть признаком стратификации содержания в атмосфере звезды [14]. Нет значительного нарушения ионизационного равновесия тех редкоземельных элементов (Ce, Pr, Nd, Sm), содержание которых более или менее надежно определяется несколькими линиями разных стадий ионизации. Исключение составляет Eu, где линии Eu III обеспечивают более чем на порядок более высокое содержание по сравнению с линиями Eu II. Такое поведение типично для большинства Ар-звезд в диапазоне эффективных температур 7000–10000 К (см. Главу 1 и работу [62]).

В звездах HD 4778, HD 120198 и HD 220825, наоборот, выполняется

ионизационное равновесия в пределах погрешности для Mg, Ca, Cr, Mn, Fe, что является одним из свидетельств отсутствия значительной вертикальной стратификации этих элементов. Мы рассмотрим возможное влияние стратификации Fe на распределение потока позже, в разделе 1.6. Единственный редкоземельный элемент с наблюдаемыми линиями двух ионов, первого и второго, – это Eu.

Наиболее интересной особенностью в распределении содержаний является последовательность содержаний Sr-Y-Zr-Ba-REE, где наблюдается резкое уменьшение содержания Ba до солнечного значения и избыток соседних элементов Sr и REE на ≈ 3 dex. Избыток (в меньшей степени) тяжелых элементов Sr-Zr-Ba-Nd был также получен в нормальных A-звездах и в Am-звездах [60], но там Ba имеет максимальный избыток среди соседних элементов Sr, Zr, и Nd. Это различное поведение, безусловно, указывает на различие в механизмах, которые контролируют распределение содержания в атмосфере у нормальных и пекулярных звезд A-типа.

1.6. Исследование стратификации элементов Fe, Cr и Ca в атмосферах Ap-звезд

Картина химической стратификации зависит от эффективной температуры T_{eff} , напряженности магнитного поля $\langle B_s \rangle$ звезды, а также от скорости вращения звезды $v \sin i$ [7, 8]. Теоретические расчеты диффузии некоторых элементов [6] показали, что в первом приближении профиль стратификации может быть представлен ступенчатой функцией, что было затем широко использовано при анализе наблюдений [48, 63, 64]. Исследования стратификации химических элементов по спектральным наблюдениям показали, что большинство элементов до Ba концентрируются ближе к фотосфере (глубокие слои атмосферы) со скачкообразным уменьшением содержания в верхних слоях. Более тяжелые редкоземельные элементы (РЗЭ), наоборот, концентрируются в верхних слоях атмосферы звезды [13, 65].

При расчете модели атмосферы по программе LLmodels учитывались измеренные значения содержания, которые также используются для исследовании стратификации элементов Fe и Cr. В стратификационном анализе линии других элементов могут влиять на результаты из-за блендирования линий. Стратификация элементов рассчитывалась по программе DDaFit. В первом приближении профиль стратификации представляется ступенчатой функцией, где подбираются значения содержаний элемента в верхних и нижних слоях атмосферы, положение центра скачка содержаний в атмосфере звезды и ширина скачка.

Успех исследования стратификации сильно зависит от выбора спектральных линий. Для изучения стратификации в атмосферах 9-ти Ar-звезд была проведена выборка линий, наиболее подходящих для данной процедуры. Существуют критерии, по которым проводился выбор линий для стратификации:

- Линии должны иметь разные энергии возбуждения E_i (в диапазоне 0–12 эВ);
- Выбирались линии различной интенсивности при близких значениях энергии возбуждения E_i , что позволяет рассматривать их формирование на разных оптических глубинах;
- Желательно наличие линий I и II ионизационных состояний, поскольку они формируются на разных глубинах атмосферы. Ионизованные элементы образуются глубже.

Стратификационный анализ был начат с химически однородной атмосферы с одинаковыми содержаниями как для нижних, так и для верхних слоев атмосферы, которая затем изменяется вместе с другими параметрами для достижения наилучшего согласия между рассчитанными и наблюдаемыми профилями спектральных линий. Сильный скачок содержания наблюдается в основном у холодных звезд (6000–8000 K), причем с увели-

чением эффективной температуры T_{eff} скачок содержания уменьшается и смещается в верхние слои атмосферы [7]. Спектральный синтез проводился по программе Synmast с учетом зеемановского расщепления и возможных вкладов соседних линий.

HD 4778, HD 120198, HD 220825. Нарушение ионизационного равновесия служит одним из свидетельств расслоения элементов в Ар-атмосферах [14]. Хотя не было обнаружено значительного нарушения ионизационного равновесия для элементов Fe и Cr в атмосферах звезд программы (см. Табл. 1.1 в Приложении), мы все же пытались найти возможную стратификацию Fe и Cr. Данные звезды имеют достаточно высокие эффективные температуры, а также высокие скорости вращения $v_e \sin i$, что приводит к уширению спектральных линий. Из-за этого было сложно провести точный стратификационный анализ. Мы пробовали два набора линий Fe с разницей в 2 линии для расчета стратификации Fe в HD 220825. Полученные профили стратификации показаны на рис. 1.7а. Основываясь на результатах анализа содержания и стратификации, был сделан вывод, что атмосферы звезд можно рассматривать как химически однородные. Возможные эффекты стратификации на профили линий SED и водорода будут обсуждаться в разделе 1.10.

HD 110066, HD 153882. На примере линий, использованных для стратификации в звезде HD 153882, видно, что синтетический спектр, рассчитанный с учетом стратификации, описывает наблюдаемые профили спектральных линий лучше, чем спектр с однородным содержанием (рис. 1.8). Полученное из наблюдений распределение Cr и Fe представлено на рис. 1.9а, б (HD 110066) и на рис. 1.9в, г (HD 153882). У железа и хрома наблюдается почти одинаковое поведение стратификации, выражающееся в наличии большей концентрации элементов в нижних слоях атмосферы, резкого падения концентрации в окрестности $\log\tau_{5000} = -1.04$, и малое содержание элементов в верхних слоях атмосферы при $\log\tau_{5000} \gg -2.6$ (по-

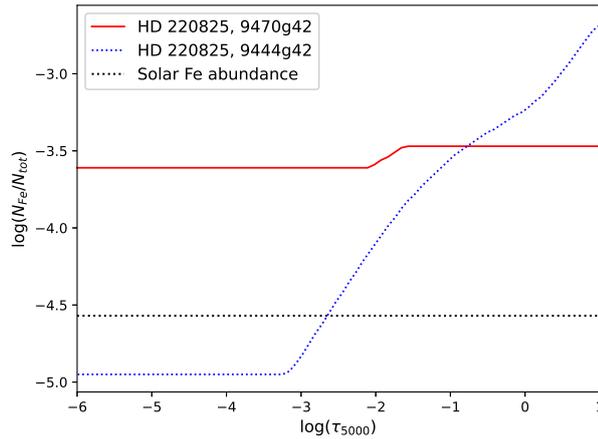
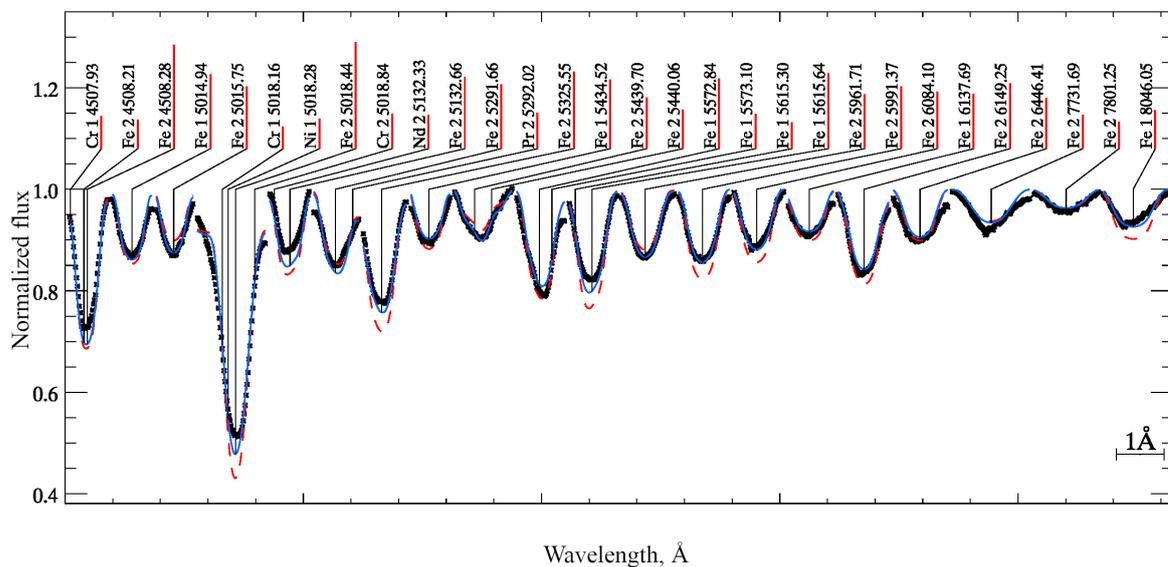


Рис. 1.7. Вертикальное распределение содержания (стратификация) Fe в атмосфере звезды HD 220825 для модели 9470g42 (красная линия) и для модели 9444g42 (синяя пунктирная линия). Солнечное содержание представлено черной точечной линией.

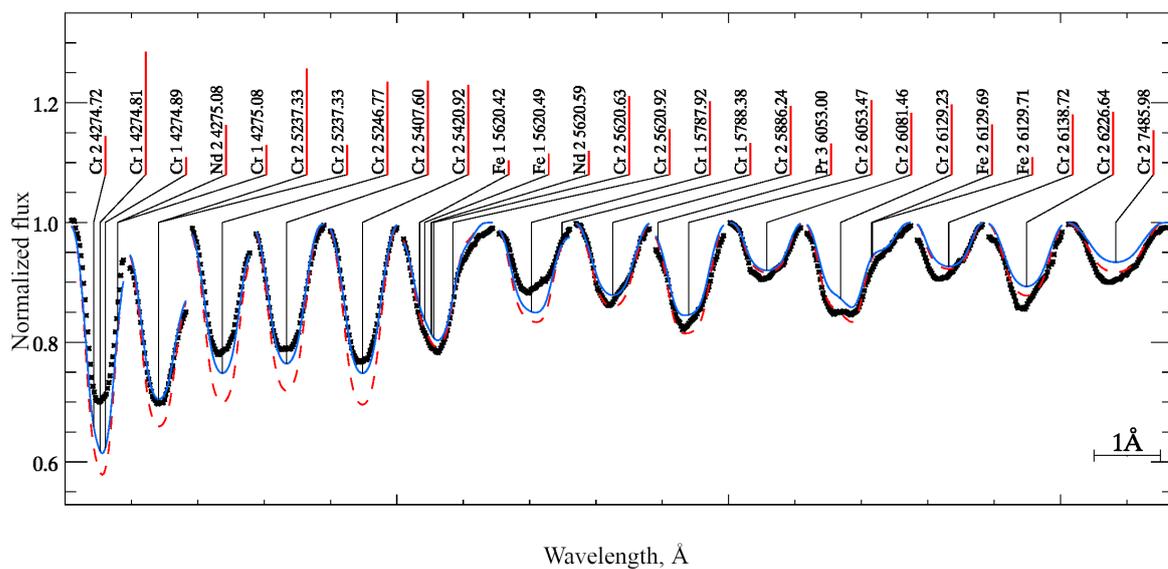
дробнее см. Табл...). Содержание в верхних слоях атмосферы определяется менее уверенно, поскольку в верхних слоях атмосферы формируются только ядра самых сильных линий. Таких линий наблюдается мало, поэтому содержание элемента в верхних слоях определяется достаточно ненадежно, с точностью не более ± 0.5 dex.

HD 108662. Теоретические расчеты диффузии [66] показывают, что с повышением температуры звезды скачок содержания смещается в верхние слои атмосферы и разница содержания в нижнем и верхнем слоях уменьшается, что в целом не противоречит наблюдаемому распределению Fe (см. рис. 1.10). Невозможно было оценить стратификацию другого, наиболее распространенного элемента группы железа – Cr, потому что спектр не содержит подходящих неблендированных линий на двух стадиях ионизации в широком диапазоне энергий возбуждения.

HD 111133, HD 188041 и HD 204411. Было проведено исследование стратификации для элементов Fe, Cr и Ca. Все три элемента имеют скачки содержания в атмосферах исследуемых звезд, и эти скачки расположены на оптических глубинах близко к предсказаниям теории диффузии. Однако в атмосфере более проэволюционировавшей звезды HD 204411 скачки



(a)



(b)

Рис. 1.8. Сравнение наблюдаемых (точки) и рассчитанных со стратификацией (синяя сплошная линия) профилей спектральных линий Fe (а) и линий Cr (б) для HD 153882. Профили линий с однородным стартовым содержанием элементов показаны штриховой линией.

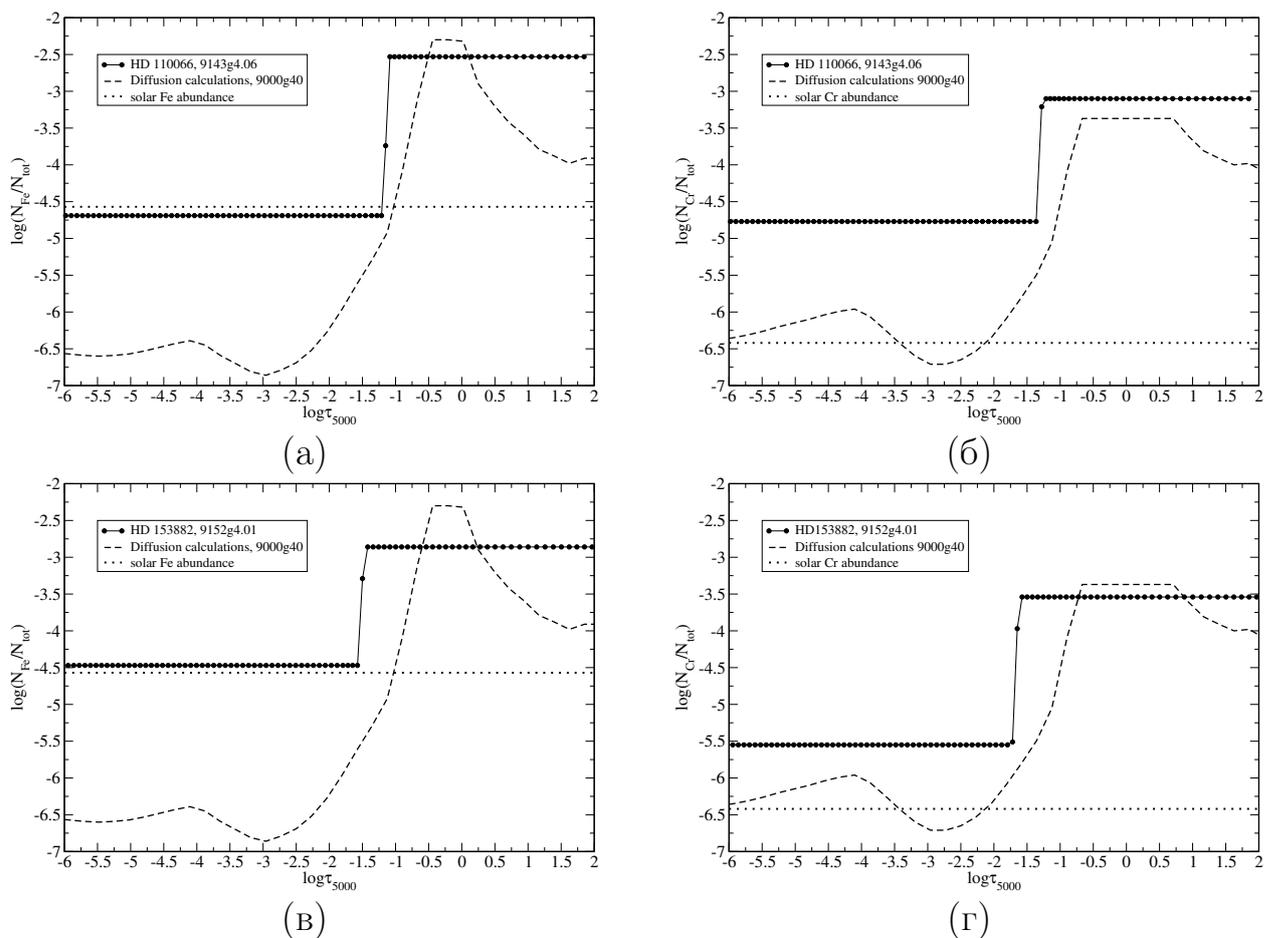


Рис. 1.9. Стратификация Fe (а) и Cr (б) в атмосфере звезды HD 110066 (9200g40), и Fe (в) и Cr (г) в атмосфере звезды HD 153882 (9152g40). Штриховой линией показано теоретическое распределение Fe и Cr для модели 9000g40 [66]. Точечная линия показывает содержание данных элементов в атмосфере Солнца.

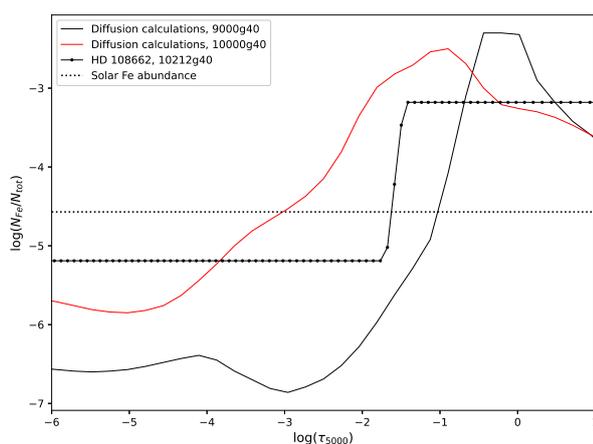


Рис. 1.10. Стратификация Fe в атмосфере звезды HD 108662. Штриховая линия показывает содержание на Солнце. Средние по количеству линий значения содержаний химических элементов представлены как $\log(N_{el}/N_{tot})$. Красная и черная линия показывает теоретические распределения Fe для моделей 9000g40 и 10000g40 [7, 66].

содержания кажутся меньшими, в частности, для Cr. Звезды показывают большой переизбыток Fe и Cr в глубоких слоях атмосферы, где образуются линии с высоким возбуждением. Расчет стратификации кальция был начат в приближении локального термодинамического равновесия, но, как известно, линии кальция Ca подвержены не-ЛТР эффектам [67, 68], поэтому нам пришлось учесть не-ЛТР эффекты для лучшего описания линий кальция. Таблицы отклонения населенностей уровней линий кальция от ЛТР были рассчитаны для нас Т. Ситновой и введены в программу Synmast. Самый необычный результат - дефицит Ca во всей атмосфере HD 111133, который не предсказывается диффузионной теорией (см. рис. 1.11в). Результаты нашего анализа не сильно отличаются от стратификации Ca в HD 188041 и HD 111133 [37], и для стратификации Fe-Cr-Ca, полученных в работе [48]. Это неудивительно, поскольку цитируемые исследования были основаны на тех же наблюдаемых спектрах.

Спектральные линии, взятые для стратификационного анализа приведены в Приложении в Табл 1.2. Параметры стратификации в атмосферах исследуемых звезд приведены в Табл. 1.4.

HD 118022. Фундаментальные параметры звезды определялись по фазе вращения 0.927 по спектру от спектрографа UVES. Для сравнения с SED использовалась усредненная спектрофотометрия Адельмана (ссылка). Всего было проведено 2 итерации, в ходе которых было получено наилучшее согласие между наблюдаемым и теоретическим SED. Проведен анализ стратификации Fe, Cr, Ca. Данные параметров стратификации приведены в табл. 1.4, а графики стратификации в зависимости от оптической толщи по фазе 0.927 приведены в Главе 2.

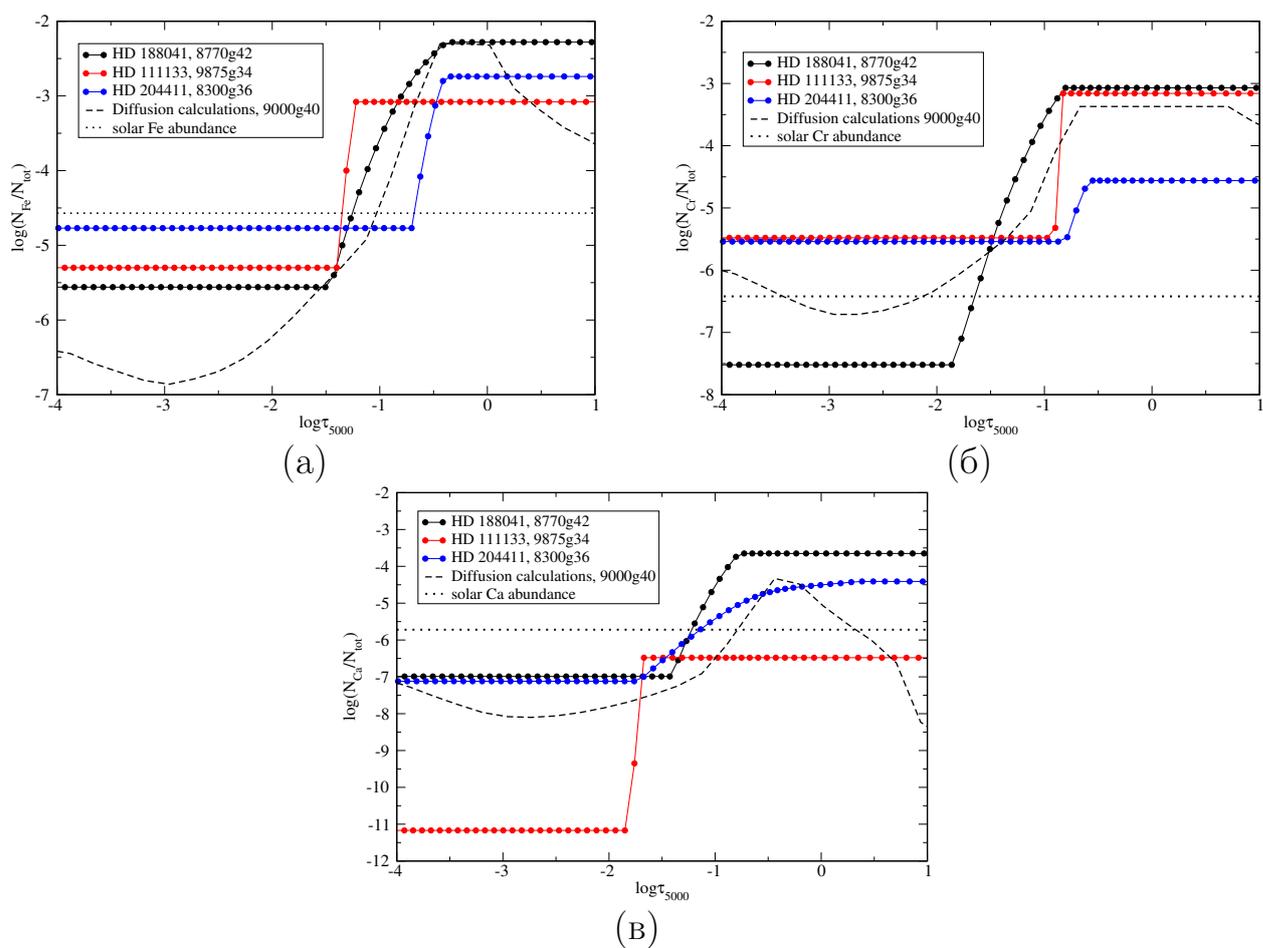


Рис. 1.11. (а) – Стратификация Fe в атмосферах звезд HD 111133 (красные кружки), HD 188041 (черные кружки), HD 204411 (синие кружки). (б) и (в) – Стратификация Cr и Ca соответственно. Солнечные значения представлены точечной линией. Теоретические предсказания по теории диффузии взяты для модели $T_{\text{eff}}=9000$ К, $\log g=4.0$ и показаны штриховой линией.

1.7. Определение фундаментальных параметров выборки Ар-звезд

Определение фундаментальных параметров звезд (эффективной температуры T_{eff} , светимости L/L_{\odot} и радиусов R/R_{\odot}) основано на подгонке теоретического распределения спектральной энергии к наблюдаемому. Исходящий поток в разных длиннах волн от поверхности звезды рассчитывался с помощью кода LLMODELS. Зная расстояние, при процедуре сравнения теоретического распределения энергии с наблюдаемым мы варьируем только параметры атмосферы ($T_{\text{eff}}, \log g$) и радиус звезды. Расстояния до звезд определяются значениями звездного параллакса, которые взяты из каталога GAIA DR2 [69]. Также при расчете потока учитывается межзвездное поглощение. Такой подход позволяет уточнять параметры атмосферы звезды и одновременно определять радиус звезды по спектроскопии.

Поскольку мы используем наборы данных, которые поступают из различных космических и наземных миссий, количество наблюдаемых точек, которые мы подбираем, может отличаться от нескольких (например, 2MASS) до сотен (например, IUE) в зависимости от области длин волн. Поэтому, чтобы гарантировать, что каждая область длин волн в равной степени способствует окончательному подбору, мы взвешиваем данные в УФ, Визуальном и ИК спектральном диапазонах по соответствующему количеству наблюдаемых точек. Мы выбрали три области взвешивания: 0–4200 Å, 4200–11000 Å, 11000–∞ Å. Первая область полезна для оценки звездной гравитации, поскольку она включает бальмеровский скачок, амплитуда которого чувствительна к атмосферному давлению ($\log g$) для звезд ранних спектральных классов. Вторая и третья области наиболее чувствительны к эффективной температуре звезды. В целом, наличие наблюдений в УФ, видимом и инфракрасном диапазонах помогает рассчитывать точные атмосферные параметры [18].

Известно, что CP-звезды демонстрируют переменность своих потоков с периодом вращения, наблюдаемую в различных фотометрических фильтрах (например, [41, 70]). Эта изменчивость вызвана неоднородным распределением химических элементов по поверхности звезды (пятна избытка), что приводит к изменению яркости звезды из-за изменений локальной непрозрачности атмосферы, как объясняется в многочисленных исследованиях (см., например, [71–74]). Среди доступных нам различных наборов данных наблюдений только каталог Адельмана [41] содержит несколько сканов на одну звезду, сделанных на разных фазах вращения. Однако переменность потока у звезд нашей выборки достигает максимума около 12% у HD 204411, 9% у HD 188041 и 6% у HD 111133 соответственно. Таким образом, был сделан вывод, что пятна избытка не вносят сильных искажений в наши оценки параметров. Важно понимать, что амплитуда изменения потока является наибольшей на коротких волнах, где непрозрачность атмосферы наиболее велика. К сожалению, доступные УФ-потоки, обеспечиваемые спутником TD1, не содержат информации с временным разрешением. Поскольку в нашем подборе SED мы объединяем данные, полученные в разные эпохи и с разными миссиями и/или инструментами, мы не смогли изучить влияние пятен избытка на определение параметров атмосферы в полной мере. Таким образом, в нашем анализе мы минимизируем влияние фазовой изменчивости звездных потоков путем усреднения отдельных сканов, сделанных Адельманом [41] для каждой звезды. Однако диссертантом было проведено исследование влияния фазовой переменности в случае звезд HD 118022 и HD 220825, которое изложено в Главе 2.

Естественно, чем точнее мы определяем параметры атмосферы и чем точнее наша модель описывает наблюдаемый спектр звезды, то тем точнее определяем значения радиуса, однако основную ошибку в определение радиуса вносит ошибка значения параллакса. Светимость звезды рассчитывалась по формуле Стефана-Больцмана 1.2 по полученным значениям

эффективной температуры и радиуса.

$$L/L_{\odot} = 4\pi\sigma(R/R_{\odot})^2(T_{eff}/T_{\odot})^4. \quad (1.2)$$

1.7.1. Учет межзвездного покраснения, параллакс звезд и построение спектрального распределения энергии.

HD 111133, HD 188041, HD 204411 расположены на небольшом расстоянии от Солнца, поэтому поправки на межзвездное покраснение A_v малы и были приняты равными нулю для HD 188041, $0.^m03$ для HD 111133 и $0.^m016$ для HD 204411 [75]. Это соответствует значениям $E(B-V) = 0.^m009$ (HD 111133) и $0.^m005$ (HD 204411), если взять типичный параметр $R_v = 3.1$ в стандартном минимуме поглощения. За последние годы были опубликованы новые трехмерные карты покраснения на основе данных миссии GAIA. В таблице 1.5 собраны данные $E(B-V)$ из четырех различных источников: Amôres&Lépine (2005) [75], Lallement et al. (2018) [76]¹⁾, Green et al. (2018) [77] и Gontcharov and Mosenkov (2018) [78]. Легко увидеть довольно большой разброс между разными наборами. Избыток цвета $E(B-V)$, извлеченный из каталогов Гончарова и Мосенкова (2018), дает самые большие оценки, в то время как карты межзвездной пыли в Местном рукаве, построенные Лаллементом и др. (2018) с использованием данных Gaia, 2MASS и APOGEE-DR14 дают нам значения $E(B-V)$, не сильно отличающиеся от значений Amôres и Lépine. Green et al. (2018) предоставляют код для расчетов $E(B-V)$ в различных режимах. Мы выбрали данные, рассчитанные в режиме "медиана". Чтобы учесть межзвездное покраснение, мы использовали процедуру FM_UNRED из пакета IDL Astrolib²⁾, которая использует параметризацию покраснения по Фитцпатрику [79].

Мы проверили подгонку SED для всех $E(B-V)$ из таблицы 1.5. Ри-

¹⁾<https://stilism.obspm.fr>

²⁾<https://idlastro.gsfc.nasa.gov>

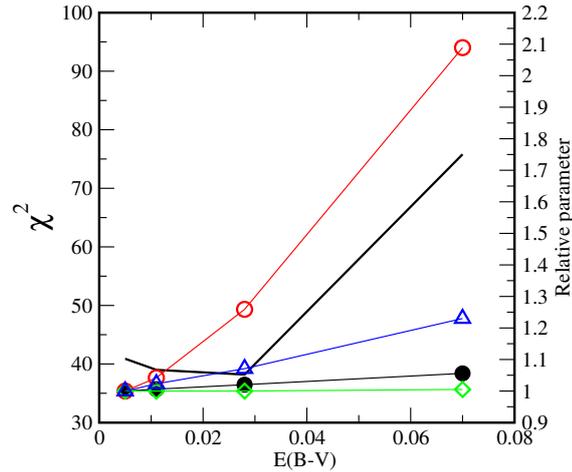


Рис. 1.12. Фундаментальные параметры HD 204411 как функция $E(B-V)$. Черная сплошная линия показывает χ^2 фитирования SED (левая y -ось), как вариацию относительных значений для T_{eff} (черные точки), $\log g$ (красные точки), радиуса (зеленые ромбы) и светимости (синие треугольники) отмечены на правой y -оси. Эталонные параметры, полученные при $E(B-V)=0.^m005$ приведены в Табл. 1.7.1.

сунок 1.12 демонстрирует влияние покраснения на полученные звездные параметры T_{eff} , $\log g$, радиус и светимость в HD 204411. Аналогичная картина была получена для HD 188041. Очевидно, что наше решение для двух звезд, HD 188041 и HD 204411, с данными покраснения из [75] обеспечивает правильные параметры атмосферы и небольшое увеличение $E(B-V)$ (первые три точки на рис. 1.12) производит вариации параметров в пределах погрешностей, указанных в Табл. 1.7.1. Наибольшие изменения наблюдаются для силы тяжести, но в логарифмическом масштабе это соответствует погрешности 0.1 dex, приведенной в Табл. 1.7.1.

Однако для HD 111133 ситуация обратная. Наилучшее соответствие SED было получено для наибольшего покраснения, но наблюдаемый спектр высокого разрешения не может соответствовать атмосферным параметрам, полученным с этими значениями покраснения. При всех попытках подогнать наблюдаемую SED с $E(B-V) = 0.^m03$ мы не могли ограничить определить $\log g$. Используя покраснение из работы [78], мы получили наилучшее соответствие χ^2 , однако модель атмосферы с $T_{\text{eff}} = 10300$ K, $\log g = 3.17$ не может корректно описать профили линий водорода и ли-

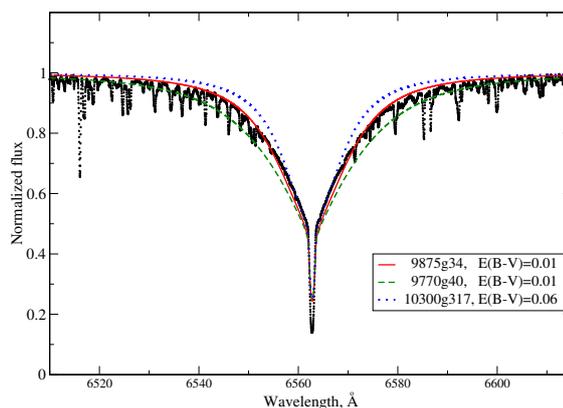


Рис. 1.13. Сравнение наблюдаемого профиля линии H_{α} в HD 111133 (черные закрашенные кружки) с синтетическими профилями, рассчитанными с использованием моделей атмосфер 9875g34 (красная сплошная линия), 9770g40 (пунктирная зеленая линия) и 10300g317 (синяя пунктирная линия).

нии Fe I/Fe II какой-либо стратификацией. Подробный анализ, проведенный для HD 111133 с $E(B - V) = 0.^m010 - 0.^m027$, показал небольшое, но не статистически значимое улучшение соответствия χ^2 SED с увеличением $E(B - V)$ для двух фиксированных $\log g$: 4.0 и 3.4. Подгонка SED с фиксированным $\log g = 4.0$ дает немного лучший χ^2 , однако предпочтительнее $\log g = 3.4$, потому что он лучше соответствует водородным линиям (см. Рис. 1.13).

В нашей процедуре подбора мы использовали параллакс 5.21(7) mas. Также как в случае HD 188041, модель с солнечным содержанием гелия несколько лучше соответствует наблюдаемому распределению энергии. Наконец, мы выбрали модель с $T_{\text{eff}} = 9875$ K, $\log g = 3.4$, полученную из SED-подгонки с $E(B - V)$, взятой из работы [75], как и для двух других звезд. Сравнение наблюдаемых потоков с теоретическими показано на рис. 1.18. Однако даже после сходимости мы не смогли достичь хорошего согласия между наблюдаемым и теоретическим распределением энергии, как в случае HD 188041. Это особенно заметно в УФ области спектра вплоть до бальмеровского скачка. Игнорируя потоки TD1, мы получили модель наилучшего соответствия, которая примерно на 100 K горячее, но не может определить $\log g$ (не показан на графике).

Используя наибольшее значение параллакса 6.23(93) [80], мы получаем те же эффективную температуру и силу тяжести, что и раньше, но меньший радиус $R/R_{\odot} = 2.92(44)$ (с учетом неопределенности параллакса в оценке ошибки).

Для всех звезд построены модели с содержанием солнечного гелия и уменьшенным на несколько порядков содержанием гелия, поскольку дефицит гелия характерен для пекулярных звезд. Наш анализ показал, что модели с нормальным содержанием гелия несколько лучше соответствуют наблюдаемой SED. Окончательные параметры атмосферы и радиусы звезд получаются в ходе итерационного процесса, как описано в разделе 3.2. Для достижения сходимости для HD 188041 потребовалось пять итераций, 3 итерации для HD 111133 и 2 итерации для HD 204411.

HD 110066 и HD 153882. Значения параллаксов для данных звезд практически совпадают: 7.131(56) mas и 7.43(39) mas из GAIA и Hipparcos [29] соответственно для звезды HD 110066, и 5.984(45) mas и 5.92(73) из GAIA и Hipparcos [80] соответственно для HD 153882. Это обстоятельство делает оценки радиусов достаточно надежными. Поправка за межзвездное покраснение была рассчитана по стандартной формуле:

$$A_v = 3.1E(B - V), \quad (1.3)$$

где $E(B - V) = 0.^m022$ (HD 110066) и $E(B - V) = 0.^m011$ (HD 153882) [75].

Для серии моделей звезды HD 110066 наилучшее совпадение наблюдаемого и теоретического потоков получено для модели с $T_{\text{eff}} = 9143$ K, $\log g = 4.06$ (9143g4.06), а для HD 153882 — для модели 9152g4.01. SED представлены на Рис. 1.17 и Рис. 1.21, соответственно.

HD 118022. Параметры звезды определялись по спектру UVES в фазе вращения 0.927. После двух итераций окончательная модель атмосферы была принята с параметрами $T_{\text{eff}} = 9142(30)$ K, $\log g = 4.2(2)$, $R/R_{\odot} =$

2.10(2) с использованием параллакса из каталога HIPPARCOS 17.65(20) mas [29]. Финальный SED с наилучшим согласием теоретических и наблюдаемых потоков представлен на Рис. 1.19.

HD 4778, HD 108662, HD 120198 и HD 220825. Звезда HD 4778 находится на расстоянии 107.268 пк (9.3224(916) mas) от Солнца, и была применена поправка на межзвездное покраснение $A_v = 0.065$ ($E(B - V) = 0.02$) [75]. HD 120198 расположена на расстоянии 94.173(614) пк (10.6187(692) mas), межзвездное покраснение из работы [81] принято как $E(B - V) = 0.008(11)$. HD 220825 расположена на более коротком расстоянии от Солнца 48.920(517) пк (10.6187(692)), и, соответственно, $E(B - V) = 0.002(14)$. Поэтому мы пренебрегли поправками на межзвездное поглощение для последних двух звезд. Для HD 108662 теоретический поток для соответствующей модели атмосферы подгонялся к наблюдаемому распределению с использованием параллакса $\pi = 13.5382(2245)$ mas, взятого из каталога GAIA DR2 [82], и варьируя радиус звезды. Поскольку HD 108662 – яркая звезда на близком расстоянии от Солнца, то межзвездное покраснение не учитывалось, что согласуется с предельной величиной $E(B - V) = 0.002(14)$, полученной по картам межзвездного поглощения в работе [81].

Для данных звезд было также сложно подобрать надежные значения $\log g$ из подгонки теоретического SED к наблюдаемому распределению энергии, и поэтому $\log g$ были выбраны как наиболее подходящие для профилей линий водорода при данной температуре (см., например, Рис. 1.14). Соответствующие $\log g$ приведены в Табл. 1.7.1. Примечательно, что для звезды HD 4778 нам удалось построить модель атмосферы даже без спектрофотометрических данных в оптическом диапазоне и с использованием только фотометрии Джонсона. Для HD 108662 при построении модели атмосферы использовался масштабирующий фактор 1.32 для наблюдений в УФ-области (см. подробнее в параграфе 1.8). Окончательные SED показаны на Рис. 1.15 (HD 4778), Рис. 1.16 (HD 108662), Рис. 1.20 (HD 120198) и

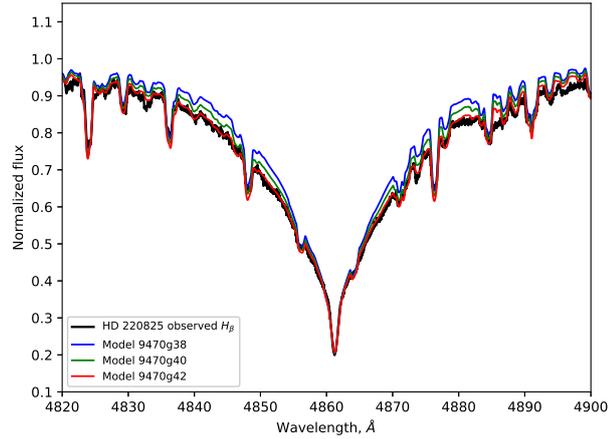


Рис. 1.14. Сравнение между рассчитанным и наблюдаемым профилем линии H_β в HD 220825 для моделей атмосфер с одинаковыми $T_{\text{eff}} = 9470$ К и разными $\log g = 3.8$ (голубая пунктирная линия), 4.0 (зеленая пунктирная линия) and 4.2 (красная пунктирная линия).

Рис. 1.24 (HD 220825).

Окончательные неопределенности в отношении звездных радиусов учитывают ошибки как в T_{eff} так и в параллаксе (расстоянии) для всех звезд. Окончательные фундаментальные параметры программных звезд собраны в Таблице 1.7.1.

1.8. Сравнение фундаментальных параметров с интерферометрическими измерениями

Настоящее исследование завершает программу определения фундаментальных параметров с помощью спектроскопии выборки Ар-звезд, выбранных для интерферометрических измерений. Окончательная выборка звезд с фундаментальными параметрами, полученная из интерферометрических наблюдений, приведена в статье [25]. Он содержит 14 звезд, и для всех, кроме одной, было проведено самосогласованное спектроскопическое моделирование. Сначала мы сравним спектроскопические и интерферометрические результаты, полученные в данной работе.

HD 108662. Для этой звезды мы получили наибольшую разницу между эффективными температурами, полученными с помощью спектроско-

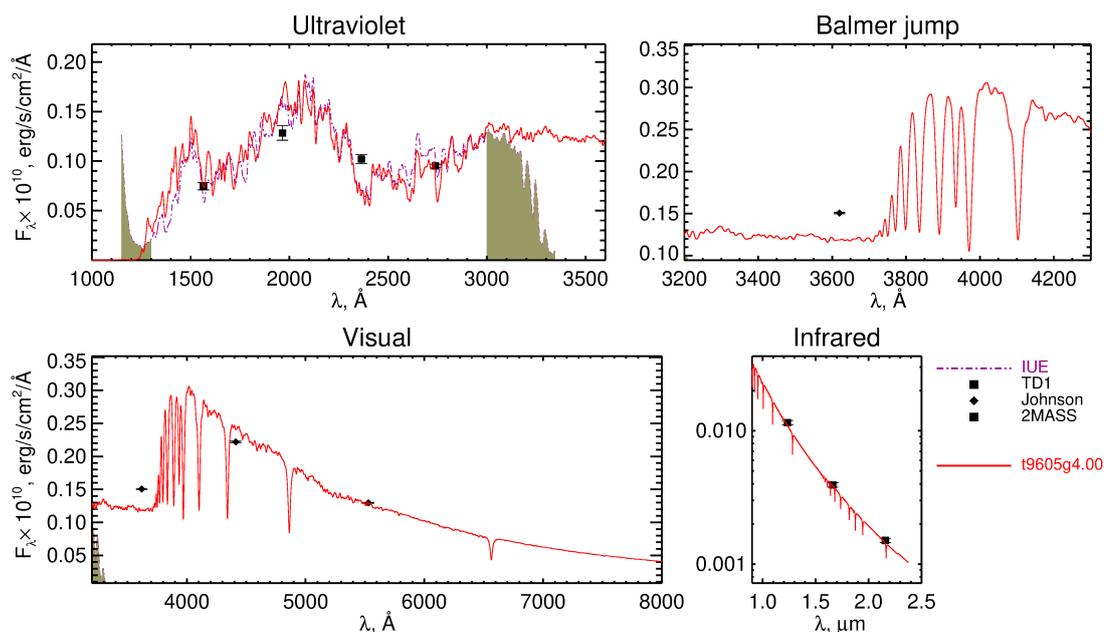


Рис. 1.15. Сравнение наблюдаемого распределения энергии, взятого из каталогов Адельмана (черные ромбы), TD1 (черные квадраты), фотометрия Джонсона (черные ромбы) и 2MASS (красные квадраты), и лучшего теоретического потока (красная сплошная линия), рассчитанного для атмосферы LLMODELS HD 4778 с параметрами $T_{\text{eff}} = 9605$ K, $\log g = 4.0$. Незакрашенные синие ромбы показывают теоретические потоки, свернутые с соответствующими фильтрами, которые использовались в наблюдениях. Заштрихованная область показывает спектральные области, исключенные из подгонки.

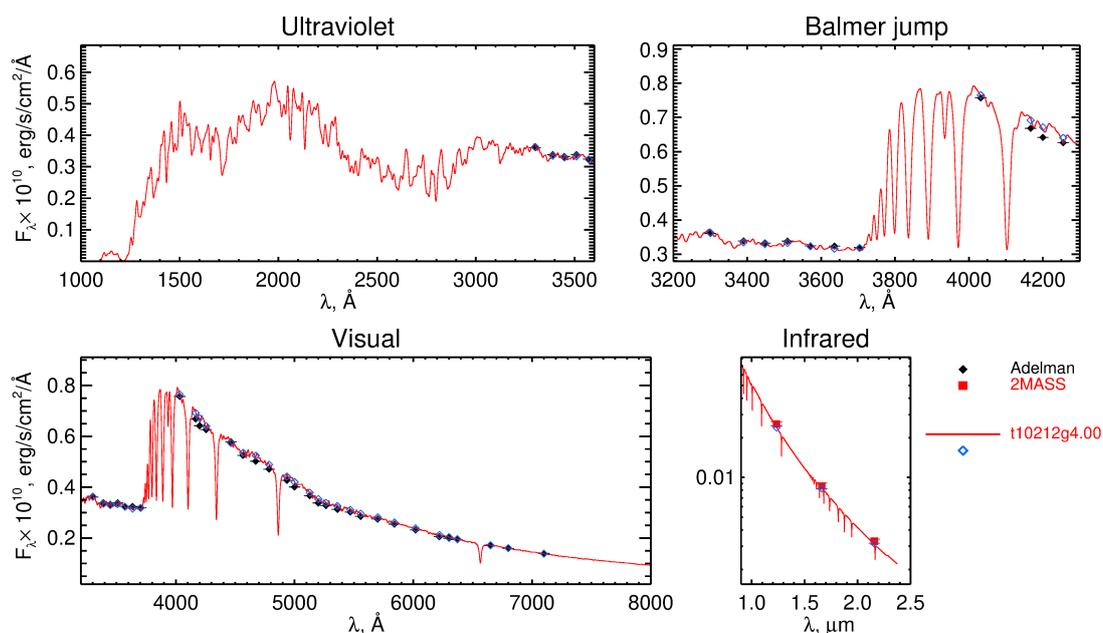


Рис. 1.16. То же самое, что на рис. 1.15, но для звезды HD 108662 с параметрами $T_{\text{eff}} = 10212$ K, $\log g = 4.0$.

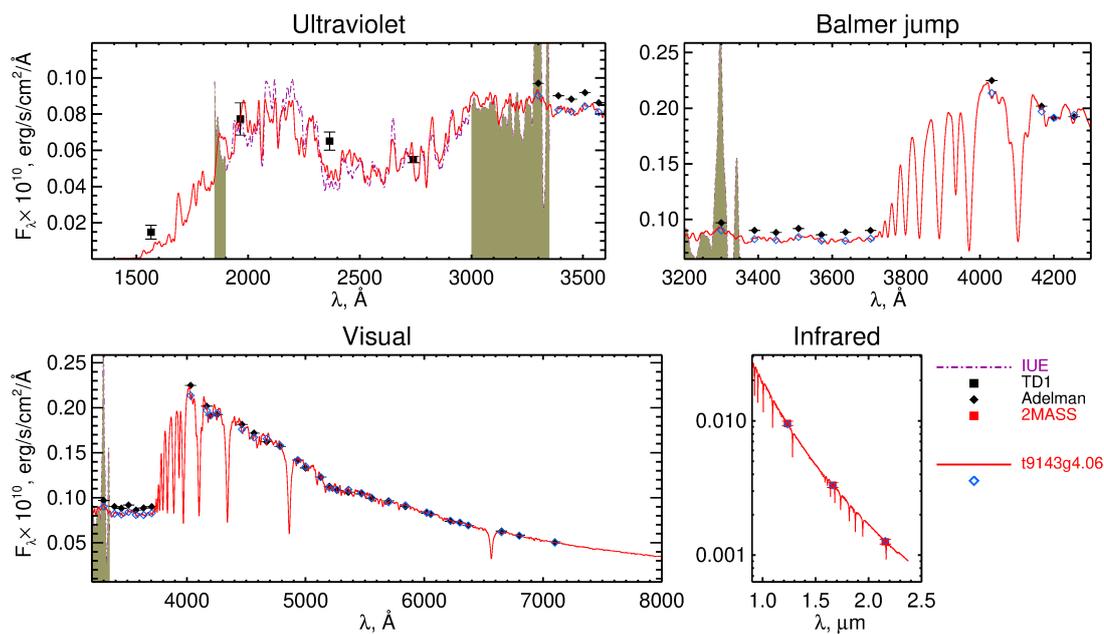


Рис. 1.17. То же самое, что на рис. 1.15, но для звезды HD 110066 с параметрами $T_{\text{eff}} = 9143$ K, $\log g = 4.06$.

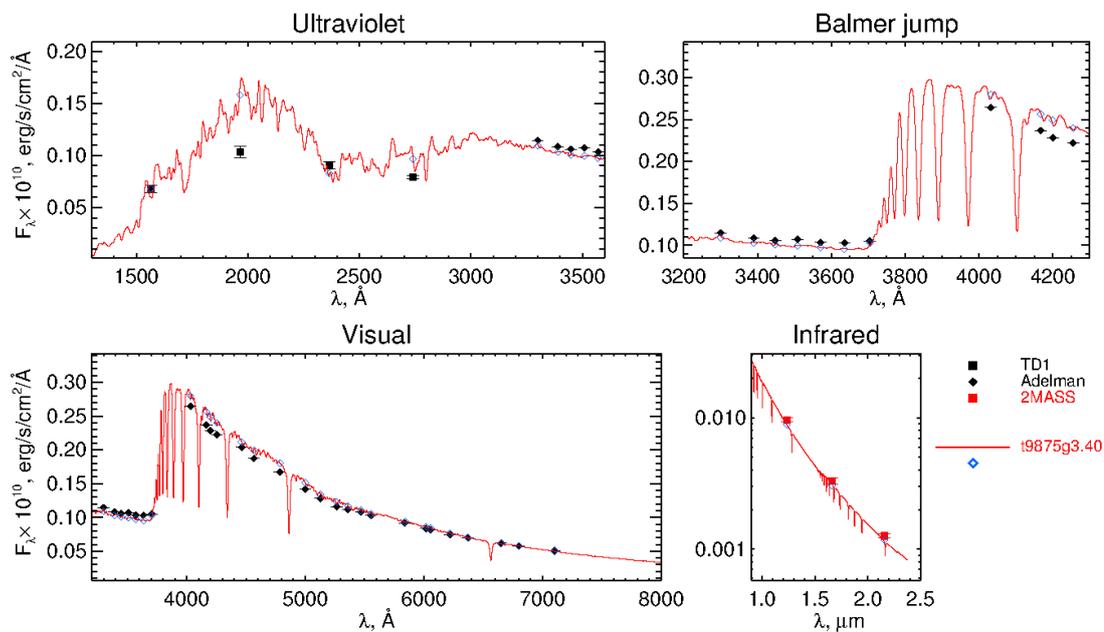


Рис. 1.18. То же самое, что на рис. 1.15, но для звезды HD 111133 с параметрами $T_{\text{eff}} = 9875$ K, $\log g = 3.4$.

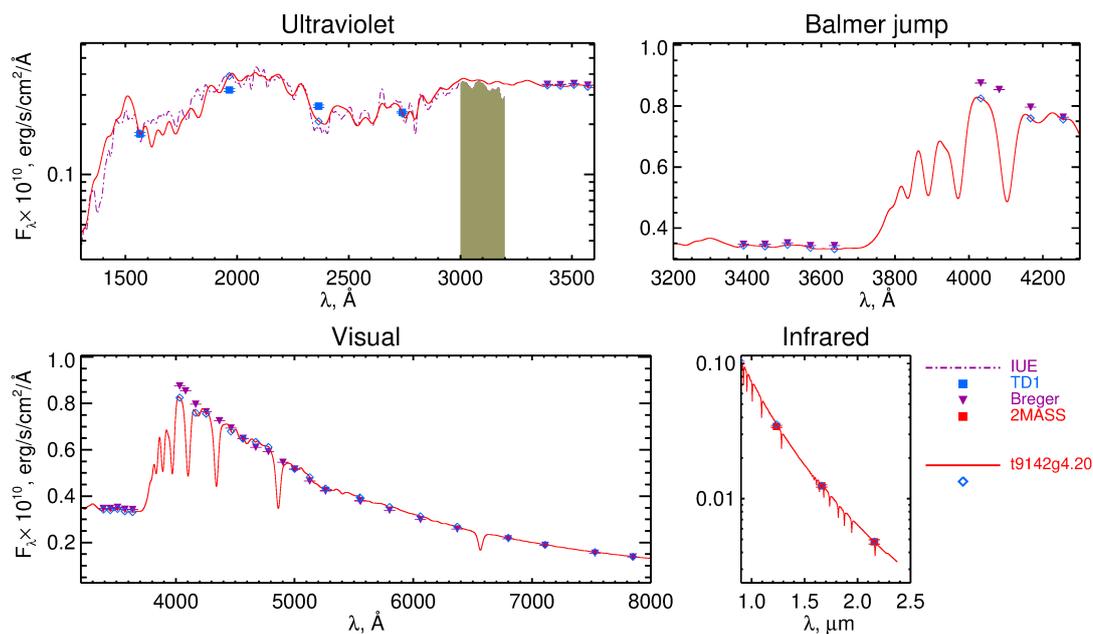


Рис. 1.19. То же самое, что на рис. 1.15, но для звезды HD 118022 с параметрами $T_{\text{eff}} = 9142$ K, $\log g = 4.2$.

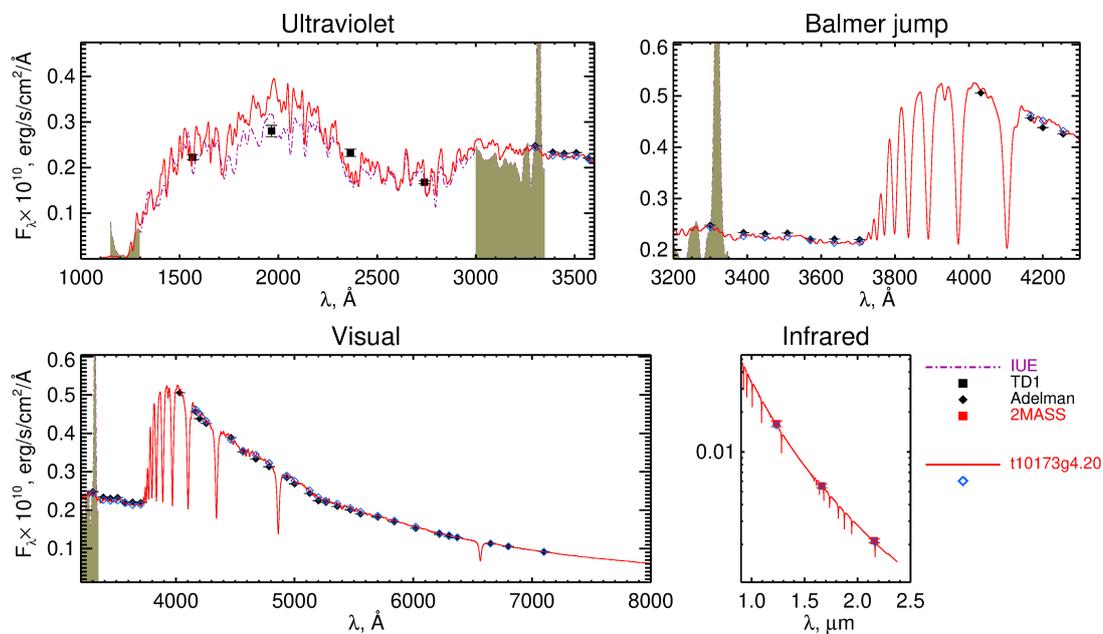


Рис. 1.20. То же самое, что на рис. 1.15, но для звезды HD 120198 с параметрами $T_{\text{eff}} = 10173$ K, $\log g = 4.2$.

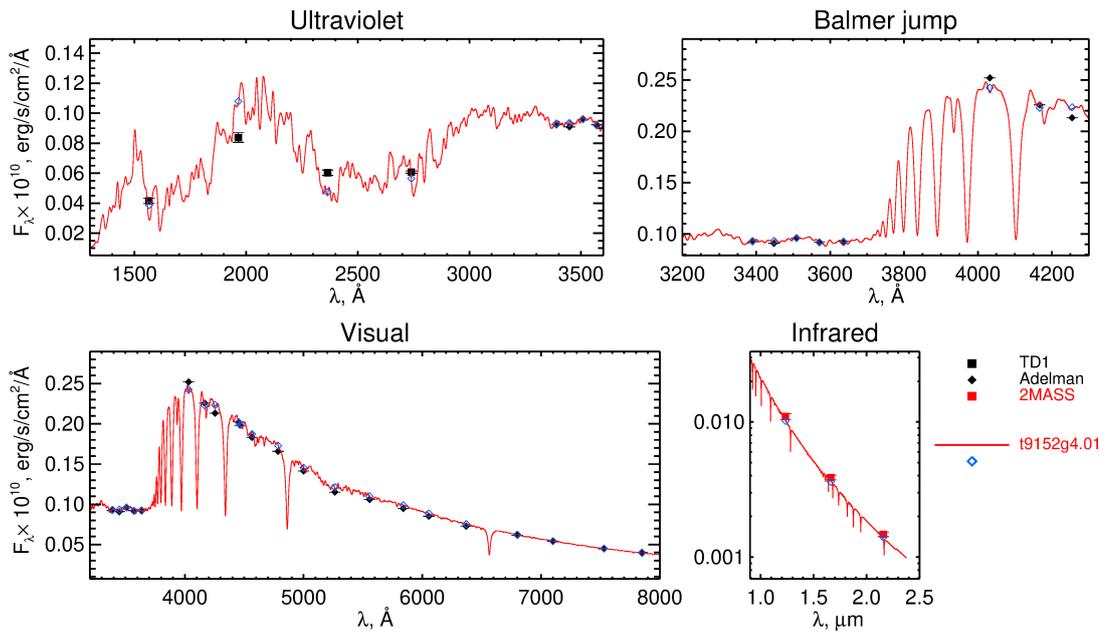


Рис. 1.21. То же самое, что на рис. 1.15, но для звезды HD 153882 с параметрами $T_{\text{eff}} = 9152$ K, $\log g = 4.0$.

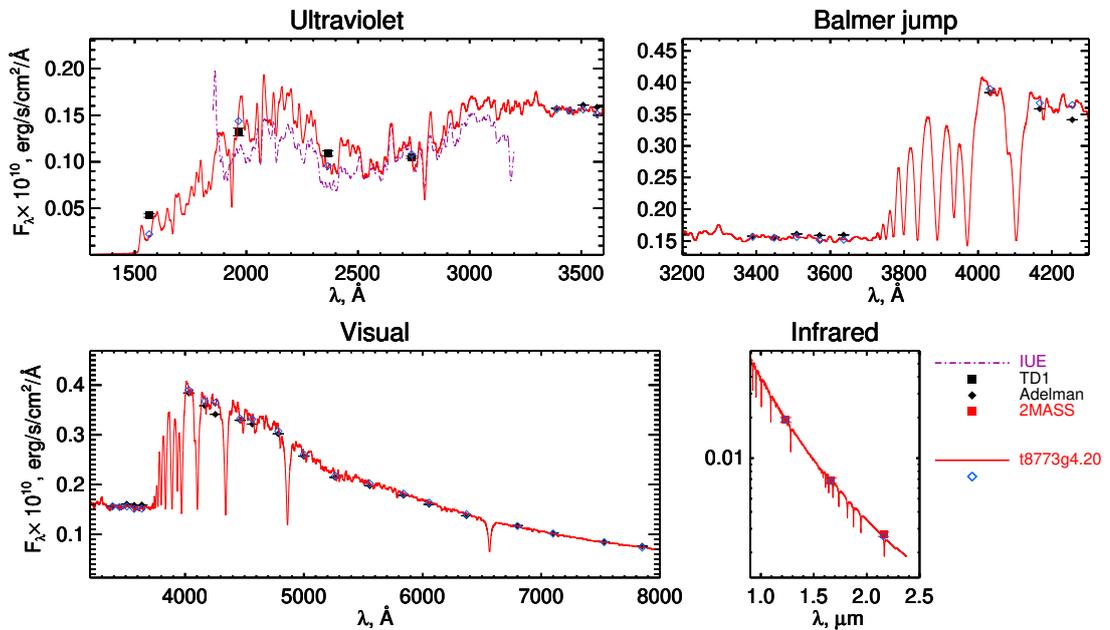


Рис. 1.22. То же самое, что на рис. 1.15, но для звезды HD 188041 с параметрами $T_{\text{eff}} = 8773$ K, $\log g = 4.2$.

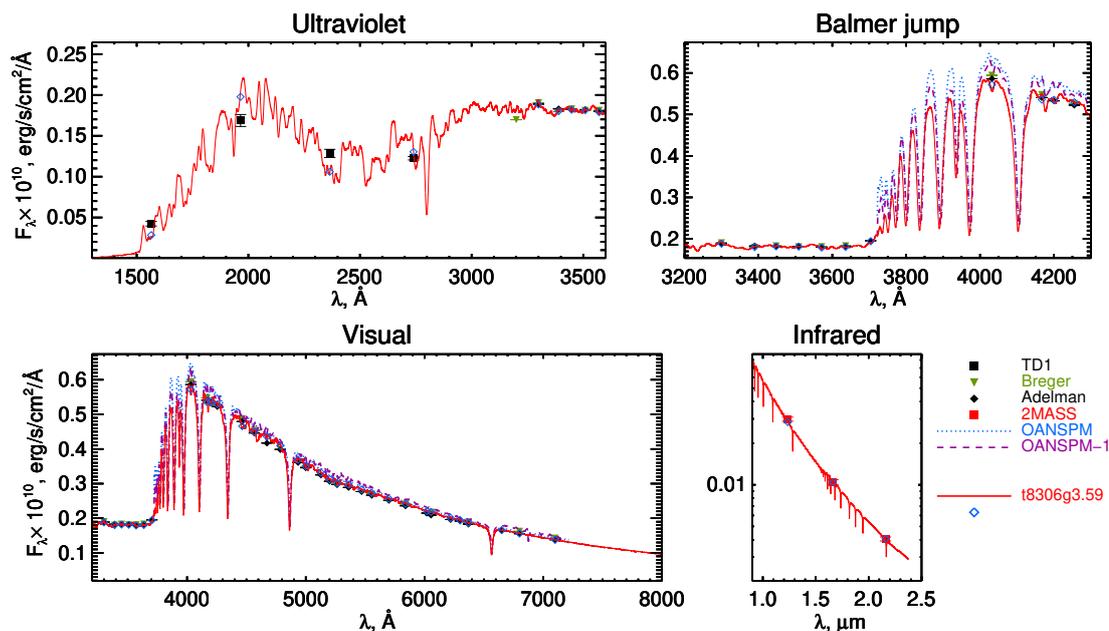


Рис. 1.23. То же самое, что на рис. 1.15, но для звезды HD 204411 с параметрами $T_{\text{eff}} = 8306$ K, $\log g = 3.59$. Здесь также показан SEDы, полученные с помощью длиннощелевого спектрографа Boller&Chivens (OAN SPM, Мексика), откалиброванные по абсолютным единицам потока с использованием двух разных калибраторов и отмеченные как OANSPM (калибратор BD+33d2642) и OANSPM-1 (калибратор HD 192281), соответственно (см. легенду к рисунку).

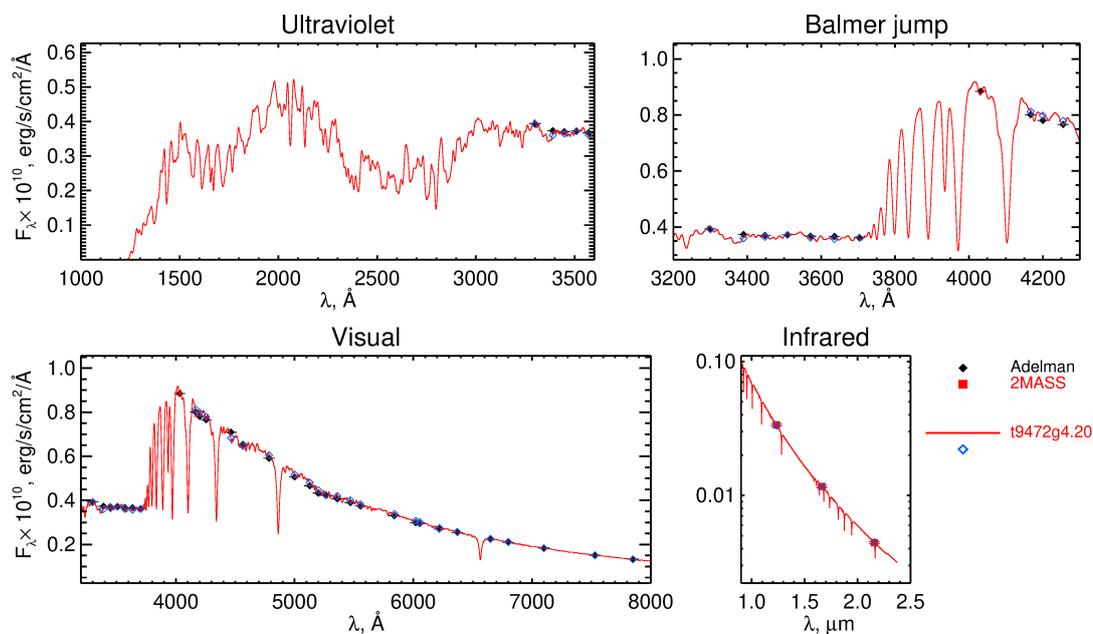


Рис. 1.24. То же самое, что на рис. 1.15, но для звезды HD 220825 с параметрами $T_{\text{eff}} = 9470$ K, $\log g = 4.2$.

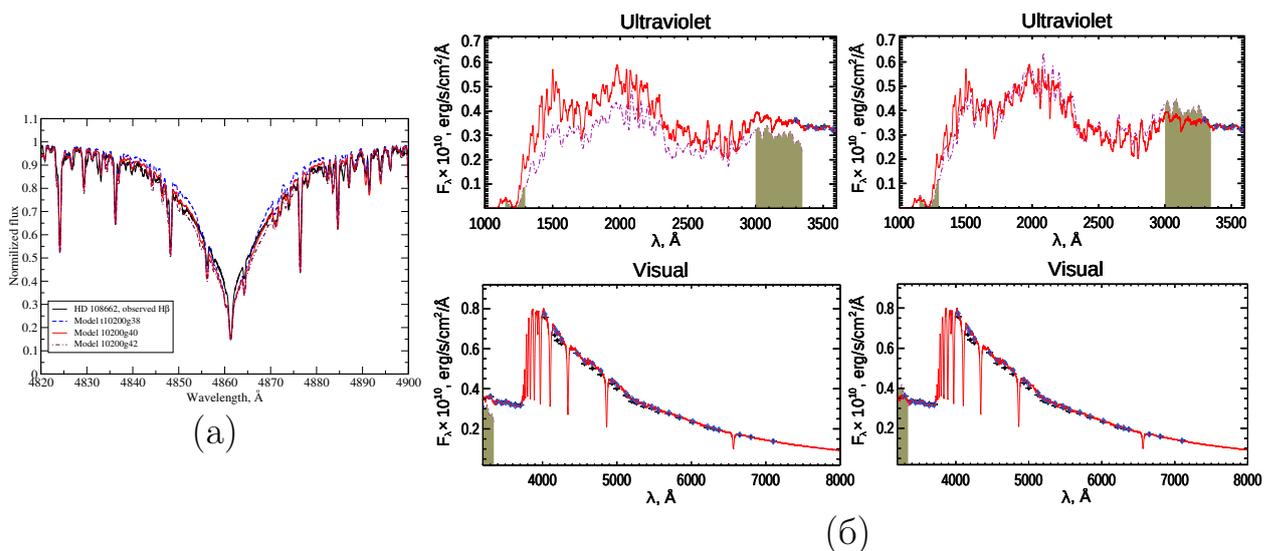


Рис. 1.25. (а) - Сравнение наблюдаемого профиля линии H_{β} с синтетическими спектрами для моделей с $T_{\text{eff}} = 10200$ К и с $\log g = 3.8$ (синяя штриховая линия), 4.0 (красная сплошная линия), 4.2 (коричневая штрих-пунктирная линия). (б) - Сравнение наблюдаемого распределения энергии с теоретическим, рассчитанным по программе LLmodels (красная сплошная линия) для модели атмосферы HD 108662 с параметрами 10212g40. Обозначения такие же, как и на (а). Наблюдения с IUE показаны штрих-пунктирной фиолетовой линией. Спектральный диапазон между УФ и оптическими наблюдениями отмечен зеленым цветом. Слева показаны оригинальные IUE данные, справа - УФ-потоки с учетом масштабирующего фактора 1.32.

пии и интерферометрии. Разница между T_{eff} превышает 1300 К. Необходимо отметить, что для HD 108662 имеются наблюдения в ультрафиолетовой области 1900-3000Å полученные на телескопе International Ultraviolet Explorer (IUE). Однако, при построении спектрального распределения энергии в широком диапазоне длин волн оказалось, что существует заметный скачок в узком спектральном диапазоне между УФ и оптическими наблюдениями (см. Рис. 1.25а). Если ввести масштабирующий коэффициент 1.32 для IUE потоков, то мы получаем хорошее согласие между наблюдаемым и теоретическим распределением энергии, рассчитанным с параметрами HD 108662, которые также описывают наблюдаемые профили водородных линий (Рис. 1.25б). Не исключено, что неточности в калибровке УФ потоков обусловлены яркостью HD 108662 (17 Com).

HD 4778. Полученное значение $T_{\text{eff}}^{\text{interf}}$ меньше $T_{\text{eff}}^{\text{spec}}$. Однако отметим, что температура, определенная по спектроскопии, в пределах ошибок

хорошо согласуется с фотометрическим значением. Таким образом, мы попытались оценить температуру с помощью дополнительной диагностики, которая должна соответствовать профилю линии H_β с модельными атмосферами, рассчитанными с использованием обеих T_{eff} оценок. Сравнение представлено на рис. 1.26а). Для обеих температур рассчитывались синтетические спектры с одинаковыми содержаниями. Видно, что модель атмосферы со спектроскопической температурой заметно лучше соответствует профилю линии H_β , чем интерферометрическая.

HD 120198. В то время как фундаментальные параметры HD 120198 согласуются в пределах ошибок определения, T_{eff} оцененная спектроскопически, выше и лучше соответствует наблюдаемой линии H_β по сравнению с интерферометрической (Рис. 1.26б).

HD 220825. Для этой звезды мы также получили большую разницу между T_{eff} , полученными с помощью спектроскопии и интерферометрии. Разница превышает указанные ошибки. Радиусы этой звезды, полученные двумя методами, очень близки ($R/R_\odot^{\text{spec}} = 1.71$ и $R/R_\odot^{\text{interf}} = 1.78$), поэтому более низкая эффективная температура, полученная на основе интерферометрического анализа, может быть результатом недооценки общего потока [25]. Нет никаких измерений потока HD 220825 в УФ-области, из-за чего в работе [25] этот поток оценивался по приблизительной корреляции между потоками в оптическом и УФ-диапазоне, которая была получена из наблюдений других звезд. Отметим, что спектроскопическая температура $T_{\text{eff}} = 9470$ К соответствует профилю линии H_β намного лучше, чем интерферометрическая $T_{\text{eff}} = 8790$ К, при условии одинакового $\log g = 4.2$ для обоих случаев (см. Рис. 1.26в). Однако, если мы уменьшим значение поверхностной гравитации с $\log g = 4.2$ до $\log g = 4.0$, мы получим разумное соответствие наблюдаемому профилю линии H_β с интерферометрической температурой (рис. 1.27а). Подгонка SED не дает надежной оценки для $\log g$ в диапазоне температур 9000–10000 К (см. Раздел 1.7), а умень-

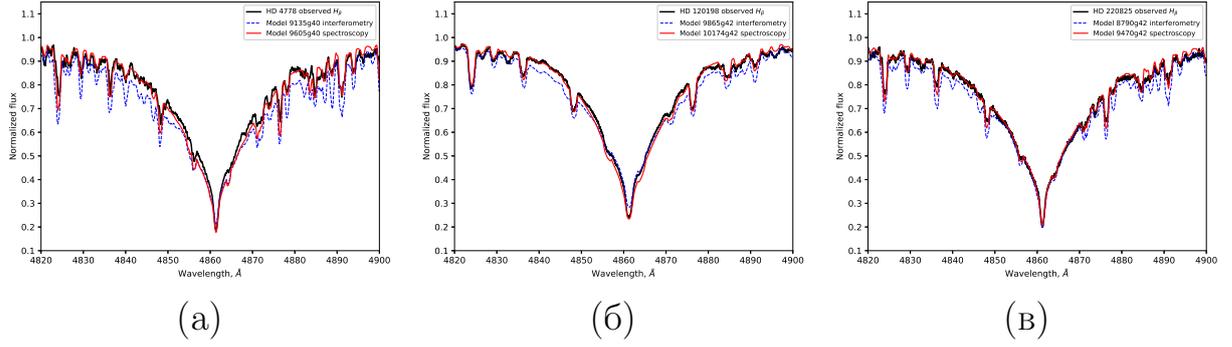


Рис. 1.26. Сравнение между моделированным и наблюдаемым профилем линии H_β в (а) – HD 4778, (б) – HD 120198 и (в) – HD 220825 для моделей с одинаковым $\log g$ и различными T_{eff} , полученными различными методами: $T_{\text{eff}} = 9605$ К (HD 4778), 10174 К (HD 120198), 9470 К (HD 220825) через самосогласованное моделирование (красная линия) и $T_{\text{eff}} = 9135$ К (HD 4778), 9865 К (HD 120198), 8790 К (HD 220825) через интерферометрию (голубая штрихованная линия).

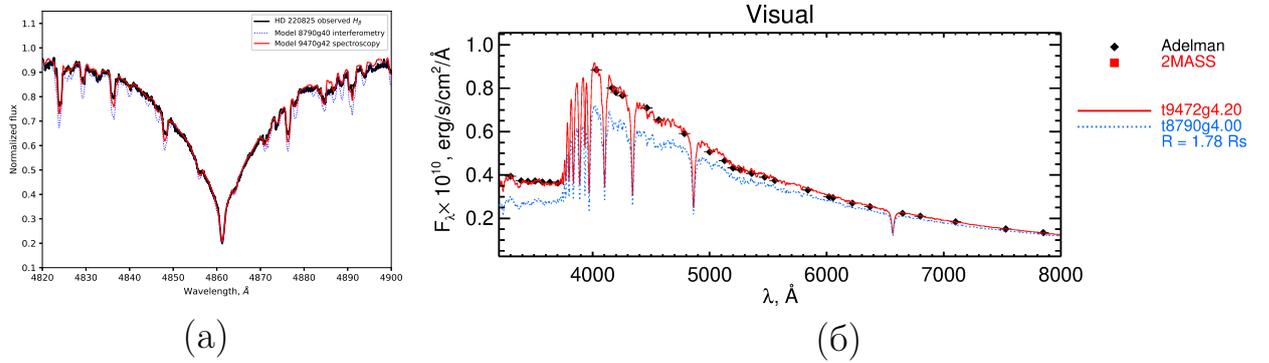


Рис. 1.27. Сравнение между наблюдаемым профилем линии H_β (а) и спектрофотометрическими сканами Адельмана (б) и рассчитанными моделями со спектроскопической (красная линия) и интерферометрической (голубая штрихованная линия) T_{eff} для HD 220825.

шение $\log g$ не приводит к заметному изменению спектрофотометрической подгонки, но комбинация интерферометрической температуры с любым из $\log g$ -значений не соответствует наблюдаемой спектрофотометрии, как показано на рис. 1.27б.

Для остальных звезд из выборки (см. Табл. 1.7.1) фундаментальные параметры согласуются в пределах ошибок определений.

В таблице 1.7.1 собраны фундаментальные параметры для 13 звезд сравнения, полученные с помощью интерферометрических [25], фотометрических [27] и спектроскопических методов. Параметры, полученные кос-

венными методами (спектроскопия и фотометрия), показаны в сравнении с параметрами, полученными прямым методом (интерферометрия) на рис. 1.28. 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. Например, мы заметили, что разница между спектроскопическими и интерферометрическими определениями в среднем выше для звезд с меньшими угловыми диаметрами $\theta < 0.3$ mas, что очень близко к текущему инструментальному пределу. Фундаментальные параметры, полученные из фотометрических калибровок, в целом не показывают значительных отклонений относительно спектроскопических и, следовательно, интерферометрических. Однако разброс корреляций параметров примерно в два раза больше, чем в спектроскопии.

Это сравнение показывает, что спектроскопические методы позволяют с достаточной точностью получать радиусы звезд для тех Ар-звезд, где интерферометрические наблюдения пока невозможны. Также показано, что менее трудоемкий фотометрический метод обеспечивает параметры звезд, достаточно точные, чтобы их можно было использовать для статистических исследований большой выборки Ар-звезд.

Построение теоретического SED не сильно зависит от доступности наблюдений во всех спектральных областях. Тем не менее, обязательно, чтобы все доступные наблюдения потока соответствовали одной модели атмосферы, как мы сделали в этом исследовании для HD 4778, где в визуальной области были доступны только два фотометрических измерения потока. Результирующий T_{eff} затем устанавливается входными данными модели, а не интегрированием по длине волны наблюдаемого потока. Использо-

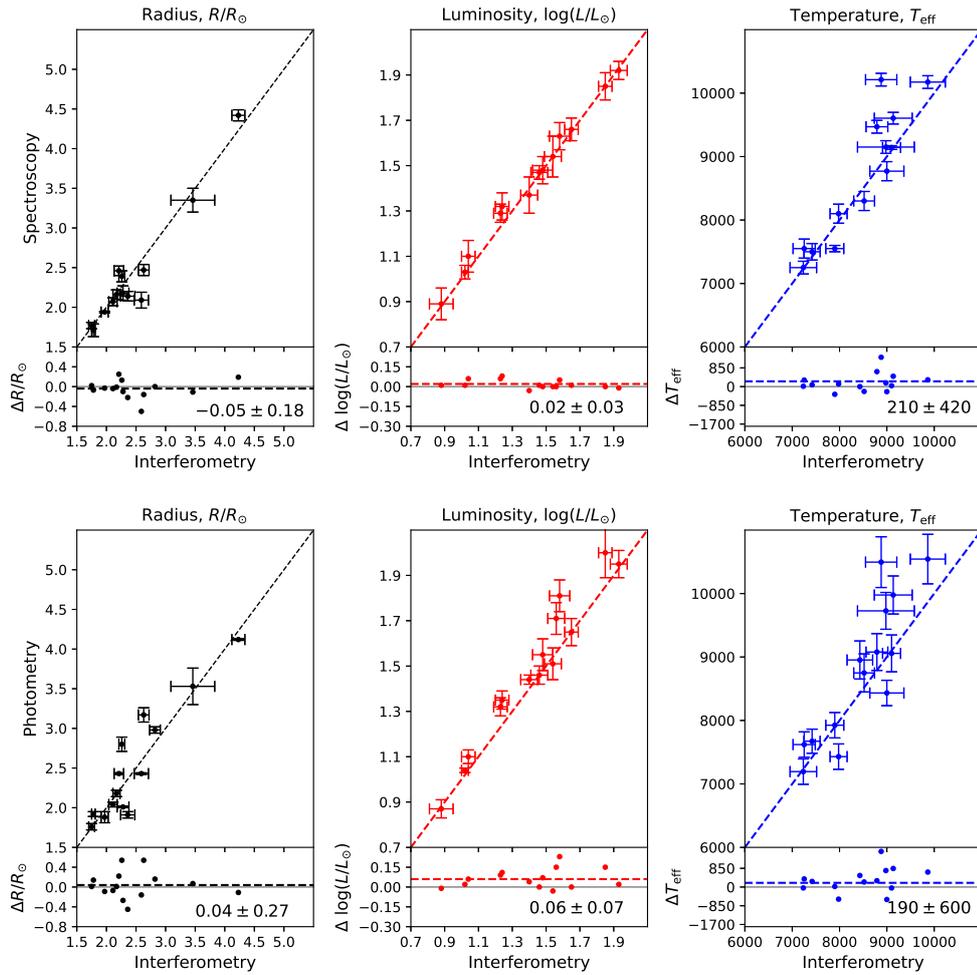


Рис. 1.28. Сравнение радиусов, светимости и эффективных температур, полученных методами спектроскопии, фотометрии и интерферометрии.

ние моделей атмосфер также позволяет выявить возможное несоответствие между потоками, наблюдаемыми в разных диапазонах длин волн и инструментами/миссиями, как это было, например, в случае УФ-наблюдений HD 108662 [83]. Независимая диагностика T_{eff} - по бальмеровским линиям водорода - поддерживает значения, полученные с помощью спектроскопии для всех этих случаев.

В табл. 1.7.1 собраны фундаментальные параметры Ар-звезд, определенные аналогичными методами по детальному спектроскопическому анализу с учетом аномалий химического состава и стратификации элементов в атмосфере.

1.9. Положение Ар-звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела

Затем мы использовали наши определения фундаментальных параметров, чтобы разместить звезды на диаграмму Герцшпрунга-Рассела (Рис. 1.29). Теоретические эволюционные треки для моделей солнечной металличности были взяты из работы [85].

Хотя количества объектов, показанных на рис. 1.29, недостаточно для статистического анализа, некоторые предварительные выводы можно сделать уже сейчас. Наша выборка звезд четко разделена на две группы. Около половины звезд расположены в средней части Главной Последовательности (ГП), что хорошо согласуется с результатами эволюционного исследования Ар-звезд, изложенными в работе [27]. Эти звезды обладают умеренно большими магнитными полями и большим избытком РЗЭ.

Можно заметить тенденцию уменьшения напряженности магнитного поля с возрастом для звезд с массой больше $2.5 M_{\odot}$, что подтверждает результаты работы [86]. Звезды, срок жизни которых очень близок к концу (HD 8441, HD 40312, HD 103498, HD 112185, HD 133792, HD 204411, отмеченные черными кружками на графике), имеют самые слабые магнитные поля. Некоторые из этих звезд также имеют минимальные аномалии редкоземельных элементов. Однако для звезд меньшей массы зависимость напряженности магнитного поля от возраста становится менее очевидной. Эти результаты согласуются с результатами, полученными в работе [25] с использованием интерферометрических оценок параметров звезд. Интересно, что звезды HD 4778, HD 120198 и HD 220825 - относительно молодые, но имеют магнитные поля в диапазоне 1-3 кГс, в то время как более старые звезды в том же диапазоне масс имеют более сильные поля. На данный момент неясно, является ли это реальным эффектом или ошибкой из-за небольшого размера выборки.

Также наши результаты подтверждают вывод, сделанный на основе

анализа вековых вариаций содержания в атмосферах Ар-звезд, принадлежащих разновозрастным скоплениям, о том, что аномалия РЗЭ со временем ослабевает [87]. Единственное исключение - звезда HD 111133, обладающая достаточно сильным магнитным полем, но находящаяся недалеко от группы эволюционировавших звезд. Как следует из раздела 1.7, SED для этой звезды не так хорошо описывает наблюдения, как для других звезд, в частности, в УФ-области. Отметим также большую разницу параллаксов в каталогах Hipparcos и GAIA. Использование параллакса из исходного каталога Hipparcos дает лучший результат, потому что оно приближает HD 111133 к группе звезд с сильным магнитным полем, как и ожидалось. Для этой звезды будет важно провести интерферометрические измерения, чтобы определить ее положение на диаграмме Г-Р.

В любом случае нам нужно проанализировать больше объектов с достоверно определенными фундаментальными параметрами, чтобы ограничить историю эволюции Ар-звезд.

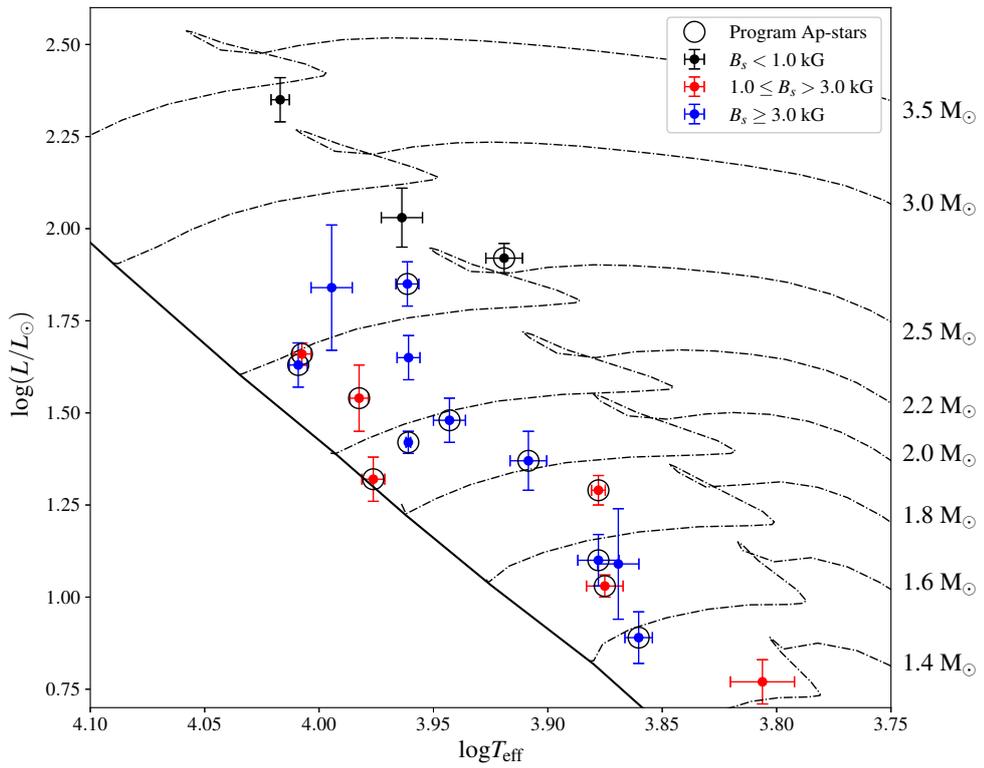


Рис. 1.29. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела для Ap-звезд, чьи фундаментальные параметры получены спектроскопическим методом. Черными кружками выделены звезды данного исследования, остальные звезды взяты из литературных источников, собранных в работе [61].

1.10. Положения, выносимые на защиту

По результатам первой Главы на защиту выносятся следующие положения:

- 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.
- 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.
- Показано, что, несмотря на более низкую точность фотометрического метода, фундаментальные параметры, полученные по фотометрическим калибровкам, можно использовать для статистических исследований.

Таблица 1.1. Литературные данные фундаментальных параметров звезд программы. Некоторые исследования не предоставляют ошибки измерений

HD	T_{eff}	$\log g$	$\log(L/L_{\odot})$	R/R_{\odot}	Ссылки	Метод
HD 4778	9977(300)		1.51(07)	1.91(04)	[27]	Фотометрия
	9135(400)		1.54(05)	2.36(12)	[25]	Интерферометрия
	9375(300)	4.14(09)	1.48(07)	2.10(22)	[30]	Фотометрия
HD 108662	10495(400)		1.87(07)	2.43(01)	[27]	Фотометрия
	8880(300)		1.58(06)	2.59(12)	[25]	Интерферометрия
	9500			2.60	[31]	SED
	10850	4.28			[34]	Фотометрия, Стремгрен
	10312	4.30			[34]	Фотометрия, Женева
	10300	4.30			[35]	Спектрофотометрия
HD 110066	8851(300)		1.75(10)	3.20	[27]	Фотометрия
	9030(60)				[33]	SED
	9100				[36]	
	9000	4.30			[11]	
HD 111133	9930(250)		1.92(13)	3.09	[27]	Фотометрия
	9850(220)				[33]	SED
	9930	3.65			[37]	Фотометрия, Стремгрен
	9510(310)	3.85(12)	1.88(14)	3.22(54)	[30]	Фотометрия
HD 118022	9057(290)		1.46(04)	2.18(04)	[27]	Фотометрия
	9100(190)		1.46(05)	2.17(06)	[25]	Интерферометрия
	9000			2.20	[31]	SED
	9500	4.00		2.20	[37]	Фотометрия, Стремгрен
	9120(290)	4.07(08)	1.51(06)	2.29(21)	[30]	Фотометрия
HD 120198	10543(390)		1.65(06)	2.01(01)	[27]	Фотометрия
	9865(370)		1.65(04)	2.28(10)	[25]	Интерферометрия
	9750	4.00		2.22	[31]	SED
	10500	4.19			[32]	Спектрофотометрия
	11234	4.07			[32]	$uvv\upsilon\beta$
	10400	4.00			[32]	H_{γ}
HD 153882	9730(290)		2.00(11)	3.52	[27]	Фотометрия
	8980(600)		1.85(04)	3.46(37)	[25]	Интерферометрия
	9450(580)				[33]	SED
	9250(300)	3.76(11)	1.92(11)	3.57(52)	[30]	Фотометрия
	9240	3.80			[32]	
	9250(200)	3.85			[11]	
HD 188041	8430(200)		1.55(07)	2.80	[27]	Фотометрия
	9000(360)		1.48(06)	2.26(05)	[25]	Интерферометрия
	8580(550)				[33]	IRFM
	8800	4.00			[37]	Спектрофотометрия
	8500	4.50			[11]	
	10160(300)	3.81(09)	1.56(08)	3.05(36)	[30]	Фотометрия
HD 220825	9078(290)		1.35(04)	1.92(03)	[27]	Фотометрия
	8790(230)		1.24(04)	1.78(03)	[25]	Интерферометрия
	9200(80)				[33]	SED
	9180(370)	4.27(07)	1.28(03)	1.73(14)	[38]	SED
	9080(290)	4.16(08)	1.38(53)	2.00(18)	[30]	Фотометрия
	9250	3.75			[39]	

Таблица 1.2. Список линий для измерения магнитного поля. Приведены элементы, длины волн, эффективный фактор Ланде g_{eff} и значения компонентов магнитного поля, полученные по VinMag6. В последней строке таблицы приведены компоненты поля, используемые в дальнейшем исследовании стратификации (усредненные значения)

Ион	λ , Å	g_{eff}	HD 108662	HD 110066	HD 153882	Ссылка
$\langle B_r \rangle$, Гс						
Cr II	5116.048	2.921		4138(58)		K10
Fe II	6149.246	1.351	2916(169)	4118(25)	3670(87)	K13
Fe I	6335.329	1.164		4241(49)		K14
Fe I	6336.823	2.003		3954(47)	3835(770)	K14
Fe II	7342.420	1.367		3763(22)		K13
Fe II	8352.828	1.285		3875(20)	3890(170)	K14
Mn II	7347.826		3633(132)			
			$\langle B_s \rangle = 3300(150)$	4015(180)	3800(200)	
Ион	λ , Å	g_{eff}	HD 188041	HD 111133		Ссылка
$\langle B_r \rangle \times \langle B_m \rangle$, Гс						
Cr II	5247.565	2.51	3380×1660			
Fe II	6149.246	1.351	2060×2900	560×4150		K13
Fe I	6336.823	2.003	1700×3490	1000×4780		K14
Gd II	7773.421	1.49	3190×1930			
			$\langle B_s \rangle = 2582 \times 2495$	560×4150		

Примечание: приведены элементы, длины волн, эффективный фактор Ланде g_{eff} , величина магнитного поля и соответствующей ошибки, полученные по VINMAG6, и ссылки, откуда взяты значения g_{eff} . В последней строке таблицы приведены значения поля, используемые в дальнейших расчетах. KXX – данные с сайта Куруца³⁾, XX – год расчетов.

Таблица 1.3. Сравнение содержания некоторых элементов в I и II степени ионизации, рассчитанных через эквивалентные ширины (EW) и через подгон синтетического спектра в BINMAG6 (SS) для звезды HD 220825

Ион	$\log \left(\frac{N}{N_{tot}} \right)_{EW}$	$\log \left(\frac{N}{N_{tot}} \right)_{SS}$
Mg I	-3.64(24)	-3.92(23)
Mg II	-3.84:	-4.45:
Fe I	-3.23(40)	-3.37(23)
Fe II	-3.08(34)	-3.58(30)
Mn II	-4.38(25)	-4.82(05)
Ti II	-5.03(31)	-5.91(31)
Cr I	-3.57(36)	-3.79(24)
Cr II	-3.55(25)	-3.84(36)
Nd III	-6.66(61)	-6.82(25)
Eu II	-7.51(61)	-8.38(03)
Eu III	-6.37:	-6.40:

Таблица 1.4. Параметры стратификации Fe, Cr и Ca в атмосферах звезд HD 108662, HD 110066, HD 111133, HD 188022 (в фазе вращения 0.927), HD 153882, HD 188041, HD 204411

HD	Элемент	Параметры стратификации				Параметры атмосферы	
		$\log\left(\frac{N}{N_{tot}}\right)_{up}$	$\log\left(\frac{N}{N_{tot}}\right)_{low}$	$\log\tau_{5000}$	$\Delta\log\tau_{5000}$	T_{eff}, K	$\log g$
				(скачка)	(скачка)		
108662	Fe	-5.19(22)	-3.18(03)	-1.70(12)	0.11(51)	10200	4.00
110066	Fe	-4.69(08)	-2.53(02)	-0.89(01)	0.03(06)	9140	4.06
	Cr	-4.77(04)	-3.10(03)	-0.95(02)	0.02(08)		
111133	Fe	-5.30(17)	-3.08(02)	-1.17(09)	0.02(39)	9875	3.40
	Cr	-5.48(14)	-3.16(05)	-0.99(04)	0.03(22)		
	Ca	-11.17(32.9)	-6.48(05)	-1.40(06)	0.02(38.2)		
118022	Fe	-4.94(11)	-2.73(03)	-0.93(01)	0.22(04)	9124	4.20
	Cr	-5.12(07)	-3.47(05)	-0.90(03)	0.01(20)		
	Ca	-7.62(32)	-4.35(44)	-0.77(02)	0.08(10)		
153882	Fe	-4.46(09)	-2.86(02)	-1.05(04)	0.02(37)	9150	4.01
	Cr	-5.55(20)	-3.54(05)	-1.11(07)	0.04(31)		
188041	Fe	-5.56(08)	-2.28(05)	-0.74(01)	0.27(02)	8770	4.20
	Cr	-7.52(54)	-3.07(09)	-0.87(01)	0.40(03)		
	Ca	-6.39(06)	-3.65(03)	-0.75(01)	0.20(03)		
204411	Fe	-4.77(02)	-2.74(05)	-0.11(01)	0.06(11)	8300	3.60
	Cr	-5.54(03)	-4.56(19)	-0.14(02)	0.06(21)		
	Ca	-7.12(14)	-4.41(26)	-0.31(01)	0.54(09)		

Примечание. Приведены параметры ступенчатой функции распределения элементов (содержание в верхних слоях атмосферы, в нижних слоях атмосферы, положение скачка содержания и ширина скачка).

Таблица 1.5. Данные межзвездного покраснения для звезд HD 111133, HD 188041 и HD 204411

HD	d, пк	E(B-V)			
		1	2	3	4
HD 111133	191.9(2.1)	0.010	0.017(020)	0.027	0.06(05)
HD 188041	85.3(0.7)	0.000	0.007(017)	0.012	0.10(05)
HD 204411	120.0(1.6)	0.005	0.011(015)	0.028	0.07(05)

1 – [75], 2 – [76], 3 – [77], 4 – [78].

Таблица 1.6. Фундаментальные параметры выборки Ар-звезд, полученных с помощью различных методов для сравнения (спектроскопия, интерферометрия, фотометрия). В $\log g$ символ ":" означает, что оно было уточнено по профилям водородных линий

Звезды HD	Спектроскопия				Интерферометрия			Фотометрия			B_s , kGs
	T_{eff} , К	$\log g$	R/R_{\odot}	L/L_{\odot}	T_{eff} , К	R/R_{\odot}	L/L_{\odot}	T_{eff} , К	R/R_{\odot}	L/L_{\odot}	
4778	9605(92) ^(a)	4.00:	2.14(4)	1.54(3)	9135(400)	2.36(12)	1.54(5)	9977(300)	1.91(4)	1.51(7)	2.6
24712	7250(100) ^(b)	4.10(15)	1.77(4)	0.89(7)	7235(280)	1.75(5)	0.88(7)	7194(200)	1.76(4)	0.87(4)	2.3
108662	10212(100) ^(c)	4.00:	2.09(10)	1.63(6)	8880(330)	2.59(12)	1.58(6)	10495(400)	2.43(1)	1.81(7)	3.3
110066	9140(100) ^(g)	4.06(5)	2.68(12)	1.65(6)				8851(300)	3.20(15)	1.75(10)	4.0
111133	9875(200) ⁽ⁱ⁾	4.00(2)	2.92(44)	1.84(17)				9931(290)	3.09(28)	1.92(13)	4.0
118022	9140(30) ^(d)	4.20(2)	2.16(6)	1.47(3)	9100(190)	2.17(6)	1.46(5)	9057(290)	2.18(4)	1.46(4)	3.0
120198	10174(100) ^(a)	4.20:	2.18(4)	1.66(3)	9865(370)	2.28(10)	1.65(4)	10543(390)	2.01(1)	1.65(6)	1.6
128898	7500(130) ^(e)	4.10(15)	1.94(1)	1.03(3)	7420(170)	1.97(6)	1.02(2)	7673(190)	1.88(7)	1.04(1)	2.0
137909	8100(150) ^(f)	4.00(15)	2.47(7)	1.37(8)	7980(180)	2.63(9)	1.40(5)	7430(200)	3.17(9)	1.44(2)	5.4
153882	9150(100) ^(g)	4.01(13)	3.35(3)	1.85(3)	8980(600)	3.46(37)	1.85(4)	9727(290)	3.53(23)	2.00(11)	3.8
176232	7550(50) ^(h)	3.80(10)	2.46(6)	1.29(4)	7900(190)	2.21(8)	1.23(4)	7925(200)	2.43(1)	1.32(4)	1.5
188041	8770(150) ⁽ⁱ⁾	4.20(10)	2.39(7)	1.48(3)	9000(360)	2.26(5)	1.48(6)	8433(200)	2.80(9)	1.55(7)	3.6
201601	7550(150) ^(f)	4.00(10)	2.07(5)	1.10(7)	7253(235)	2.11(7)	1.04(4)	7620(200)	2.04(3)	1.10(3)	4.0
204411	8300(150) ⁽ⁱ⁾	3.60(10)	4.42(15)	1.92(6)	8520(220)	4.23(11)	1.93(5)	8749(300)	4.12(1)	1.95(6)	0.8
220825	9470(100) ^(a)	4.20:	1.71(4)	1.32(4)	8790(230)	1.78(3)	1.24(4)	9078(290)	1.92(3)	1.35(4)	2.0

Примечание: ^(a) Romanovskaya et al 2021, ^(b) [12], ^(c) [83], ^(d) [84], ^(e) [16], ^(f) [18], ^(g) [51], ^(h) [19], ⁽ⁱ⁾ [61].

Глава 2. Влияние различных факторов на спектральное распределение энергии.

В данной Главе подробно рассматривается влияние фазовой переменности на спектральное распределение энергии звезд HD 220825 и HD 118022. В случае HD 118022 также излагаются результаты по изменению химического состава и стратификации элементов Fe, Cr, Ca с фазой вращения. Кроме того, рассматривается влияние Si на спектральное распределение энергии в атмосфере звезды HD 120198.

Результаты исследования опубликованы в работах 3, 6 (см. в списке публикаций, рекомендованных ВАК во Введении).

2.1. HD 220825

2.1.1. Влияние стратификации химических элементов на спектральное распределение энергии

Стратификация элементов влияет на спектральное распределение энергии в основном в видимой области спектра, где находится большинство спектральных линий.

Для HD 220825 расчеты со стратификацией и без нее представлены на рис. 2.1. Сравнение теоретических значений SED, рассчитанных для стратифицированной (9444g42) и не стратифицированной (9470g42) модели атмосферы и наблюдений, показало, что не стратифицированная модель атмосферы лучше описывает спектральное распределение энергии (рис. 2.1в).

Мы также проверили, как стратификация Fe и Cr влияет на профили линий водорода. На рис. 2.1б представлено сравнение теоретического профиля $H\beta$ для стратифицированной и нестратифицированной моделей

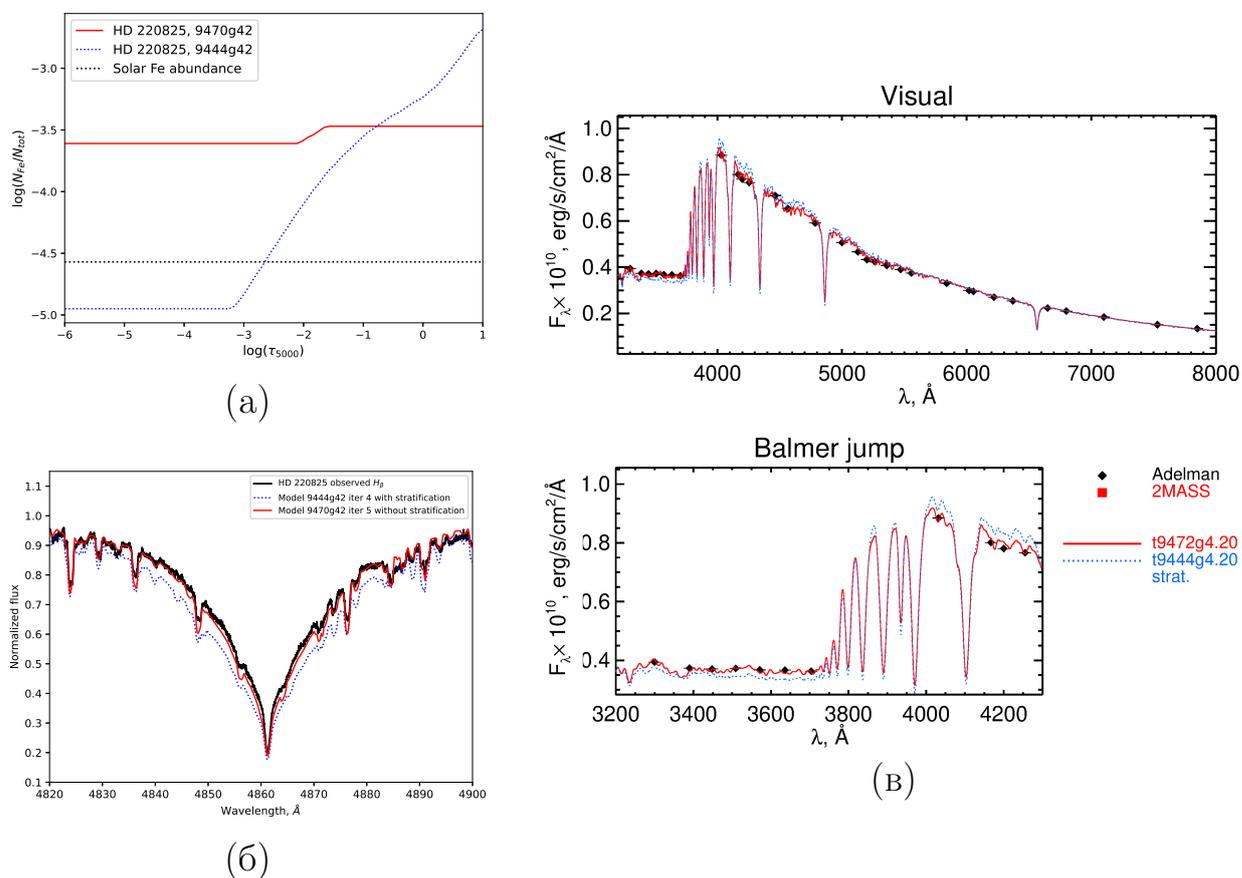


Рис. 2.1. (а) – Вертикальное распределение Fe (стратификация) в атмосфере HD 220825 для модели атмосферы 9470g42 (красная линия) и для модели 9444g42 (синяя штрихованная линия). Солнечное содержание показано черной точечной линией. (б) – Сравнение наблюдаемого профиля линии H_{β} в атмосфере HD 220825 (черная линия) с теоретическим профилем, рассчитанным с учетом стратификации (синяя штрихованная линия) и химически однородной атмосферой (красная линия). (в) – Сравнение между наблюдаемым и рассчитанным теоретическим спектральным распределением энергии, рассчитанным с (синяя точечная линия) и без (красная линия) стратификации. Наблюдаемые данные SED в видимой области спектра и вокруг Бальмеровского скачка показаны заполненными черными ромбами.

атмосфер с наблюдениями. Как и в случае с подгонкой SED, мы обнаружили, что химически однородная модельная атмосфера лучше описывает наблюдаемый профиль линии $H\beta$, чем модель со стратификацией.

2.1.2. Влияние неоднородности поверхностного содержания на определение фундаментальных параметров.

HD 220825 - хорошо известная звезда переменного спектра типа $\alpha^2 CVn$ с периодом вращения $P_{\text{rot}} = 1^d.418$ [39]. Звезда имеет пятнистую поверхность из-за неоднородного распределения содержания, и это может вызвать изменения в содержании элементов, полученных на разных фазах вращения. Это также может привести к обнаруживаемым вариациям SED. Определение фундаментальных параметров основано на подгонке к усредненным спектрофотометрическим данным из каталога Адельмана с содержаниями, полученными из спектра ESPaDOnS, при фазе вращения 0.011. Поскольку у нас есть спектрофотометрические наблюдения Адельмана, полученные на фазах вращения, отличных от спектра ESPaDOnS, это позволило нам оценить возможные ошибки в T_{eff} и $\log g$ связанные с неоднородным распределением содержания на поверхности звезды.

Спектрофотометрические данные в 10 фазах вращения были взяты из статьи [88]. В таблице 2.1.2 приведены значения T_{eff} с ошибками, полученными путем подгонки к отдельным спектрофотометрическим снимкам. $\log g$ трудно оценить однозначно, и мы просто установили довольно консервативную неопределенность 0.2 dex ($\log g = 3.8, 4.0$ и 4.2 использовались для выбора модели атмосферы из подгонки профиля линии водорода).

Чтобы оценить влияние изменчивости потока, вызванной пятнами поверхностного содержания, мы построили усредненное спектрофотометрические данные (черные закрашенные кружки) вместе со данными, полученными на разных этапах (закрашенные закрашенные кружки) на рис. 2.2. Мы сравнили наблюдения и рассчитанную теоретическую SED с оконча-

Таблица 2.1. T_{eff} , полученная из подгонки спектрофотометрических снимков в 10 фазах вращения. Усредненная эффективная температура T_{eff} со среднеквадратической ошибкой приведена в последней строке

HJD	Фаза	T_{eff} , К	dT_{eff} , К
2441559.0	0.895	9415	94
2441561.0	0.385	9429	93
2441561.8	0.934	9545	37
2441563.0	0.703	9507	37
2441577.8	0.234	9488	34
2441578.8	0.942	9522	31
2441616.8	0.717	9451	25
2443061.8	0.587	9477	26
2443063.8	0.941	9498	23
2443066.8	0.985	9431	22
Среднее		9476	41

тельно принятыми параметрами для HD 220825: $T_{\text{eff}} = 9470$ и $\log g = 4.2$. Чтобы увидеть влияние изменчивости 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 всех наблюдений. В то же время изменение $\log g$ мало влияет на SED (см. Рис 2.3). Таким образом, мы заключаем, что вариации потока, вызванные неоднородностью поверхности, не приводят к эффективному изменению температуры более чем на ± 100 К, что является типичной ошибкой в оценках температуры Ар-звезд.

2.2. HD 120198

2.2.1. Влияние Si на спектральное распределение энергии

Высокая скорость вращения $v \sin i = 56.0$ км с⁻¹ в HD 120198 не позволяет точно определить содержания некоторых элементов, поскольку оценки содержания часто основаны на нескольких блендированных соседними элементами линиях.

При расчете атмосферы звезды HD 120198 мы обнаружили, что из-

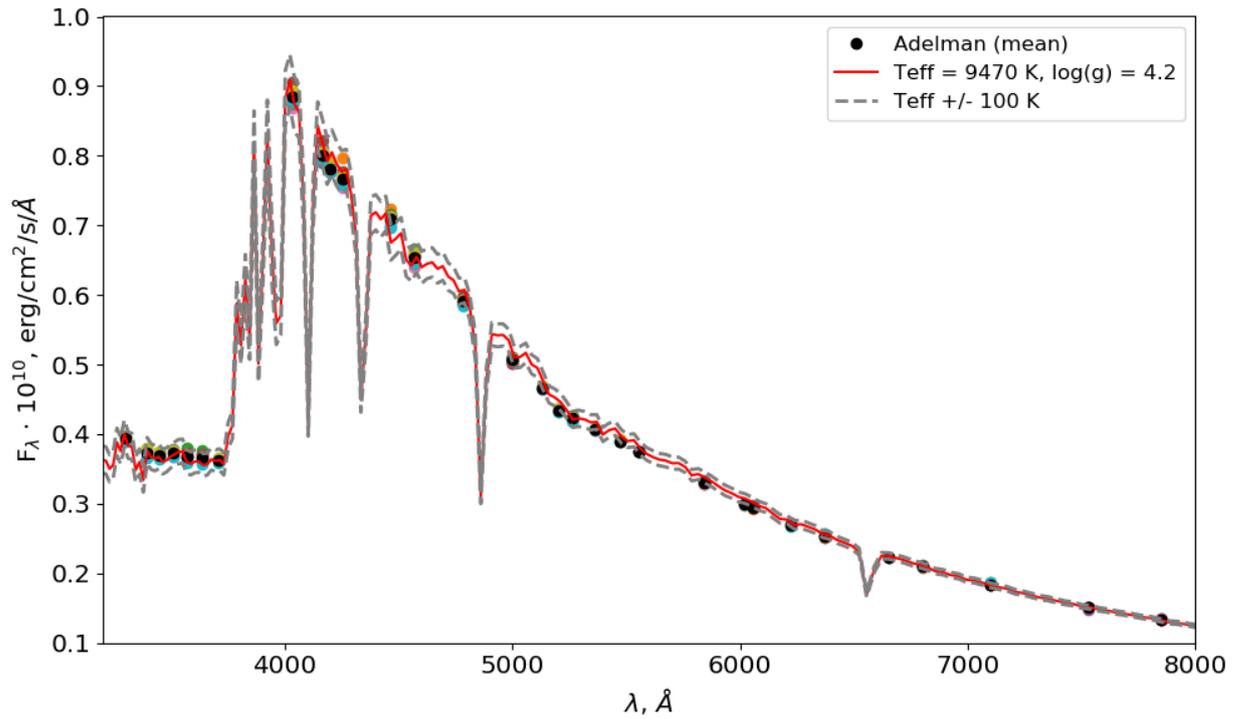


Рис. 2.2. Сравнение наблюдаемых спектрофотометрических данных Адельмана (цветные символы) и теоретического спектрального распределения энергии для HD 220825. Сплошная красная линия показывает теоретическое распределение энергии, рассчитанное для окончательной самосогласованной модели атмосферы HD 220825 с параметрами $T_{\text{eff}} = 9470$ K и $\log g = 4.2$. Серые пунктирные линии иллюстрируют эффект изменения T_{eff} на ± 100 K. Усредненные спектрофотометрические данные представлено закрашенными черными кружками.

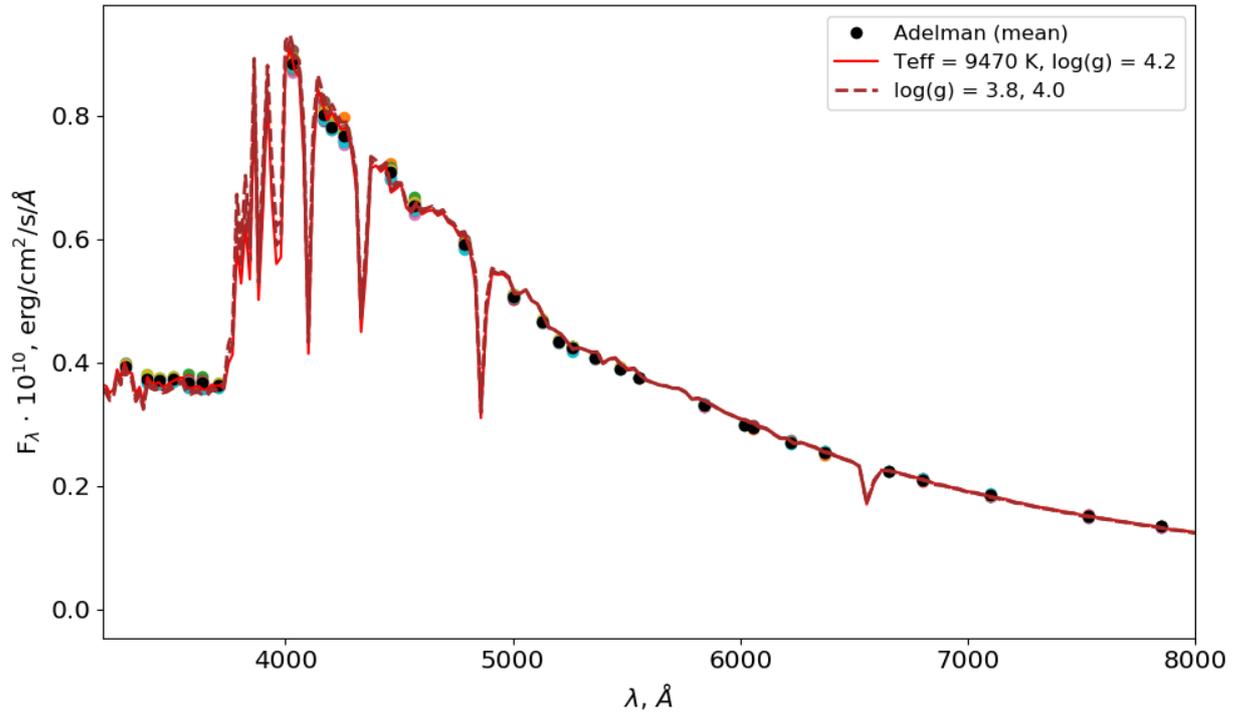


Рис. 2.3. То же самое, что на Рис. 2.2, только для $\log g$.

менение содержания кремния заметно влияет на часть потока в ультрафиолетовой области спектра (см. Рис. 2.4). Уменьшение содержания Si на 1.0 dex приводит к завышению потока в районе 1500\AA по сравнению с данными наблюдений IUE и TD1. В то же время в других областях спектра аппроксимация не изменилась при небольшом увеличении эффективной температуры примерно на 50 K. Это означает, что наблюдения потоков в УФ-области спектра могут служить важными индикаторами содержания Si в атмосферах некоторых Ap-звезд, подобно тому, что наблюдалось у более горячих химически пекулярных звезд B-типа (см., например, [72]).

2.3. HD 118022

Про Breger и Adelman сравнение потоков

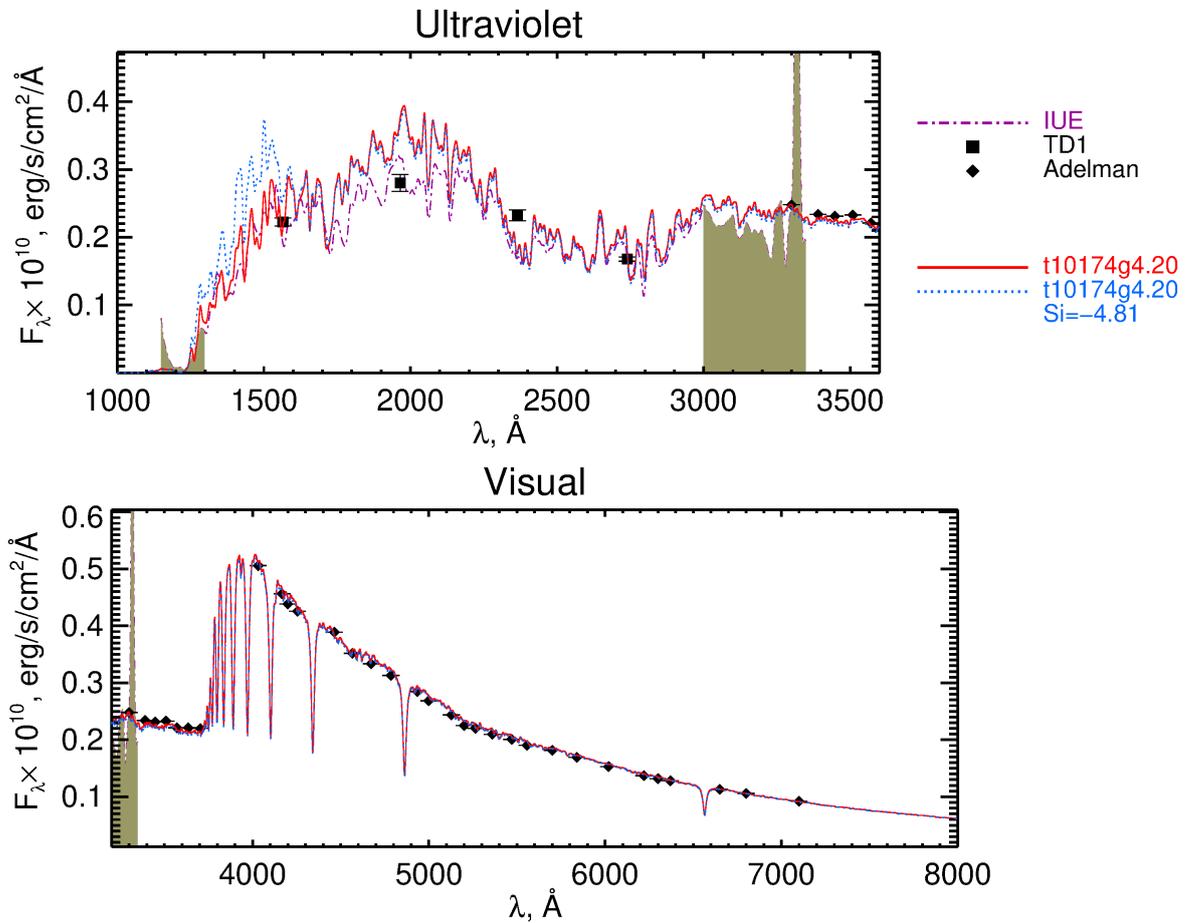


Рис. 2.4. SED звезды HD 120198 в УФ и видимой части спектра. Красная и голубая точечная линии показывают теоретические расчеты SED с одинаковыми финальными параметрами модели атмосферы 10174g42, но с разными содержаниями Si: $\log(N_{Si}/N_{tot}) = -3.82$ и -4.81 , соответственно. Затененные части указывают спектральные области, исключенные из аппроксимации.

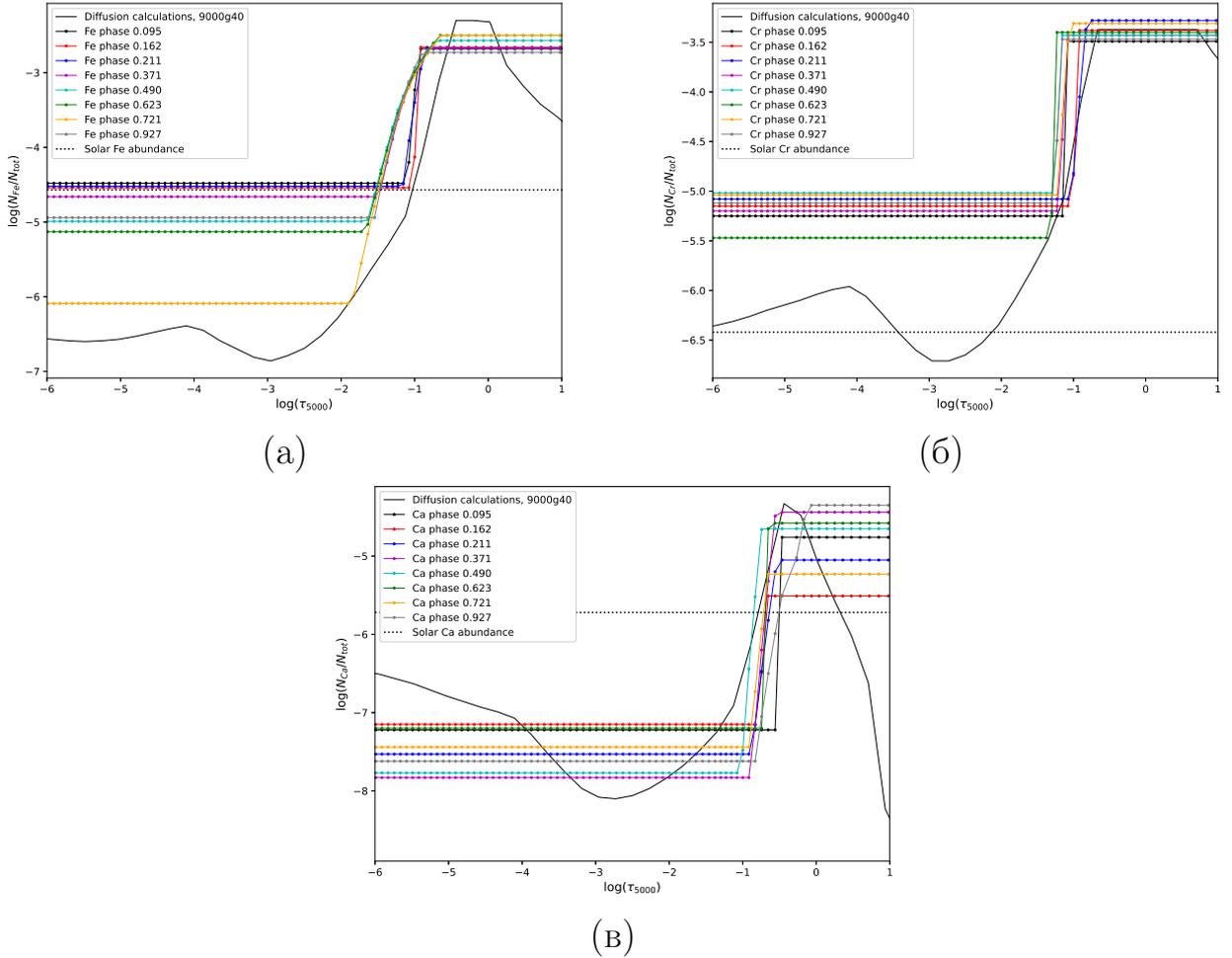


Рис. 2.5. Стратификация (а) – Fe, (б) – Cr и (в) – Ca в 8-ми фазах вращения в атмосфере звезды HD 118022. Пунктирная линия показывает теоретические расчеты стратификации элементов для модели атмосферы 9000g40. Точечная линия – солнечные значения элементов.

2.3.1. Стратификация элементов в зависимости от фазы вращения звезды.

Мы исследовали вертикальное распределение содержания Fe, Cr, Ca для 8-ми фаз вращения магнитной Ap-звезды 78 Vir (HD 118022) (см. подробнее Раздел 1.2). Для каждой фазы был определен химический состав и проведен стратификационный анализ элементов Fe, Cr, Ca (см. рис. 2.5). Параметры стратификации приведены в таблице 2.2. Поскольку линии кальция сильно подвержены не-ЛТР эффектам, стратификация Ca была рассчитана с учетом отклонения от ЛТР, рассчитанных для модели 9152g42.

Таблица 2.2. Параметры стратификации Fe, Cr и Ca в атмосфере звезды HD 118022 для 8-ми фаз вращения. Для фаз 0.095 и 0.623 также приведены параметры стратификации, рассчитанные с моделями атмосфер 9060g42 и 9181g42, соответственно

Фаза вращения	Элемент	Параметры стратификации				Параметры атмосферы	
		$\log\left(\frac{N}{N_{tot}}\right)_{up}$	$\log\left(\frac{N}{N_{tot}}\right)_{low}$	$\log\tau_{5000}$	$\Delta\log\tau_{5000}$	T_{eff}, K	$\log g$
				(скачка)	(скачка)		
0.095	Fe	-4.48(06)	-2.68(04)	-0.84(01)	0.04(12)	9124	4.20
	Cr	-5.25(12)	-3.49(04)	-0.86(02)	0.01(09)		
	Ca	-7.22(21)	-4.76(41)	-0.79(05)	0.02(77)		
0.095	Fe	-4.54(05)	-2.66(03)	-0.83(01)	0.02(04)	9060	4.20
	Cr	-5.46(32)	-3.47(05)	-0.81(01)	0.05(3.32)		
	Ca	-7.57(37)	-5.39(38)	-0.74(03)	0.03(40)		
0.162	Fe	-4.45(05)	-2.65(03)	-0.83(01)	0.02(04)	9124	4.20
	Cr	-5.15(05)	-3.83(07)	-0.83(02)	0.01(09)		
	Ca	-7.15(28)	-5.51(92)	-0.79(05)	0.02(77)		
0.211	Fe	-4.52(05)	-2.67(04)	-0.84(01)	0.07(03)	9124	4.20
	Cr	-5.08(06)	-3.28(08)	-0.82(02)	0.04(27)		
	Ca	-7.53(28)	-5.05(17)	-0.79(02)	0.05(96)		
0.371	Fe	-4.66(11)	-2.67(04)	-0.91(01)	0.20(04)	9124	4.20
	Cr	-5.20(09)	-3.43(06)	-0.87(02)	0.04(31)		
	Ca	-7.83(54)	-4.44(19)	-0.79(02)	0.05(1.21)		
0.490	Fe	-4.99(15)	-2.57(04)	-0.93(01)	0.29(03)	9124	4.20
	Cr	-5.02(09)	-3.43(05)	-0.90(03)	0.04(37)		
	Ca	-7.77(71)	-4.65(21)	-0.82(02)	0.05(9.92)		
0.623	Fe	-5.13(16)	-2.50(04)	-0.93(01)	0.31(03)	9124	4.20
	Cr	-5.47(11)	-3.40(03)	-0.92(03)	0.02(18)		
	Ca	-7.20(18)	-4.58(14)	-0.78(02)	0.01(06)		
0.623	Fe	-4.56(08)	-2.54(04)	-0.85(01)	0.08(05)	9181	4.20
	Cr	-5.52(13)	-3.47(03)	-0.94(02)	0.05(2.29)		
	Ca	-6.99(11)	-3.95(22)	-0.76(02)	0.01(07)		
0.721	Fe	-6.09(31)	-2.50(05)	-0.98(02)	0.40(03)	9124	4.20
	Cr	-5.03(07)	-3.32(05)	-0.87(02)	0.04(27)		
	Ca	-7.44(39)	-5.23(35)	-0.80(03)	0.04(56)		
0.927	Fe	-4.94(11)	-2.73(03)	-0.93(01)	0.22(04)	9124	4.20
	Cr	-5.12(07)	-3.47(05)	-0.90(03)	0.01(20)		
	Ca	-7.62(32)	-4.35(44)	-0.77(02)	0.08(10)		

Примечание. Приведены параметры ступенчатой функции распределения элементов (содержание в верхних слоях атмосферы, в нижних слоях атмосферы, положение скачка содержания и ширина скачка).

Затем мы посмотрели, как меняются параметры стратификации в зависимости от фазы вращения. Основные изменения наблюдаются в содержании железа, хрома и кальция в верхних слоях атмосферы (рис. 2.6а) и в положении скачка содержания Cr, Fe и Ca (рис. 2.6б), что, по-видимому, коррелирует с экстремумами продольного магнитного поля (рис. 2.6в). Значения продольного поля взяты из работ [89, 90] (рис. 2.6г). 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 содержанием: содержание увеличивается – граница скачка смещается выше в атмосфере (фазы вращения 0.5–0.7) и наоборот. Мы попытались зафиксировать содержание элементов в середине верхних слоев атмосферы во всех фазах и посмотреть, как меняется стратификация, но в целом картина остается прежней: чем выше содержание, тем выше находится скачок в атмосфере. Этот факт, по-видимому, является основной причиной изменения наблюдаемых значений.

78 Vir – вторая звезда, для которой было исследовано изменение стратификации с фазой вращения (т.е. проведен аналог трехмерного анализа). Аналогичные результаты были получены для звезды HD 24712 (Рузомаров – частное сообщение), где наблюдается такое же скачкообразное поведение содержания: чем выше содержание элемента, тем выше граница слоя в атмосфере, при практически постоянных значениях остальных параметров стратификации.

2.3.2. Влияние химического состава на SED.

Мы исследовали в двух фазах вращения в экстремумах магнитного поля (0.095 и 0.623) влияние полученного химического состава для данных фаз на спектральное распределение энергии. Для этого были использованы

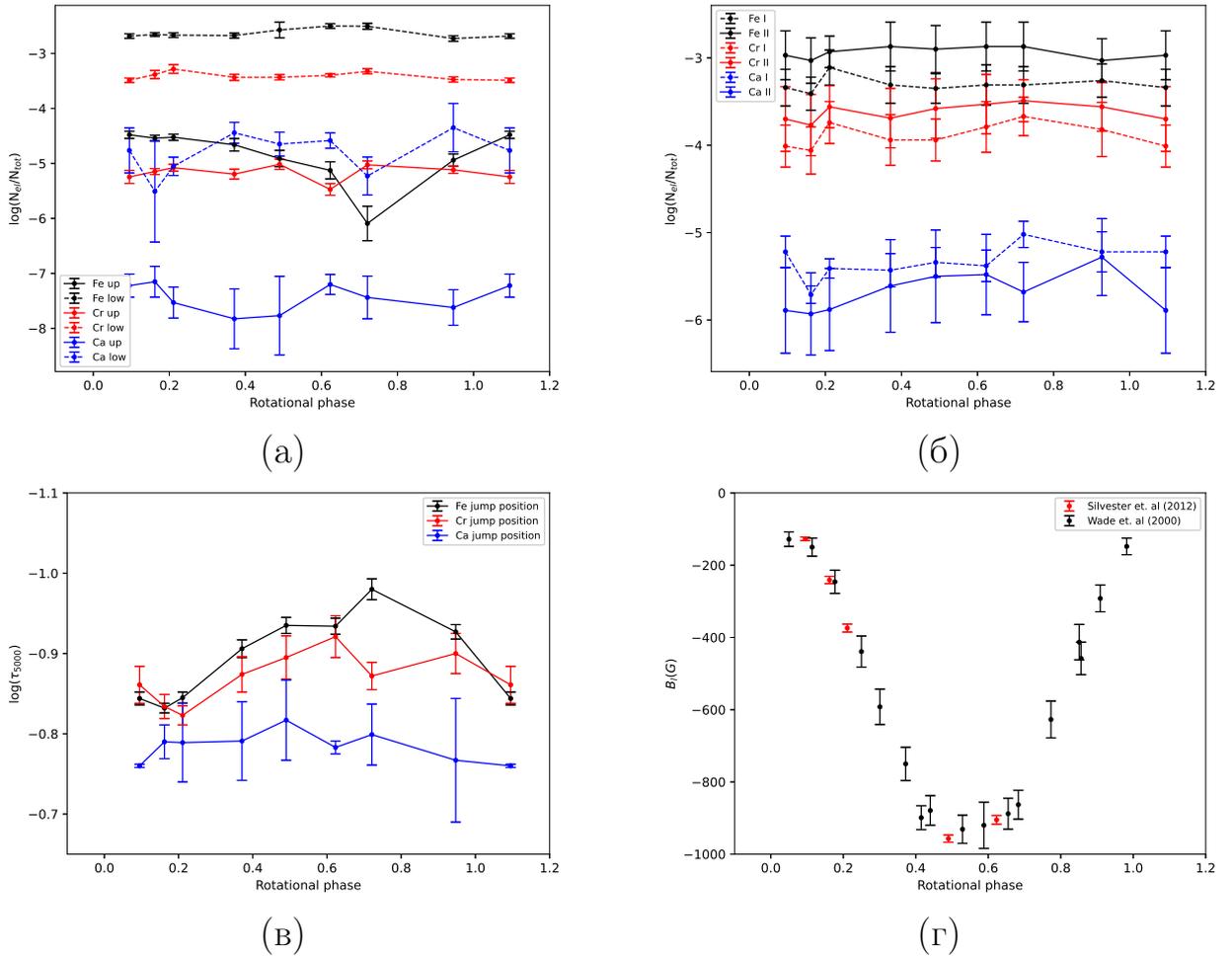


Рис. 2.6. (а) – Зависимость содержания Fe (черные точки), Cr (красные точки), Ca (синие точки) в верхних (сплошные линии) и нижних (штриховые линии) слоях атмосферы от фазы вращения, (б) – Зависимость поверхностного содержания Fe, Cr и Ca, полученного через эквивалентные ширины, от фазы вращения, (в) – Положение центра скачка содержания Fe, Cr и Ca в каждой фазе вращения и (г) – изменение магнитного поля с фазой вращения из работ [89, 90].

доступные данные из каталога Adelman. Модели атмосфер рассчитывались с учетом химического состава и стратификации элементов каждой фазы. Как видно из рис. 2.7, в целом, картина стратификации осталась прежней. Более сильное различие видно у железа для фазы 0.623: сдвинулся немного в верхние слои атмосферы центр скачка и уменьшилось содержание в верхних слоях атмосферы.

Вначале модель атмосферы для 78 Vir рассчитывалась со спектрофотометрией Breger, однако в каталоге Breger доступна только одна фаза вращения. Чтобы изучить влияние химсостава и стратификации на SED, были взяты данные из каталога Адельмана. Начальная модель атмосферы рассчитывалась по фазе 0.927, разницы между моделями по Брегер и по Адельман практически нет: Breger – 9152g42, Adelman – 9124g42.

Как видно из рис. 2.8 SED практически не изменяется, T_{eff} в выбранных фазах: для 0.095 модель атмосферы 9050g42, для фазы 0.623 – 9181g42. Как и в случае звезды HD 220825, определение T_{eff} лежит в пределах ± 100 К.

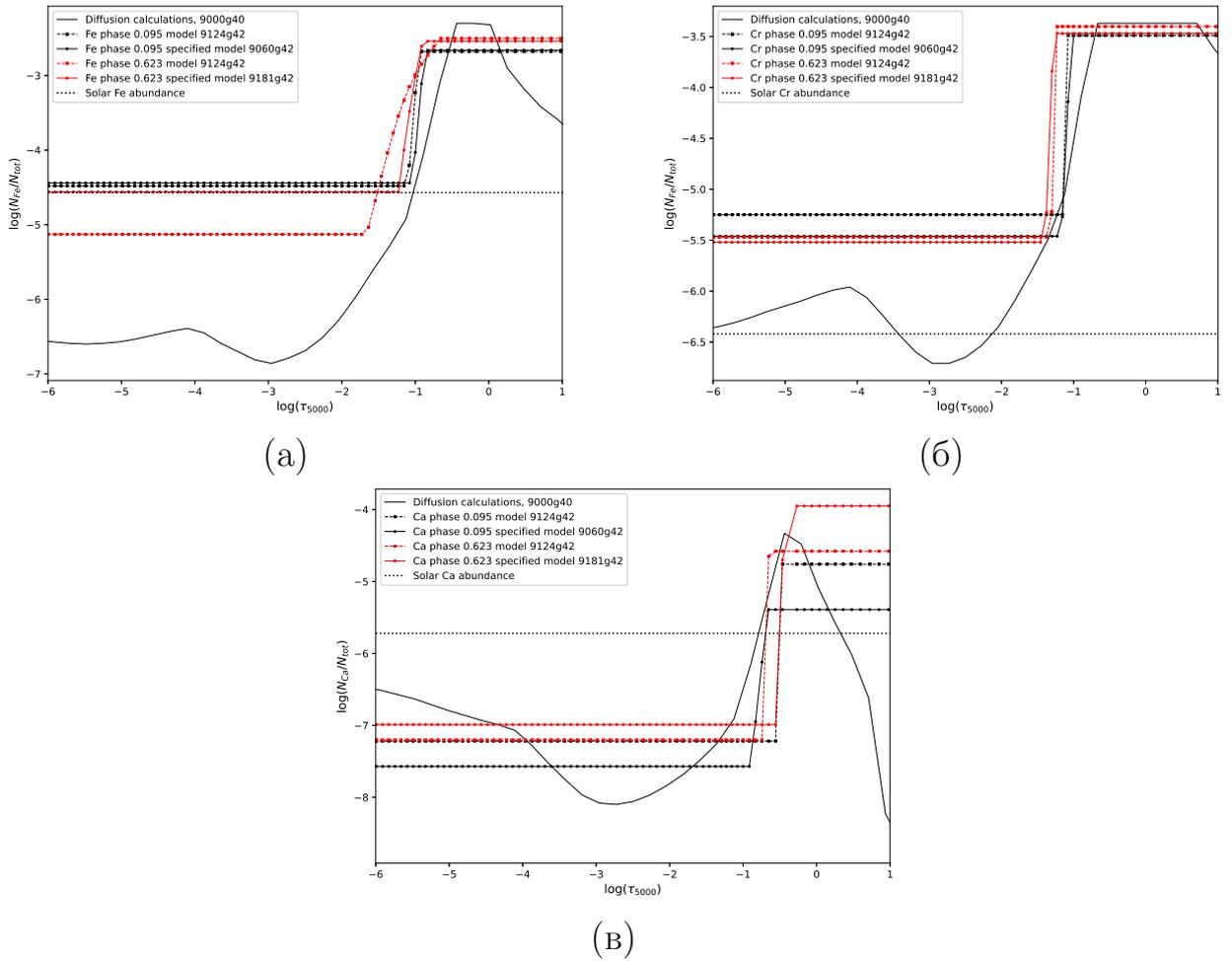
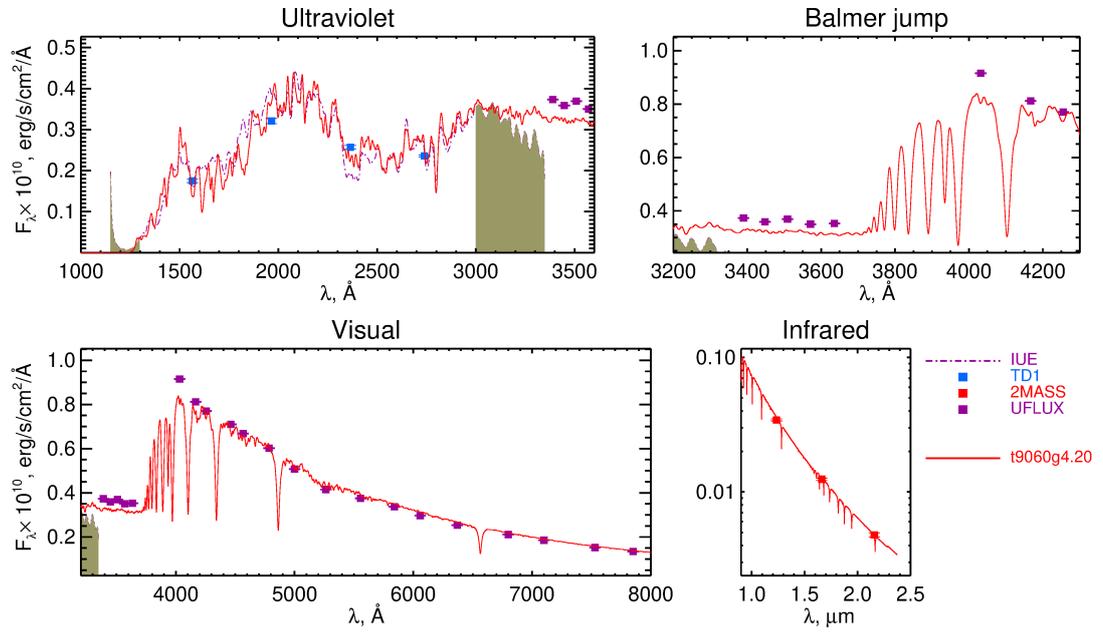
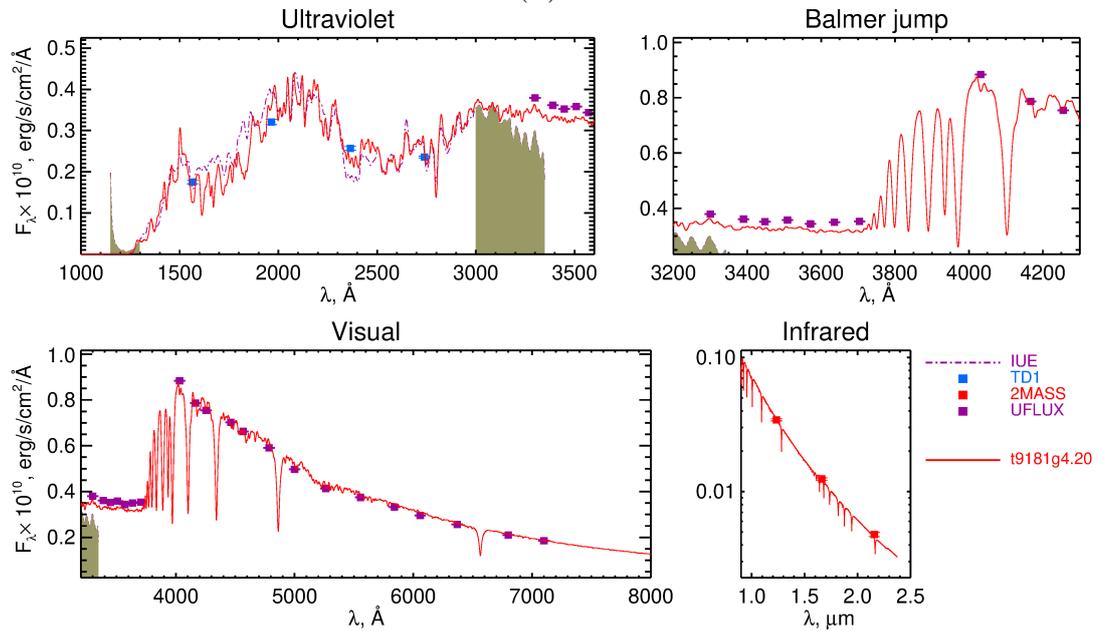


Рис. 2.7. Сравнение стратификации (а) – Fe, (б) – Cr и (в) – Ca для моделей атмосфер 9060g42 в фазе вращения 0.095 и 9181g42 в фазе 0.623. Пунктирная линия показывает теоретические расчеты стратификации элементов для модели атмосферы 9000g40. Точечная линия – солнечные значения элементов.



(a)



(б)

Рис. 2.8. (а) – Спектральное распределение энергии для модели атмосферы 9050g42, (б) – для модели атмосферы 9181g42.

2.4. Положения, выносимые на защиту

По результатам второй главы на защиту выносятся следующие положения:

- 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 Ар-звезд самосогласованным методом спектроскопии и ниже ошибки определения температуры по фотометрии.
- 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 магнитного поля, поскольку изменение положения скачка коррелирует с изменением величины магнитного поля.

Глава 3. Исследование зависимости содержания редкоземельных элементов от эффективной температуры и магнитного поля в Ар-звездах.

В данной главе исследована зависимость CePrNdEu-аномалий (различие в содержаниях элемента, определенных отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации) от эффективной температуры для 26 магнитных химически-пекулярных звезд. Показано, что для всех исследованных элементов, кроме Eu, наблюдается уменьшение практически до исчезновения РЗЭ-аномалии с ростом эффективной температуры. 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 Ар-звездах связано с концентрацией РЗЭ-элементов в верхних слоях атмосферы, 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 Ар-звезд.

Результаты исследования опубликованы в работе 1 (см. в списке публикаций, рекомендованных ВАК во Введении).

3.1. Выбор звезд исследования и описание наблюдательного материала

В нашем исследовании мы использовали спектры звезд, наблюдавшихся по различным программам в Европейской Южной Обсерватории (ЕЮО) и взятых из архива ЕЮО. Спектры 3х звезд HD 111133, HD 118022, HD 188041 были получены с помощью спектрографа UVES (UV-Visual Echelle Spectrograph), установленного на телескопе VLT с диаметром главного зеркала 8.2 метра на Европейской Южной Обсерватории. Наблюдения были проведены с использованием обоих доступных дихроичных мод (стандартной 346+580 нм и 437+860 нм). Щель 0.5" была выбрана таким образом, что обеспечивала спектральное разрешение $R = \lambda/\delta\lambda = 80000$ во всех длинах волн. Щель была ориентирована вдоль угла параллакса, в целях уменьшения потерь из-за атмосферной дисперсии. Обработка спектров UVES описана в работе Рябчиковой и др. (2008) Спектры остальных звезд были получены с помощью спектрографа FEROS (Fibre-fed Extended Range Optical Spectrograph), установленного на 2.2 м телескопе в обсерватории La Silla (ESO). Спектральное разрешение $R = 48000$. FEROS использует волоконную оптику. Обработка спектров FEROS описана в работе Фрейхаммера и др. (2008). Список звезд приведен в Таблице 3.1.

3.2. Определение параметров атмосфер

3.2.1. Эффективная температура и ускорение силы тяжести

Для звезд HD 111133, HD 118022, HD 188041 параметры атмосфер были взяты из статьи [37]. Для остальных звезд параметры атмосфер были оценены по калибровкам наблюдаемых индексов в среднеполосной системе Стремгрена и в Женевской фотометрической системе. Наблюдаемые данные были взяты из базы данных Женевской фотометрической систе-

Таблица 3.1. Список звезд программы и параметры атмосфер: эффективная температура (К), логарифм ускорения свободного падения, напряженность магнитного поля (Гс), скорость вращения (км с^{-1}) и металличность. В последней колонке указаны спектрографы, на которых были получены спектры звезд. Оценки магнитного поля по дифференциальному магнитному уширению отмечены звездочкой

HD	T_{eff}	σT_{eff}	$\log g$	$\sigma \log g$	$\langle B_s \rangle$	$\sigma \langle B_s \rangle$	$v \sin i$	[Fe/H]	Спектрограф
HD33629	7150	137	4.00	0.11	5000	50	3	0.5	FEROS
HD34205	8200	221	4.37	0.09	1200*		4	0.5	FEROS
HD34514	9800	149	4.12	0.19	1000*		12	1	FEROS
HD42605	8250	215	4.39	0.09	1000*		12	0.5	FEROS
HD43901	8000	134	4.18	0.28	1500*		5	0.3	FEROS
HD44226	7900	160	4.35	0.15	5150	50	3	1	FEROS
HD46665	9300	122	4.48	0.20	5150	50	3	0.0	FEROS
HD52847	8200	120	4.86	0.06	4500	50	4	0.6	FEROS
HD62244	8550	150	4.05	0.11	1000*		10.5	0.4	FEROS
HD69013	7500	170	4.5	0.1	4865	50	4	1	FEROS
HD72316	9400	100	4.35	0.1	5300	50	5.7	1	FEROS
HD79539	8500	240	4.18	0.06	1000*		5	1	FEROS
HD88701	9800	270	4.36	0.23	4600	50	6	0.2	FEROS
HD91087	8500	190	4.52	0.13	1000*		7	0.5	FEROS
HD96237	7800	155	4.43	0.17	2900*		6	0.9	FEROS
HD97394	8000	171	4.43	0.15	3200*	200	4	0.8	FEROS
HD102333	8240	94	4.27	0.07	1200*		3.5	0.2	FEROS
HD110274	8135	146	4.28		3900	50	3.5	0.2	FEROS
HD111133	9930	200	3.65	0.20	4000	50	7	1	UVES
HD112413	11600	200	3.90	0.10	2000		15	1	HARPS
HD117290	8000	153	4.42	0.24	6500	50	4	0.4	FEROS
HD118022	9950	200	4.	0.2	3000	50	10	1.0	UVES
HD121661	9250	220	4.41	0.42	5550	20	4.5	0.3	FEROS
HD122525	8250	200	3.87	0.10	1500*		3	0.2	FEROS
HD122569	9600	246	4.3	0.18	3000*		15	0.7	FEROS
HD126297	7750	135	4.1	0.27	1000*		4	0	FEROS
HD188041	8200	170	4.	0.2	3600	50	4	0.8	UVES

мы¹⁾ и из диссертации [91]. Определение параметров атмосферы: эффективной температуры (T_{eff}), ускорения силы тяжести ($\log g$) и металличности ($[\text{Fe}/\text{H}]$), по различным калибровкам реализовано в программе TempLogG [92], которая была использована в нашей работе. Для системы Стремгрена использовались, в основном, калибровки Муна и Дворецкого [93], Напивоцкого и др. [94] и Балоны [95]. Для определения эффективной температуры T_{eff} по индексам Женевской фотометрической системы были использованы калибровки Кюнзли и др. [96] с поправками за аномальное распределение потока в Ar звездах [28]. Окончательные параметры определялись усреднением величин, полученных по индивидуальным калибровкам. Эти параметры приведены в Таблице 3.1.

3.2.2. Определение модуля напряженности магнитного поля, усредненного по поверхности звезды, и скорости вращения

В магнитном поле спектральные линии расщепляются на компоненты (эффект Зеемана). В неполяризованном свете расстояние между Зеемановскими компонентами пропорционально фактору Ланде и величине модуля вектора магнитного поля. В спектрах звезд наиболее удобной линией для определения модуля напряженности магнитного поля является линия Fe II λ 6149.246 Å, так как эта линия расщепляется на 2 компоненты линейной поляризации и 2 компоненты круговой поляризации, причем расстояние между центрами тяжести компонентов круговой и линейной поляризации одинаковое, т.е. линия всегда расщепляется на 2 компоненты, разрешение которых зависит от комбинации разрешающей силы спектрографа и скорости вращения звезды. Пример Зеемановского расщепления линии Fe II λ 6149.246 Å в спектре звезды HD 188041 показан на рис. 3.1а.

Для звезд, где расщепления линии FeII λ 6149.246 Å почти не наблю-

¹⁾<http://obswww.unige.ch/gcpd/ph13.htmlh>

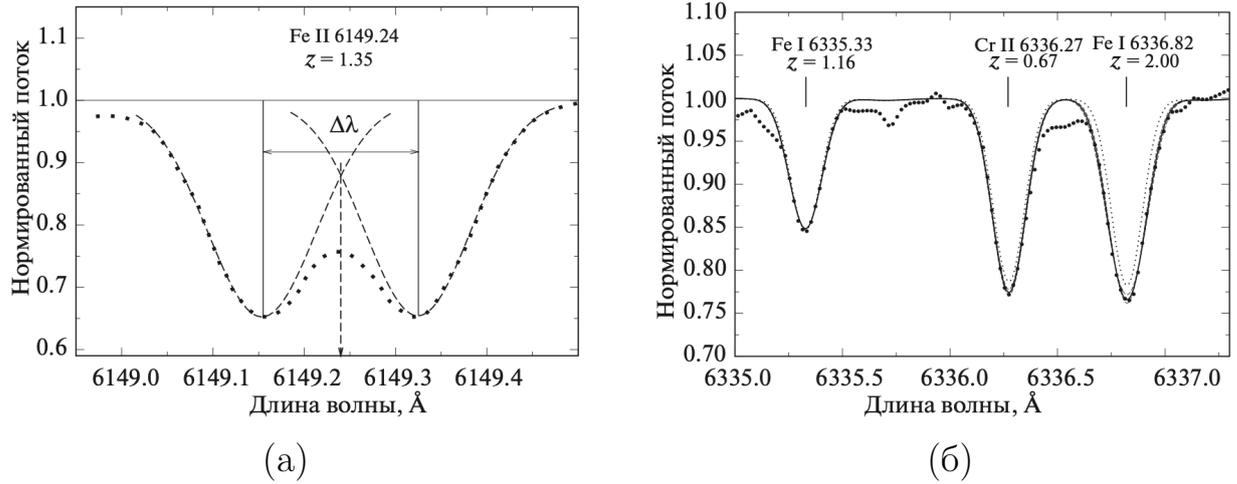


Рис. 3.1. (а) – Расщепление линии Fe II 6149.246 \AA в магнитном поле. Точками представлены наблюдения спектра HD 188041. Разделение линии на Зеемановские компоненты показано штриховой линией. Положение центра нерасщепленной линии отмечено штриховой стрелкой. (б) – Оценка магнитного поля по дифференциальному магнитному уширению в спектре звезды HD 102333 (точки). Синтетический спектр, рассчитанный с магнитным полем 1500 Гс , показан сплошной линией; спектр, рассчитанный в отсутствие магнитного поля, показан точечной линией.

дается, магнитное поле оценивалось по линиям Fe I 6335.328 \AA и Fe I 6336.823 \AA . Эти линии имеют различающиеся почти в 2 раза значения факторов Ланде (1.16 и 2.0, соответственно), и по эффекту дифференциального магнитного уширения магнитное поле оценивается по совпадению профилей спектральной линии наблюдаемого и синтетического спектров, варьируя величину напряженности магнитного поля. Синтетические спектры были рассчитаны по программе расчета синтетического спектра Syntmast в приближении однородного глобального магнитного поля (для более детального описания [46, 97]). В первом приближении магнитное поле считалось радиальным, хотя в некоторых случаях кроме радиальной составляющей вводилась также меридиональная составляющая поля. Минимальное значение поля, полученное по дифференциальному магнитному уширению, составляет около 1000 Гс , хотя может быть и выше при $v \sin i \sim 10 \text{ км с}^{-1}$ и больше. Полученные значения напряженности магнитного поля по расщеплению и оценки поля по дифференциальному магнитному уширению приведены в

шестой колонке Таблицы 3.1. В седьмой колонке даны формальные ошибки, полученные по ошибке измерения положения компонент линии FeII λ 6149.246 Å.

Скорости вращения звезд программы оценивались по линии Fe I λ 5434.524 Å, которая имеет нулевой фактор Ланде и, поэтому, не испытывает магнитного уширения. Величины проекций скоростей вращения приведены в восьмой колонке Таблицы 3.1.

3.3. Анализ содержания редкоземельных элементов

Модели атмосфер звезд программы, необходимые для определения содержания химических элементов, были рассчитаны по программе ATLAS9 (Kurucz, 1993). Для каждой звезды с использованием основных параметров: эффективной температуры, логарифма ускорения силы тяжести и металличности из Таблицы 3.1, были рассчитаны индивидуальные модели атмосфер.

3.3.1. Определение содержания химических элементов методом расчета синтетического спектра по заданной модели атмосферы.

Для нашей задачи были выбраны 42 линии элементов Ce, Pr, Nd, Eu в первой и второй стадиях ионизации. Атомные параметры спектральных линий для расчета взяты из последней версии Венской базы атомных параметров спектральных линий – VALD3 [47, 98]. Полный список линий приведен в Таблице 3.2. В спектрах звезд с различными параметрами число измеренных линий отличается от полного списка. Кроме того, все линии Ce III были измерены только для звезд со спектрами, полученными со спектрографом UVES. Для всех остальных звезд содержание Ce было оценено по единственной неблендированной оптической линии Ce III λ 6800.983 Å.

То же самое относится к элементу Eu. В оптическом диапазоне имеются несколько хороших линий Eu II и единственная линия Eu III.

Для определения содержания элемента синтетический спектр, рассчитанный с измеренным нами значением магнитного поля, подгоняется к наблюдаемому спектру, варьируя содержание элемента. При этом учитываются возможные бленды линий других элементов, главным образом, линий Fe I, II и Cr I, II. Для этого были оценены содержания этих элементов по линиям Fe, Cr и Si в интервале 6000–6200 Å. Все расчеты проводились по программе расчета синтетического спектра с учетом магнитного поля Synmast. Как уже было упомянуто во Введении, магнитное поле стабилизирует атмосферу звезды, поэтому при расчете синтетического спектра принималась нулевая микротурбулентная скорость. Отсутствие значительной микротурбулентности даже в звездах с малыми магнитными полями подтверждается спектральным анализом [54].

Окончательные значения содержания РЗЭ по линиям элемента в первой и второй стадиях ионизации было получено путем усреднения по всем исследованным линиям. Эти значения вместе с погрешностью (стандартное отклонение) приведены в Таблице 3.3. Если была только одна линия элемента, по которой определялось содержание, то ошибка взята 0.5 dex. Это сделано в некоторых звездах для Ce III, Pr III, Nd III. Все значения содержаний приведены в логарифмическом виде по отношению к общему числу атомов всех элементов.

3.3.2. Зависимость содержания от эффективной температуры

В первую очередь мы исследовали температурное поведение РЗЭ-аномалий от эффективной температуры. На рис. 3.2 показаны разности содержаний Pr, Nd, Ce и Eu, полученные отдельно по линиям первых и вторых ионов, в зависимости от эффективной температуры. Для сравнения приведены данные из литературы, которые собраны в Таблице 3.4.

Таблица 3.2. Полный список линий элементов, исследованных в работе (Ce II, Ce III, Pr II, Pr III, Nd II, Nd III, Eu II, Eu III). В первом столбце даны длины волн, во втором - логарифм силы осциллятора, в третьем - потенциал ионизации

λ (Å)	lg gf	E_i (эВ)	λ (Å)	lg gf	E_i (эВ)
Ce II			Nd II		
4062.222	0.35	1.366	4059.95	-0.52	0.205
4073.474	0.23	0.478	4061.08	0.55	0.471
4248.671	0.08	0.609	4177.32	-0.10	0.064
4460.207	0.14	0.684	4462.97	0.04	0.559
4449.207	0.08	0.609	5130.58	0.45	1.304
4460.207	0.32	0.478	5319.81	-0.14	0.550
4463.408	0.08	0.957	Nd III		
4483.893	0.15	0.864	5102.428	-0.62	0.296
4560.280	0.31	0.910	5203.924	-0.66	0.141
4560.958	-0.17	0.684	5294.113	-0.69	0.000
4562.359	0.23	0.478	6145.068	-1.33	0.296
6773.340	1.03	2.129	Eu II		
Ce III			6437.64	-0.32	1.320
3427.358	-0.17	2.385	6645.10	0.12	1.380
3470.922	0.14	2.413	Eu III		
3544.063	-0.09	2.709	6666.351	-1.47	3.977
6800.983	-3.76	0.391			
Pr II					
5173.905	0.38	0.968			
5322.771	-0.32	0.483			
Pr III					
5299.993	-0.72	0.359			
5844.408	-1.01	1.244			
5956.044	-0.77	0.552			
6053.004	-1.98	0.000			
6090.010	-0.87	0.359			
6160.233	-1.02	0.173			
6195.621	-1.07	0.000			
7030.386	-0.93	0.359			
7076.612	-1.43	0.173			
7781.984	-1.28	0.000			

Таблица 3.3. Содержание редкоземельных элементов в атмосферах звезд программы

HD	T_{eff}	σT_{eff}	Содержание $\log(N_{el}/N_{tot})$															
			Ce II	σ	Ce III	σ	Pr II	σ	Pr III	σ	Nd II	σ	Nd III	σ	Eu II	σ	Eu III	σ
33629	7150	137	-9.13	0.65	-5.9	0.5	-10.25	0.25	-8.04	0.36	-9.65	0.05	-8.43	0.05	-9.85	0.35	-8.13	0.5
34205	8200	221	-9.85	0.35	-6.5	0.5	-10.0	0.5	-9.49	0.39	-9.8	0.1	-9.21	0.47	-9.15	0.15	-6.48	0.5
34514	9800	149	-8.5	0.36	-5.9	0.5	-9.5	0.5	-8.55	0.38	-7.85	0.05	-7.30	0.16	-8.7	0.1	-6.43	0.5
42605	8250	215	-8.63	0.45	-6.1	0.5	-9.5	0.5	-7.86	0.33	-8.35	0.15	-6.00	0.16	-8.7	0.1	-6.63	0.5
43901	8000	134	-8.5	0.28	-6.1	0.5	-10.65	0.15	-9.73	0.35	-10.2	0.5	-10.13	0.21	-9.13	0.07	-6.83	0.5
44226	7900	160	-8.27	0.24	-6.0	0.5	-9.7	0.5	-7.63	0.45	-8.75	0.65	-7.65	0.33	-8.95	0.05	-6.48	0.5
46665	9300	122	-7.07	0.39	-5.7	0.5	-8.75	0.25	-7.51	0.25	-7.6	0.2	-7.11	0.12	-8.5	0.2	-6.33	0.5
52847	8200	120	-6.97	0.33	-4.8	0.5	-9.95	0.55	-8.43	0.46	-9.5	0.3	-8.47	0.19	-7.3	0.1	-4.98	0.5
62244	8550	150	-9.9	0.6	-6.7	0.5	-10.35	0.05	-9.21	0.35	-9.25	0.05	-8.90	0.12	-9.85	0.25	-6.83	0.5
69013	7500	170	-7.23	0.48	-5.5	0.5	-9.3	0.2	-6.94	0.34	-8.6	0.1	-6.83	0.05	-8.98	0.13	-6.83	0.5
72316	9400	100	-7.2	0.37	-6.2	0.5	-8.9	0.1	-8.13	0.29	-8.5	0.2	-7.80	0.27	-8.20	0.05	-6.13	0.5
79539	8500	240	-9.47	0.37	-6.6	0.5	-11.0	0.5	-9.31	0.37	-9.5	0.3	-9.51	0.48	-7.7	0.1	-5.38	0.5
88701	9800	270	-7.9	0.24	-5.7	0.5	-8.65	0.15	-7.73	0.34	-8.25	0.15	-7.80	0.33	-7.65	0.05	-5.78	0.5
91087	8500	190	-8.47	0.17	-5.6	0.5	-9.0	0.5	-6.84	0.44	-8.75	0.05	-7.00	0.24	-7.58	0.18	-5.53	0.5
96237	7800	155	-7.3	0.5	-5.6	0.5	-9.8	0.2	-7.95	0.28	-9.25	0.05	-7.53	0.26	-8.55	0.05	-6.23	0.5
97394	8000	171	-6.6	0.33	-4.2	0.5	-9.6	0.5	-8.11	0.31	-9.5	0.2	-7.33	0.39	-7.0	0.1	-4.73	0.5
102333	8240	94	-9.57	0.60	-6.0	0.5	-10.5	0.5	-8.83	0.38	-9.5	0.5	-8.75	0.27	-8.3	0.1	-5.53	0.5
110274	8135	146	-8.1	0.43	-6.2	0.5	-9.5	0.5	-7.93	0.22	-9.25	0.15	-7.41	0.21	-8.0	0.2	-5.33	0.5
111133	9930	200	-7.89	0.35	-6.89	0.34	-7.99	0.02	-8.27	0.42	-8.25	0.35	-7.80	0.07	-8.55	0.05	-4.32	0.5
112413	11600	200	-6.20	0.08	-5.5	0.5	-7.2	0.5	-6.74	0.22	-6.70	0.30	-6.60	0.22	-6.8	0.1	-5.9	0.5
117290	8000	153	-7.58	0.47	-5.6	0.5	-10.05	0.05	-8.77	0.40	-10.15	0.35	-9.00	0.08	-8.65	0.05	-6.23	0.5
118022	9950	200	-8.24	0.25	-6.46	0.32	-9.05	0.05	-8.33	0.36	-8.25	0.40	-7.93	0.05	-8.50	0.05	-6.13	0.5
121661	9250	220	-8.07	0.45	-6.5	0.5	-9.0	0.5	-8.06	0.23	-8.23	0.08	-7.4	0.2	-8.4	0.2	-6.23	0.5
122525	8250	200	-10.23	0.52	-6.6	0.5			-9.55	0.48	-9.55	0.55	-9.46	0.22	-9.8	0.2	-6.43	0.5
122569	9600	246	-9.33	0.24	-6.4	0.5	-8.5	0.5	-8.25	0.20	-8.4	0.1	-8.23	0.08	-8.05	0.05	-5.93	0.5
126297	7750	135	-10.00	0.16	-6.7	0.5	-10.6	0.1	-9.85	0.42	-10.65	0.15	-10.23	0.21	-10.1	0.2	-7.23	0.5
188041	8200	170	-8.70	0.31	-6.15	0.45	-10.30	0.5	-8.29	0.34	-9.40	0.40	-8.00	0.47	-7.60	0.20	-5.23	0.5

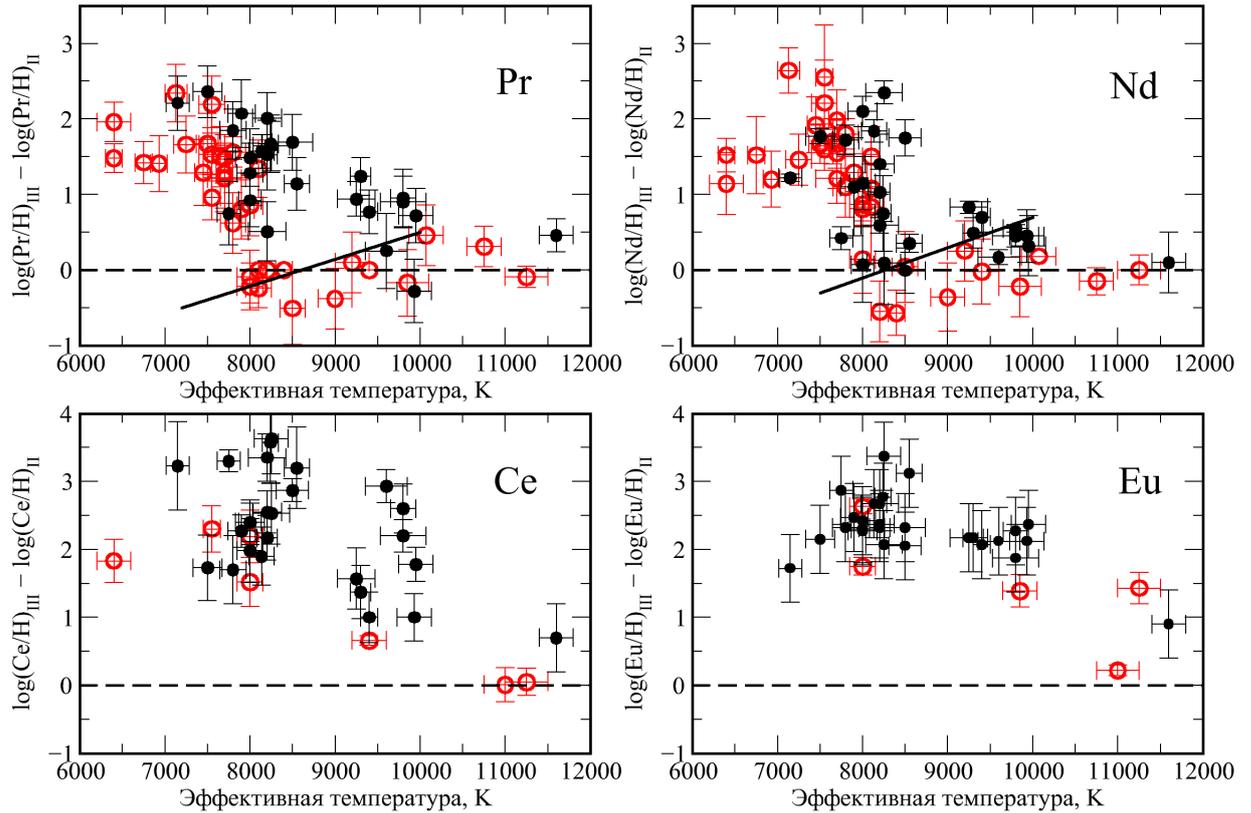


Рис. 3.2. Наблюдаемые РЗЭ-аномалии в атмосферах Ар-звезд в зависимости от эффективной температуры. Результаты настоящей работы показаны сплошными кружками, данные из литературы показаны открытыми кружками. Ионизационное равновесие при ЛТР отмечено штриховой линией; сплошные линии указывают примерный ход ионизационного равновесия в химически-однородных атмосферах при отказе от ЛТР (Pr - см. [65]; Nd - [13]).

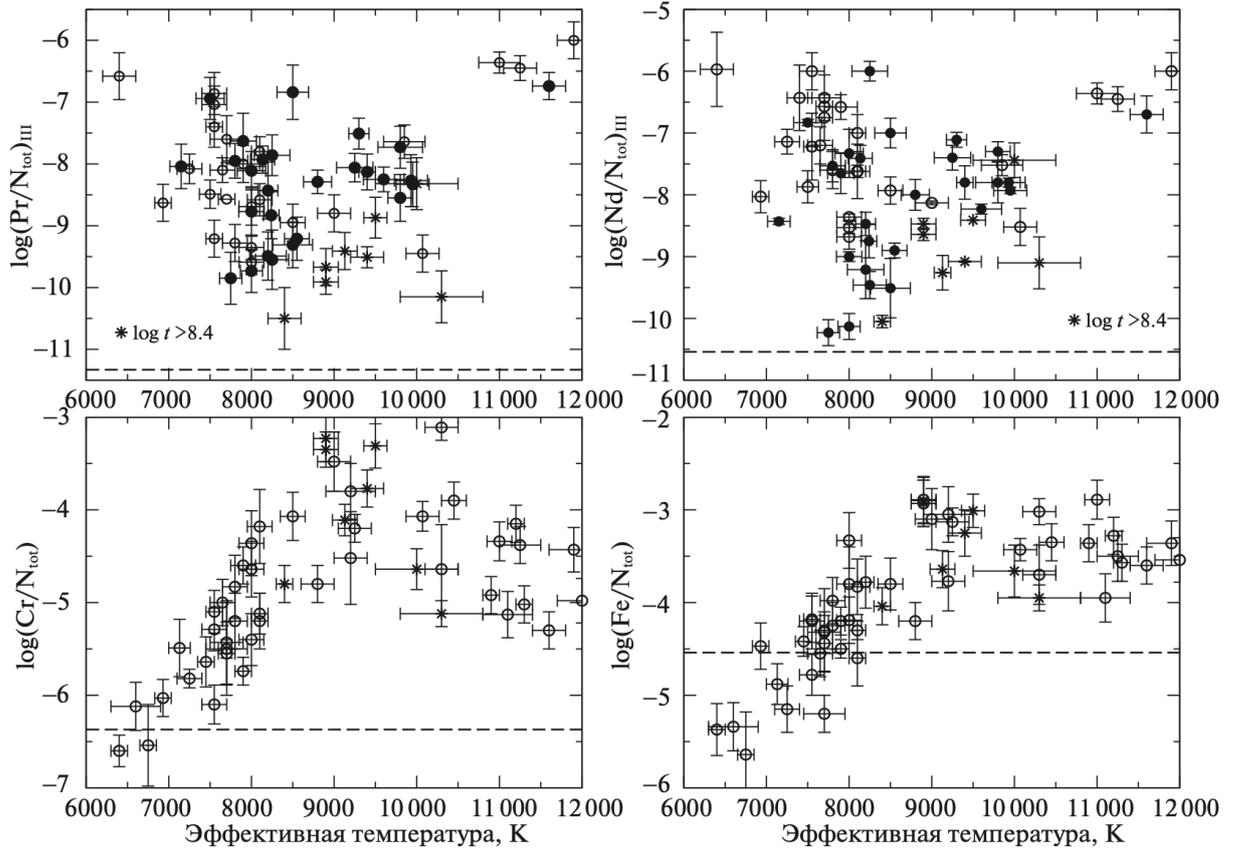


Рис. 3.3. Содержание Pr и Nd по линиям Pr III и Nd III, и содержание Cr и Fe в зависимости от эффективной температуры звезды. Результаты настоящей работы показаны сплошными кружками, данные из литературы - открытыми кружками. Звездочками показаны содержания Nd в атмосферах проэволюционировавших звезд со временем жизни $\log t \geq 8.4$.

Таблица 3.4. Собранные из литературы PrNd-аномалии: разность в логарифмических содержаниях элементов, полученных по линиям первых и вторых ионов (REE III– REE II)

HD	T_{eff}	σT_{eff}	Pr	σPr	Nd	σNd	Ссылка
101065	6400	200	1.96	0.26	1.14	0.41	[15]
213637	6400	100	1.48	0.19	1.52	0.22	[99]
217522	6750	100	1.42	0.28	1.52	0.51	[100]
122970	6930	100	1.41	0.37	1.20	0.37	[101]
185256	7130	130	2.34	0.38	2.64	0.30	[102]
24712	7250	150	1.66	0.38	1.46	0.34	[103]
203932	7450	100	1.29	0.44	1.92	0.37	[104]
128898	7500	130	1.67	0.40	1.67	0.26	[16]
176232	7550	100	0.96	0.30	2.55	0.69	[101]
137949	7550	150	2.19	0.38	2.21	0.57	[11]
115708	7550	150	1.53	0.35	1.60	0.28	[105]
115226	7650	150	1.5	0.40	1.7	0.3	[106]
166473	7700	200	1.21	0.44	1.54	0.46	[107]
201601	7700	100	1.47	0.32	1.67	0.32	[103]
75445	7700	100	1.28	0.40	1.98	0.40	[11]
178892	7700	250	1.22	0.40	1.21	0.33	[108]
29578	7800	150	0.62	0.40	1.10	0.40	[11]
12098	7800	150	1.56	0.20	1.8	0.20	[11]
62140	7900	150	0.80	0.39	1.29	0.25	[109]
116114	8000	150	-0.22	0.31	0.14	0.45	[11]
137909	8000	150	-0.09	0.35	0.81	0.23	[11]
177765	8000	150	0.85	0.40	0.87	0.22	[110]
60435	8100	100	0.00	0.00	1.50	0.40	[11]
42659	8100	100	1.34	0.38	1.08	0.32	[109]
18610	8100	150	-0.24	0.26	0.83	0.70	[11]
138633	8200	100	0.00	0.00	-0.55	0.40	[111]
204411	8400	100	0.00	0.00	-0.57	0.30	[48]
188041	8500	150	-0.51	0.48	0.04	0.47	[11]
110066	9000	200	-0.38	0.40	-0.36	0.45	[11]
212385	9200	200	0.10	0.40	0.25	0.40	[11]
133792	9400	200	0.00	0.00	-0.02	0.43	[54]
125248	9850	250	-0.17	0.44	-0.22	0.40	[112]
183806	10070	200	0.46	0.40	0.18	0.00	[11]
170973	10750	200	0.31	0.27	-0.15	0.18	[113]
144897	11250	250	-0.09	0.14	0.00	0.20	[108]

Для всех исследованных элементов кроме Eu наблюдается уменьшение практически до нуля РЗЭ-аномалии с ростом эффективной температуры. Наши результаты в целом подтверждают полученное ранее для элементов Pr и Nd ступенчатое падение этих 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 распределению с температурой, однако большая часть звезд показывает не ступенчатое, а более плавное уменьшение Pr-аномалии с температурой. Празеодим - нечетный элемент, и его линии подвержены сверхтонкому расщеплению. Линии Pr очень слабы в спектрах звезд горячее 8000 К даже при значительных избытках этого элемента, поэтому неучет сверхтонкой структуры практически не влияет на определяемое содержание. Линии Pr недостаточно сильные, но данных по сверхтонкому расщеплению нет. Неучет сверхтонкой структуры может привести к завышенным величинам Pr-аномалии при определенной комбинации температуры и содержания. сплошными линиями показано ЛТР-ионизационное равновесие, тогда как штриховыми линиями показано поведение ионизационного равновесия при отказе от ЛТР, рассчитанное для химически однородных атмосфер с избытками +3 dex (Pr) и +2.5 dex (Nd) в интервале эффективных температур 7250-9500 К (см. рис.5 и рис.6 из работы [65]).

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. При расчетах содержания по линиям Eu мы учитывали изотопный сдвиг, но не учитывали сверхтонкую структуру, поскольку она неизвестна для линии

$\text{Eu III } \lambda 6666.35 \text{ \AA}.$

3.3.3. Сравнение температурных зависимостей содержания редкоземельных элементов и элементов железного пика.

Как уже было сказано во Введении, аномалии химического состава в атмосферах Ар-звезд могут быть созданы в результате диффузионного разделения элементов под совокупным действием нескольких сил, главными из которых являются сила гравитационного давления, направленная к центру звезды, и сила лучевого давления, которая выталкивает частицы во внешние слои атмосферы. Если сила гравитационного давления преобладает, то элементы диффундируют в глубокие слои атмосферы звезды. В противоположном случае мы имеем направленный поток частиц в верхние слои атмосферы. Диффузионные расчеты распределения 39 химических элементов в атмосферах звезд были проведены группой Ф. Леблана (см., например, [7]). При этом детальные расчеты с возможностью сравнения с наблюдениями проведены только для легких элементов и элементов группы железа. Теоретическое распределение Cr и Fe показывает резкий скачок в содержании в области оптических глубин $-0.4 < \log \tau_{5000} < -3$ с концентрацией элемента вблизи фотосферы и дефицитом в верхних слоях атмосферы. С ростом температуры величина скачка уменьшается (дефицит в верхних слоях практически исчезает), а положение центра скачка сдвигается в верхние слои, обеспечивая повышение общего содержания в области формирования линий, по которым обычно проводят анализ химического состава. Таким образом, изменение среднего содержания, определенного в приближении химически-однородной атмосферы, с ростом температуры хорошо согласуется с теоретическими расчетами в интервале эффективных температур 7000–10 000 К, что служит подтверждением процесса диффузионного разделения элементов в атмосферах Ар-звезд [9]. Мы провели сравнение температурной зависимости содержаний элементов Cr–Fe и Pr–

Nd, показанное на рис. 3.3. Использовалось содержание Pr–Nd, полученное по линиям Pr III и Nd III, поскольку влияние не-ЛТР эффектов в этом случае практически не зависит от температуры, по крайней мере, в области 7500–9500 К [13, 65]. На рис. 3.3 (нижняя панель) мы привели данные по содержанию Cr и Fe, собранные из литературных источников [114] и дополненные данными из более поздних работ для звезд из табл. 3.4.

Возраст звезд из работы [87] оценивался по возрасту скоплений, к которым эти звезды принадлежат, тогда как возраст остальных шести звезд оценивался по эволюционным трекам. В работе [87] были исследованы эволюционные изменения в содержании различных элементов в атмосферах Ар-звезд и было показано, что содержания большинства химических элементов, включая Cr, Fe, Pr, Nd, уменьшаются с возрастом. При этом возраст $lgt = 8.4$ был верхним пределом в их исследовании. Трудно сделать однозначный вывод относительно возможных эволюционных изменений на основании нашего анализа, хотя для РЗЭ все звезды с $lgt \geq 8.4$ лежат на нижней огибающей зависимости содержания от эффективной температуры. Менее выражено это для элементов железного пика Cr и Fe. Однако наши исследования однозначно указывают на наличие антикорреляции между содержаниями элементов железного пика и редкоземельных элементов, что можно рассматривать как свидетельство различной стратификации этих элементов в атмосферах Ар-звезд. Если для элементов железного пика теоретические и экспериментальные данные свидетельствуют о наличии слоя повышенной концентрации в глубоких слоях, который расширяется в верхние слои атмосферы по мере роста температуры, то распределение редкоземельных элементов носит явно другой характер. К сожалению, теоретических диффузионных расчетов для редкоземельных элементов нет, главным образом, из-за отсутствия данных по атомным параметрам спектральных линий в третьей и выше стадиях ионизации. Поэтому все предположения о возможном распределении РЗЭ в атмосферах Ар-звезд пока

можно делать на основании наблюдений. В работах [12, 13, 18, 19, 65] наблюдаемые PrNd-аномалии в атмосферах холодных Ap-звезд с температурой $T_{\text{eff}} \leq 7700$ К были объяснены в предположении существования слоя высокой концентрации этих элементов в верхних слоях атмосферы выше $\log \tau_{5000} = -3$. Показано, что в условиях отказа от локального термодинамического равновесия в этих слоях происходит сверхионизация Pr II и Nd II. При этом линии элемента в первой стадии ионизации формируются ниже в атмосфере, чем линии вторых ионов, что и приводит к возникновению наблюдаемых аномалий.

3.3.4. Зависимость РЗЭ-аномалий от магнитного поля.

Существование зависимости РЗЭ-аномалий и самих содержаний от температуры накладывает определенные условия на выбор звезд для исследования их зависимости от магнитного поля. Мы выбрали две группы звезд в достаточно узких интервалах эффективных температур, $7500 \leq T_{\text{eff}} \leq 7700$ К и $10\ 750 \leq T_{\text{eff}} \leq 11\ 900$ К, для которых есть измерения модуля вектора магнитного поля, усредненного по поверхности звезды, $\langle B_s \rangle$ по полному или частичному расщеплению спектральных линий. В отличие от величины продольного поля (проекции магнитного поля на луч зрения), которая сильно зависит от фазы вращения звезды в момент наблюдений, $\langle B_s \rangle$ меняется с периодом вращения существенно меньше. В табл. 3.5 приводятся основные данные для выбранных звезд. Модуль вектора магнитного поля для HD 112413 (α^2 CVn) был определен по карте распределения магнитного поля и любезно прислан нам Д. Сильвестром. На рис. 3.4а показано изменение величины Nd-аномалии в зависимости от модуля вектора магнитного поля для звезд с эффективными температурами в интервале 7500–7700 К. Для группы звезд с более высокими температурами в интервале 10 750–11 900 К величина Nd-аномалии близка к нулю и практически не зависит от величины модуля магнитного поля. Для двух звезд из списка с низкими

Таблица 3.5. Содержание Nd по линиям Nd II и Nd III для избранных звезд в двух диапазонах эффективных температур

HD	T_{eff}	σT_{eff}	$\langle B_s \rangle$, кГс	Nd II	σ	Nd III	σ	Ссылка
$7500 \leq T_{\text{eff}} \leq 7700$ K								
69013	7500	170	4.9	-8.60	0.10	-6.83	0.05	Данная работа
176232	7550	150		-9.77	0.29	-7.22	0.54	[101]
			1.5					[115]
201601	7550	100	4.0	-8.49	0.26	-6.75	0.37	[18]
166473	7700	200	8.6	-7.97	0.28	-6.43	0.36	[107]
75445	7700	100	2.9	-8.55	0.03	-6.57	0.40	[11]
178892	7700	250	17.5	-8.05	0.23	-6.84	0.33	[116]
$10750 \leq T_{\text{eff}} \leq 11900$ K								
170973	10750	200	≤ 1	-6.48	0.13	-6.63	0.18	[113]
144897	11250	250	8.8	-6.45	0.12	-6.45	0.20	[108]
112413	11600	200	2.0	-6.70	0.30	-6.60	0.22	Данная работа
10221	11900	200	≤ 1			-6.84	0.35	[117]

Примечание: В четвертом столбце приведена величина модуля вектора магнитного поля, усредненного по поверхности звезды.

температурами, HD 176232 (10 Aql) и HD 201601 (γ Equ) была эмпирически изучена стратификация Nd в условиях отклонения от термодинамического равновесия с приближенной трактовкой влияния магнитного поля на интенсивность спектральной линии через псевдомикротурбулентную скорость [13, 18, 19]. Эти распределения показаны на рис. 3.4б. Для иллюстрации возможного влияния величины магнитного поля на профиль стратификации мы добавили полученное также эмпирически распределение Nd в атмосфере более холодной звезды HD 24712 с $T_{\text{eff}} = 7250$ K [12]. Хотя данных явно недостаточно, однако, можно сделать вывод, что с ростом магнитного поля положение скачка содержания смещается ближе к фотосферным слоям, обеспечивая уменьшение Nd-аномалии, поскольку линии Nd II формируются все ближе к обогащенному слою. Содержание неодима по линиям Nd III, в основном, определяется его содержанием в слоях с $\log \tau_{5000} \leq -3$. В атмосферах горячих Ar-звезд магнитное поле, по-видимому, практически не влияет на стратификацию Nd.

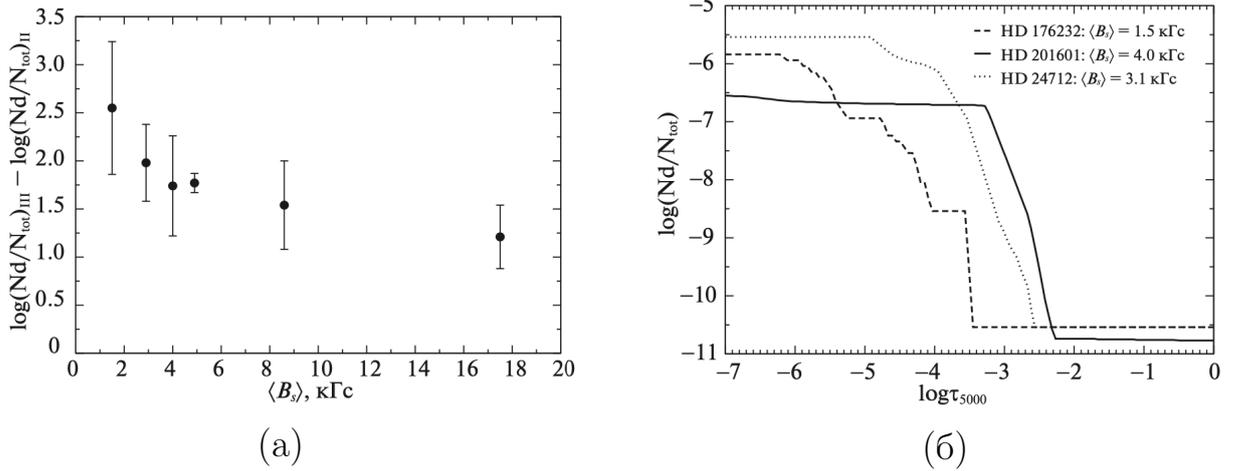


Рис. 3.4. (а) – Зависимость величины Nd-аномалии от величины модуля вектора магнитного поля, усредненного по поверхности звезды ($\langle B_s \rangle$), для звезд в интервале эффективных температур 7500-7700 К. (б) – Стратификация Nd в атмосферах двух звезд с одинаковой эффективной температурой 7550 К и разной величиной $\langle B_s \rangle$. HD 24712 с $T_{\text{eff}} = 7250$ К добавлена для иллюстрации зависимости профиля стратификации от величины магнитного поля.

3.4. Заключение

Результаты нашего исследования показывают, что с ростом температуры как РЗЭ-аномалии, так и сами содержания резко уменьшаются, приближаясь к ионизационному равновесию при $T_{\text{eff}} \sim 8500$ К. В рамках модели РЗЭ-стратификации с концентрацией элемента в слое в верхней атмосфере эмпирические исследования стратификации Nd позволяют предположить, что с ростом эффективной температуры и магнитного поля нижняя граница обогащенного слоя РЗЭ опускается в более глубокие слои атмосферы, уравнивая содержания, полученные отдельно по линиям элемента в первой и второй стадиях ионизации (т.е. уменьшение наблюдаемой РЗЭ-аномалии). При этом может уменьшаться содержание элемента в обогащенном слое, что приводит к уменьшению среднего содержания, рассчитанного в предположении химически-однородной атмосферы. С дальнейшим ростом температуры содержания Pr–Nd растут, в целом соответствуя ионизационному равновесию, рассчитанному для химически однородных атмосфер с избытком Pr/Nd при отказе от ЛТР. Это свидетельствует об

отсутствии заметных градиентов РЗЭ в области формирования линий первой и второй стадий ионизации при эффективных температурах выше 9000 К. Обнаруженная антикорреляция содержания элементов железного пика и РЗЭ в Ар-звездах служит дополнительным подтверждением различной стратификации этих элементов в атмосферах Ар-звезд.

Для РЗЭ все звезды с $lgt \geq 8.4$ лежат на нижней огибающей зависимости содержания от эффективной температуры, что согласуется с эволюционными изменениями содержания, найденными в работе [87] для горячих Ар-звезд: содержания почти всех элементов, включая РЗЭ, показывают тенденцию к уменьшению с возрастом звезды.

Для более детального исследования наблюдаемых РЗЭ-аномалий необходимо провести дополнительные не-ЛТР расчеты формирования линий редкоземельных элементов в широком диапазоне эффективных температур 7000–12 000 К. Часть РЗЭ, например, Се, имеют хорошие линии вторых ионов (Се III) в ближнем ультрафиолете, поэтому для детальных исследований аномалий этого элемента необходимо наблюдать спектры в области 3200–3600 Å. Необходимо также провести расчеты диффузии РЗЭ в атмосферах магнитных звезд в том же диапазоне эффективных температур для различных значений напряженности магнитного поля.

Авторы выражают благодарность О. Кочухову и Д. Сильвестеру за предоставленные спектры. Основная часть исследований выполнена на основе наблюдений из архива Европейской Южной обсерватории (ESO programs 68.D-0254 и 078.D-0080(A)). Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН П-7 “Переходные и взрывные процессы в астрофизике”.

3.5. Положения, выносимые на защиту

По результатам третьей главы на защиту выносится следующее положение:

- На расширенной выборке звезд подтверждено наличие аномалии редкоземельных элементов Pr и Nd, которое впервые было получено в работе [11]. Впервые получены подобные аномалии в содержании Ce и Eu. Температурное поведение Ce-аномалии (различие в содержаниях элемента, определенных отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации) указывает на резкое уменьшение этой 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. Полученные результаты свидетельствуют об одинаковом характере стратификации РЗЭ в атмосферах Ар-звезд.

Заключение

Основные результаты, изложенные в диссертации:

- Проведен полный самосогласованный спектроскопический анализ атмосфер 10-ти Ар-звезд, основанный на спектрах высокого разрешения и спектрофотометрии. В атмосферах исследованных Ар-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. Типичным для Ар звезд является значительный избыток редкоземельных элементов на 3-4 dex. Для Ba наблюдается минимальный избыток по сравнению с соседними элементами, в отличие от нормальных A-звезд и Am-звезд, где Ba имеет максимальный избыток среди последовательности элементов Sr-Zr-Ba-Nd. Проведено исследование стратификации Fe, Cr и Ca и определены фундаментальные параметры с учетом аномального химического состава и стратификации.
- Для эталонной группы Ар-звезд, выбранных для интерферометрических наблюдений, проведено сравнение фундаментальных параметров (R/R_{\odot} , T_{eff} и L/L_{\odot}), полученных методами спектроскопии и прямыми интерферометрическими измерениями. Показано, что радиусы и светимости согласуются в пределах указанных ошибок обоих определений. Полученные по спектроскопии эффективные температуры выше, чем интерферометрические для звезд с $T_{\text{eff}} > 9000$ К, что, вероятно, указывает на недооценку интегрального потока в УФ-области спектра. При одинаковых $\log g$ наблюдаемые профили водородных

линий соответствуют температурам, полученным по спектроскопии. Представленные результаты указывают на то, что непрямой метод (спектроскопический) определения фундаментальных параметров - сравним по точности с интерферометрическими определениями, что позволяет расширить границы определений точных параметров для слабых по яркости объектов, для которых интерферометрические наблюдения пока невозможны. Сравнение с фундаментальными параметрами, полученными по фотометрическим калибровкам, показало, что несмотря на более низкую точность фотометрического метода, его можно использовать для статистических исследований.

- Рассмотрено влияние поверхностной неоднородности химического состава на спектральное распределение энергии. На примере звезды HD 220825 было оценено возможное влияние химической неоднородности поверхности на полученные фундаментальные параметры путем моделирования наблюдаемого спектрального распределения энергии в разных фазах вращения звезды. Обнаружено, что переменность поверхностного потока приводит к изменению эффективных температур в пределах ± 100 К, что является типичной ошибкой для определения Ар-звезд самосогласованным методом спектроскопии и, таким образом, может не учитываться при определении фундаментальных параметров в будущих работах.
- На примере звезды HD 118022 исследовано изменение стратификации с фазой вращения. Результаты показали, что положение скачка изменяется синхронно с поверхностным содержанием элемента: содержание увеличивается – граница скачка смещается в более высокие слои атмосферы (фазы вращения 0.5–0.7) и наоборот. Также положение скачка коррелирует с изменением величины магнитного поля. Было исследовано влияние химической неоднородности поверхности на

определение T_{eff} и $\log g$, с учетом стратификации элементов Fe, Cr и Ca для каждой фазы вращения. Как и в случае HD 220825 эффективная температура изменяется в пределах, не превышающих ± 100 К.

- На примере звезды HD 120198 обнаружено заметное влияние содержания Si на выходящий поток в ультрафиолетовой области спектра. Уменьшение содержания Si на 1.0 dex приводит к завышению теоретического потока в районе 1500\AA по сравнению с данными наблюдений IUE и TD1. В то же время в других областях спектра изменение теоретического потока соответствует изменению T_{eff} не более, чем на 50 К. Это означает, что наблюдения потоков в УФ-области спектра могут служить важными индикаторами содержания Si в атмосферах некоторых Ap-звезд, подобно тому, что наблюдалось у более горячих химически пекулярных звезд В-типа [72].
- На расширенной выборке звезд подтверждено наличие аномалии редкоземельных элементов Pr и Nd, которое впервые было получено в работе [11]. Впервые получены подобные аномалии в содержании Ce и Eu. Температурное поведение Ce-аномалии указывает на ступенчатое уменьшение этой аномалии с ростом температуры, однако резкое падение сдвинуто в сторону более высоких температур по сравнению с Nd. Для Eu получено постепенное уменьшение наблюдаемой аномалии с ростом эффективной температуры, что согласуется с небольшим количеством наблюдательных данных, полученных ранее. С ростом температуры PЗЭ-аномалии резко уменьшаются, приближаясь к ионизационному равновесию при $T_{\text{eff}} \sim 8500$ К. С дальнейшим ростом температуры PrNd-аномалии, в целом, соответствуют ионизационному равновесию, рассчитанному для химически однородных атмосфер с избытком Pr/Nd при отказе от ЛТР, а сами содержания растут. Можно предположить, что с ростом эффективной температуры

нижняя граница слоя РЗЭ опускается в более глубокие слои атмосферы, обеспечивая наблюдаемый рост общего содержания и уравнивая содержания, полученные отдельно по линиям элемента в первой и второй стадиях ионизации.

Приложение 1

Таблица 1.1. Средние значения содержаний химических элементов $\log(N_{el}/N_{tot})$, рассчитанных из эквивалентных ширин и методом подгонки синтетического спектра для N линий для 10-ти Ар-звезд. Стандартные отклонения показаны в скобках. Солнечное содержание взято из статьи [118] и приведено к водороду

Ion	Содержание химических элементов, $\log(N_{el}/N_{tot})$																Sun				
	HD 4778	N	HD 108662	N	HD 110066	N	HD 111133	N	HD 118022	N	HD 120198	N	HD 153882	N	HD 188041	N		HD 204411	N	HD 220825	N
C I	-3.80(50)	1	-3.54(50)	1	-4.84(10)	4	-4.25(54)	3	-3.58(54)	4	-3.31(50)	3	-5.33(10)	3	-4.17(29)	3	-4.48(15)	5	-4.26(15)	2	-3.52(04)
N I	-4.63(50)	1	-4.93(50)	1	-4.82(50)	1	-5.10(50)	1	-	-	-	-	-3.88(50)	1	-4.94(25)	2	-4.15(05)	2	-5.02(50)	1	-4.15(07)
O I	-4.84(08)	3	-5.15(25)	3	-4.80(14)	3	-3.93(43)	7	-5.62(06)	3	-5.21(07)	3	-5.30(30)	3	-4.60(36)	4	-3.71(07)	4	-5.33(07)	3	-3.29(04)
Na I	-5.91(50)	1	-	-	-5.79(44)	2	-5.68(70)	2	-6.05(18)	2	-	-	-6.48(49)	2	-5.62(15)	2	-5.63(07)	2	-4.81(50)	1	-5.76(03)
Mg I	-4.77(56)	4	-3.69(07)	2	-4.48(40)	5	-4.42(18)	4	-4.16(25)	3	-4.37(41)	3	-4.07(32)	3	-4.34(80)	2	-4.60(20)	6	-3.92(23)	4	-4.53(03)
Mg II	-4.78(28)	3	-3.82(23)	5	-4.08(07)	2	-4.49(52)	5	-3.84(50)	1	-4.19(24)	2	-4.34(38)	3	-4.28(13)	2	-4.62(49)	3	-4.45(50)	1	-4.53(03)
Al I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-4.50(50)	1	-	-	-4.14(50)	1	-5.55(03)
Al II	-4.76(29)	2	-	-	-4.50(67)	2	-5.90(01)	2	-4.40(04)	2	-5.19(01)	2	-	-	-4.57(13)	2	-	-	-4.67(50)	1	-5.55(03)
Si I	-	-	-3.61(30)	4	-3.29(22)	4	-4.09(60)	9	-	-	-3.84(10)	2	-	-	-3.90(19)	5	-4.33(15)	6	-	-	-4.50(03)
Si II	-4.67(17)	3	-5.35(50)	1	-3.25(65)	7	-4.65(35)	4	-	-	-4.08(12)	3	-4.05(56)	2	-	-	-4.12(03)	2	-5.72(38)	3	-4.50(03)
S I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-3.44(50)	1	-5.12(23)	2	-	-	-4.84(03)
S II	-	-	-	-	-4.03(50)	1	-5.09(50)	3	-4.57(50)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-4.84(03)
Ca I	-5.07(29)	3	-4.14(42)	2	-5.34(51)	4	-5.98(50)	1	-6.01(76)	2	-5.63(50)	1	-6.38(40)	3	-4.69(58)	11	-5.54(05)	5	-5.24(24)	3	-5.69(03)
Ca II	-5.25(17)	2	-5.94(56)	4	-5.41(52)	6	-6.87(20)	3	-5.13(50)	1	-5.71(50)	1	-7.21(50)	1	-4.96(32)	2	-5.05(11)	5	-5.62(01)	2	-5.69(03)
Sc II	-	-	-9.10(50)	1	-8.43(26)	2	-	-	-	-	-	-	-9.55(50)	1	-8.32(70)	5	-9.68(50)	1	-	-	-8.84(04)
Ti I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-6.81(11)	13	-	-	-7.14(05)
Ti II	-5.95(25)	5	-5.97(45)	9	-6.34(25)	19	-6.51(42)	29	-6.12(19)	13	-6.34(54)	4	-7.41(35)	10	-6.42(54)	14	-6.63(11)	15	-5.91(31)	7	-7.14(05)
V I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-5.60(23)	2	-	-	-	-	-8.08(08)
V II	-	-	-7.22(50)	1	-7.48(50)	1	-8.05(19)	9	-7.44(50)	1	-	-	-	-	-6.80(47)	6	-8.87(09)	2	-	-	-8.08(08)
Cr I	-3.73(36)	11	-3.22(26)	11	-3.51(23)	-	-3.71(31)	66	-3.83(31)	20	-3.38(16)	10	-3.85(27)	12	-3.97(57)	10	-5.18(16)	37	-3.79(24)	11	-6.43(04)
Cr II	-3.75(34)	24	-3.39(27)	27	-3.52(25)	53	-3.88(43)	248	-3.56(28)	54	-3.36(20)	11	-3.71(27)	34	-3.81(54)	15	-4.90(19)	36	-3.84(36)	31	-6.43(04)
Mn I	-4.95(50)	1	-4.48(50)	1	-4.74(42)	5	-4.96(28)	9	-5.33(87)	7	-	-	-	-	-4.94(62)	9	-6.25(13)	9	-5.36(50)	1	-6.56(06)
Mn II	-4.56(29)	11	-4.45(39)	8	-4.70(27)	7	-4.97(39)	51	-5.32(19)	3	-5.75(50)	1	-5.45(29)	8	-4.99(88)	5	-5.91(18)	14	-4.82(05)	2	-6.56(06)
Fe I	-2.98(27)	16	-3.19(23)	13	-3.30(24)	47	-3.24(27)	153	-3.26(19)	52	-3.26(23)	5	-3.24(23)	31	-3.60(35)	19	-4.10(20)	79	-3.37(23)	22	-4.55(04)
Fe II	-3.04(25)	38	-3.32(30)	25	-2.91(32)	57	-3.24(32)	282	-3.03(25)	61	-3.36(25)	14	-3.08(31)	41	-3.21(40)	52	-3.64(34)	69	-3.58(30)	33	-4.55(04)
Co I	-	-	-	-	-5.64(24)	3	-5.09(47)	14	-	-	-	-	-	-	-5.05(63)	9	-6.65(20)	3	-	-	-7.04(05)
Co II	-	-	-	-	-5.73(25)	2	-5.48(52)	12	-	-	-	-	-5.69(17)	2	-5.50(50)	1	-	-	-	-	-7.04(05)
Ni I	-	-	-4.75(50)	1	-5.70(23)	3	-5.77(76)	10	-5.84(11)	2	-	-	-4.97(35)	2	-5.81(63)	5	-5.96(14)	27	-	-	-5.94(04)
Ni II	-	-	-	-	-	-	-6.18(57)	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-5.42(50)	1	-	-	-5.94(04)
Cu I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-6.88(50)	1	-8.26(50)	1	-	-	-7.96(05)
Sr I	-5.57(50)	1	-	-	-5.85(50)	1	-	-	-6.82(50)	1	-	-	-5.48(50)	1	-5.81(50)	1	-8.99(50)	1	-5.47(50)	1	-9.23(06)
Sr II	-7.10(50)	1	-	-	-	-	-7.07(51)	3	-	-	-7.51(50)	1	-	-	-5.97(12)	2	-	-	-7.54(50)	1	-9.23(06)
Y II	-7.61(50)	1	-7.68(06)	2	-8.14(50)	1	-8.83(22)	3	-8.93(23)	3	-	-	-8.34(19)	4	-9.23(40)	4	-10.24(14)	4	-	-	-9.77(05)
Zr II	-8.53(50)	1	-8.40(50)	2	-9.03(50)	1	-8.57(77)	10	-	-	-	-	-8.49(50)	1	-8.25(57)	10	-9.12(28)	2	-	-	-9.67(04)
Nb II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-8.09(73)	2	-	-	-	-	-10.51(06)
Mo II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-7.72(17)	2	-	-	-	-	-10.71(09)
Ba II	-9.82(50)	1	-9.74(50)	1	-9.55(50)	1	-8.93(39)	3	-9.41(50)	1	-9.50(50)	1	-9.17(50)	1	-9.12(57)	4	-9.45(23)	3	-8.41(50)	1	-9.85(05)
La II	-7.35(13)	2	-7.63(50)	1	-7.23(37)	2	-7.97(60)	18	-7.91(44)	4	-8.17(50)	1	-	-	-8.29(23)	6	-	-	-8.50(50)	1	-10.87(04)
Ce II	-6.99(31)	7	-6.29(29)	4	-7.68(39)	23	-7.46(62)	27	-7.36(66)	45	-7.29(50)	1	-7.54(17)	5	-7.62(31)	14	-10.46(50)	1	-7.45(50)	1	-10.45(04)
Ce III	-	-	-6.15(50)	1	-6.05(14)	3	-7.14(24)	4	-6.35(38)	5	-	-	-	-	-6.08(35)	6	-	-	-	-	-10.45(04)
Pr II	-	-	-7.03(50)	1	-8.54(05)	2	-7.90(41)	6	-7.57(50)	1	-	-	-8.46(50)	1	-7.91(38)	4	-	-	-	-	-11.23(05)
Pr III	-7.86(26)	6	-8.39(18)	8	-8.36(39)	10	-8.30(43)	25	-8.47(37)	12	-8.34(05)	2	-8.62(35)	9	-8.47(30)	9	-	-	-7.26(23)	3	-11.23(05)
Nd II	-7.72(50)	1	-6.36(63)	4	-7.79(59)	6	-7.64(40)	24	-7.93(66)	11	-	-	-8.09(47)	6	-8.33(56)	3	-9.80(22)	3	-8.20(50)	1	-11.12(04)
Nd III	-7.56(35)	7	-7.80(43)	5	-7.87(25)	12	-8.32(44)	33	-8.06(25)	13	-7.94(43)	9	-8.08(27)	7	-7.87(28)	12	-10.14(50)	1	-6.82(25)	5	-11.12(04)
Sm II	-7.63(10)	3	-6.57(58)	3	-8.48(23)	5	-8.06(35)	15	-7.75(78)	6	-7.75(50)	1	-8.96(44)	4	-8.52(30)	6	-	-	-7.80(50)	1	-11.60(04)
Sm III	-	-	-	-	-	-	-8.46(04)	2	-	-	-	-	-	-	-7.07(50)	1	-	-	-	-	-11.60(04)
Eu II	-7.31(16)	4	-6.96(45)	6	-7.48(19)	5	-8.93(58)	6	-7.92(25)	7	-7.65(41)	4	-7.98(09)	2	-7.41(24)	5	-11.19(50)	1	-8.38(03)	2	-11.74(04)
Eu III	-5.47(50)	1	-6.37(02)	2	-5.87(11)	3	-6.68(29)	7	-6.06(21)	3	-6.60(50)	1	-7.10(07)	2	-5.29(53)	4	-	-	-6.37(50)	1	-11.74(04)
Gd II	-8.22(50)	1	-6.45(46)	5	-7.27(62)	6	-7.38(46)	25	-8.44(39)	5	-	-	-8.06(50)	1	-7.48(71)	8	-	-	-	-	-11.50(04)
Tb I	-	-	-	-	-	-	-	-	-9.54(50)	1	-	-	-	-	-7.91(50)	1	-	-	-	-	-11.67(10)
Tb III	-	-	-8.77(50)	1	-9.23(50)	1	-8.44(50)	1	-9.51(50)	1	-	-	-	-	-8.85(36)	4	-	-	-	-	-11.67(10)
Dy II	-	-	-	-	-	-	-7.88(45)	13	-9.52(32)	2	-	-	-	-	-8.95(48)	4	-	-	-	-	-11.42(04)
Dy III	-	-	-	-	-8.00(37)	4	-	-	-	-	-	-	-7.87(50)	1	-	-	-	-	-	-	-11.42(04)
Er II	-	-	-	-	-8.47(25)	2	-8.20(45)	7	-10.18(26)	2	-	-	-	-	-9.38(45)	4	-	-	-	-	-11.52(05)
Er III	-	-	-	-	-8.31(50)	1	-8.56(56)	5	-	-	-	-	-	-	-8.06(50)	1	-	-	-	-	-11.52(05)
Tm II	-	-	-	-	-	-	-9.03(50)	1	-	-	-	-	-	-	-8.83(1.42)	3	-	-	-	-	-11.88(04)
Yb II	-	-	-7.10(50)	1	-8.64(27)	2	-8.09(37)	10	-	-	-	-	-	-	-8.07(44)	5	-	-	-	-	-11.79(11)
Lu II	-8.47(30)	2	-	-	-9.51(50)	1	-	-	-9.97(50)	1	-	-	-9.71(50)	1	-	-	-	-	-7.77(50)	1	-11.89(09)

Таблица 1.2. Продолжение

Ион	λ (Å)	E_i , эВ	$\log gf$	$\log \gamma_{Stark}$	HD 4778	HD 108662	HD 110066	HD 111133	HD 118022	HD 120198	HD 153882	HD 188041	HD 204411	HD 220825	Ссылки
Cr I	5265.1480	3.4280	-0.529	-5.324									*		K88
Cr I	5296.6910	0.9830	-1.400	-6.120									*		MFW
Cr I	5297.3770	2.9000	0.167	-4.307									*		MFW
Cr II	5297.6060	10.7540	-0.320	-5.260									*		RU
Cr I	5298.0160	2.9000	-0.060	-4.051									*		MFW
Cr I	5298.2720	0.9830	-1.150	-6.117									*		MFW
Cr I	5298.4940	2.9000	-0.350	-3.749									*		K88
Cr II	5305.8650	3.8270	-2.160	-6.599									*		RU
Cr II	5305.9290	10.7600	-0.170	-5.348									*		RU
Cr II	5308.4250	4.0710	-2.060	-6.639									*		RU
Cr II	5334.8690	4.0723	-1.826	-6.550	*				*					*	RU
Cr I	5344.7560	3.4493	-0.990	-5.270											RU
Cr II	5392.7151	6.8029	-3.047	-6.470			*					*			SLS
Cr II	5407.6040	3.8267	-2.151	-6.490	*	*		*				*			RU
Cr II	5420.9220	3.7576	-2.458	-6.490	*	*			*	*				*	PGBH
Cr II	5563.9850	10.8451	0.325	-5.260						*	*			*	PGBH
Cr II	5569.1080	10.8720	0.860	-5.359			*	*					*		RU
Cr II	5569.6170	10.9040	0.710	-5.358			*	*					*		RU
Cr II	5613.1797	10.8596	0.088	-5.350						*	*		*		RU
Cr II	5619.9861	10.9109	-0.914	-5.270						*	*		*		RU
Cr II	5620.6307	6.4870	-1.395	-6.550	*	*			*	*				*	RU
Cr II	5620.9183	6.8968	-2.558	-6.490		*			*	*					RU
Cr I	5787.9190	3.3223	-0.083	-4.460		*	*		*	*				*	MFW
Cr I	5790.9570	3.3212	0.244	-4.550	*				*	*					K16
Cr II	5886.2388	4.0735	-3.434	-6.500		*	*	*		*	*				RU
Cr II	6050.2610	11.0978	0.210	-4.683			*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	6052.4650	6.1364	-3.273	-6.410			*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	6053.4660	4.7449	-2.220	-6.633	*		*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr I	6062.6740	3.1953	-1.588	-3.790						*	*	*	*	*	K10
Cr II	6068.0230	6.6860	-1.736	-6.559						*	*	*	*	*	K88
Cr II	6072.8851	6.4842	-3.018	-6.650			*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	6081.4558	6.4870	-2.128	-6.650		*	*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	6089.6315	6.4870	-1.445	-6.530	*		*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	6112.2611	4.7449	-2.980	-6.490		*	*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	6129.2260	4.7505	-2.511	-6.490	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	PGBH
Cr II	6138.7213	6.4842	-2.150	-6.728	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	6147.1540	4.7560	-2.890	-6.656		*	*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	6226.6377	4.7563	-3.035	-6.490	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	6324.1981	11.1245	-0.290	-5.200						*	*	*	*	*	RU
Cr II	6336.2631	4.0735	-3.759	-6.638			*	*	*	*	*	*	*	*	RU
Cr II	7485.9837	4.7504	-3.208	-6.490	*	*				*	*	*	*	*	RU
Ca II	3158.8690	3.1230	0.2410	-4.900				*			*	*	*	*	T
Ca II	3933.6630	0.0000	0.1050	-5.730				*			*	*	*	*	T
Ca I	4226.7280	0.0000	0.2440	-6.531				*	*		*	*	*	*	SG
Ca II	5021.1380	7.5150	-1.2070	-4.580				*	*		*	*	*	*	TB
Ca II	5285.2660	7.5050	-1.1470	-4.610				*	*		*	*	*	*	TB
Ca II	5339.1880	8.4380	-0.0790	-3.350				*	*		*	*	*	*	TB
Ca I	5857.4510	2.9330	0.2400	-5.424				*	*		*	*	*	*	SR
Ca I	6439.0750	2.5260	0.3900	-6.072				*	*		*	*	*	*	SR
Ca I	6449.8080	2.5210	-0.5020	-6.071				*	*		*	*	*	*	SR
Ca I	6455.5980	2.5230	-1.2900	-6.072				*	*		*	*	*	*	SR
Ca II	6456.8750	8.4380	0.4100	-3.700				*	*		*	*	*	*	TB
Ca I	6462.5670	2.5230	0.2620	-6.072				*	*		*	*	*	*	SR
Ca II	8248.7960	7.5150	0.5560	-4.600			*	*	*	*	*	*	*	*	TB
Ca II	8254.7210	7.5148	-0.3980	-4.980			*	*	*	*	*	*	*	*	TB
Ca II	8927.3560	7.0496	0.8110	-5.510			*	*	*	*	*	*	*	*	TB

Примечания: SG – Smith et al (1966) [119]; T – Theodosiou (1989) [120]; TB – TOPBASE (Seaton et al. 1992) [121]; BWL – Black et al. (1972) [122]; SR – Smith & Raggett (1981) [123]; RU – Raassen & Uylings (1998) [124]; K10 – Kurucz (2010) [125]; K13 – Kurucz (2013) [126]; K14 – Kurucz (2014) [127]; K16 – Kurucz (2016) [128]; K88 – Kurucz (1988) [129]; MRW – May et al. (1974) [130]; BIPS – Blackwell et al. (1979) [131]; BWL – O’Brian et al. (1991) [122]; BK – Bard & Kock (1994) [132]; BKK – Bard et al. (1991) [133]; PGBH – Pinninton et al. (1993) [134]; SLS – Sobek et al. (2007) [135]; BSScor – Blackwell et al. (1980) [136]; T83av – Ryabchikova et al. (1999) [137]; HLGN – Hannaford et al. (1992) [138];

Благодарности

Соискатель выражает благодарность Т.А. Рябчиковой за научное руководство, Т.М. Ситнову за предоставленные не-ЛТР расчеты линий нейтрального кислорода.

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.

Литература

1. Aurière M., Wade G. A., Silvester J. et al. Weak magnetic fields in Ap/Bp stars. Evidence for a dipole field lower limit and a tentative interpretation of the magnetic dichotomy // *A&A.*— 2007.— V. 475.— P. 1053–1065.
2. Романюк И. И., Кудрявцев Д. О. Магнитные поля химически пекулярных звезд. 1. Каталог магнитных CP звезд // *Астрофизический бюллетень.*— 2008.— V. 63, no. 2.— P. 148–165.
3. Babcock H. W. The 34-KILOGAUSS Magnetic Field of HD 215441. // *ApJ.*— 1960.— V. 132.— P. 521.
4. Mathys G. Ap stars with resolved magnetically split lines: Magnetic field determinations from Stokes I and V spectra★ // *A&A.*— 2017.— V. 601.— P. A14.
5. Michaud G. Diffusion Processes in Peculiar a Stars // *ApJ.*— 1970.— V. 160.— P. 641.
6. Babel J. Magnetically confined wind on the AP star 53 Camelopardalis? // *A&A.*— 1992.— V. 258.— P. 449–463.
7. LeBlanc F., Monin D., Hui-Bon-Hoa A., Hauschildt P. H. Stellar model atmospheres with abundance stratification // *A&A.*— 2009.— V. 495.— P. 937–944.
8. Alecian G., Stift M. J. Bi-dimensional element stratifications computed for magnetic Ap star atmospheres // *A&A.*— 2010.— V. 516.— P. A53.

9. Ryabchikova T. Abundance structure of the atmospheres of magnetic CP stars // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso.— 2008.— V. 38, no. 2.— P. 257–266.
10. Ryabchikova T. Vertical abundance gradients in Ap-star atmospheres // Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars / Ed. by G. Mathys, E. R. Griffin, O. Kochukhov et al.— 2014.— P. 220–228.
11. Ryabchikova T., Nesvacil N., Weiss W. W. et al. The spectroscopic signature of roAp stars // A&A.— 2004.— V. 423.— P. 705–715.
12. Shulyak D., Ryabchikova T., Mashonkina L., Kochukhov O. Model atmospheres of chemically peculiar stars. Self-consistent empirical stratified model of HD 24712 // A&A.— 2009.— V. 499.— P. 879–890.
13. Mashonkina L., Ryabchikova T., Ryabtsev A. NLTE ionization equilibrium of Nd II and Nd III in cool A and Ap stars // A&A.— 2005.— V. 441.— P. 309–318.
14. Ryabchikova T., Wade G. A., LeBlanc F. Observational Evidence for the Stratification of Chemical Abundances in Stellar Atmospheres // Modelling of Stellar Atmospheres / Ed. by N. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray.— V. 210 of IAU Symposium.— 2003.— P. 301.
15. Shulyak D., Ryabchikova T., Kildiyarova R., Kochukhov O. Realistic model atmosphere and revised abundances of the coolest Ap star HD 101065 // A&A.— 2010.— V. 520.— P. A88.
16. Kochukhov O., Shulyak D., Ryabchikova T. A self-consistent empirical model atmosphere, abundance and stratification analysis of the benchmark roAp star α Circini // A&A.— 2009.— V. 499.— P. 851–863.

17. Pandey C. P., Shulyak D. V., Ryabchikova T., Kochukhov O. Abundance and stratification analysis of the chemically peculiar star HD 103498 // MNRAS.— 2011.— V. 417.— P. 444–452.
18. Shulyak D., Ryabchikova T., Kochukhov O. Fundamental parameters of bright Ap stars from wide-range energy distributions and advanced atmospheric models // A&A.— 2013.— V. 551.— P. A14.
19. Nesvacil N., Shulyak D., Ryabchikova T. A. et al. A self-consistent chemically stratified atmosphere model for the roAp star 10 Aquilae // A&A.— 2013.— V. 552.— P. A28.
20. Bruntt H., North J. R., Cunha M. et al. The fundamental parameters of the roAp star α Circini // MNRAS.— 2008.— V. 386.— P. 2039–2046.
21. Bruntt H., Kervella P., Mérand A. et al. The radius and effective temperature of the binary Ap star β CrB from CHARA/FLUOR and VLT/NACO observations // A&A.— 2010.— V. 512.— P. A55.
22. Perraut K., Brandão I., Mourard D. et al. The fundamental parameters of the roAp star γ Equulei // A&A.— 2011.— V. 526.— P. A89.
23. Perraut K., Borgniet S., Cunha M. et al. The fundamental parameters of the roAp star 10 Aquilae // A&A.— 2013.— V. 559.— P. A21.
24. Perraut K., Brandão I., Cunha M. et al. The fundamental parameters of the roAp star HD 24712. A rapidly oscillator at the red edge of the instability strip // A&A.— 2016.— V. 590.— P. A117.
25. Perraut K., Cunha M., Romanovskaya A. et al. Benchmarking the fundamental parameters of Ap stars with optical long-baseline interferometric measurements // A&A.— 2020.— V. 642.— P. A101.
26. Hubrig S., North P., Mathys G. Magnetic AP Stars in the Hertzsprung-Russell Diagram // ApJ.— 2000.— V. 539.— P. 352–363.

27. Kochukhov O., Bagnulo S. Evolutionary state of magnetic chemically peculiar stars // *A&A.*— 2006.— V. 450.— P. 763–775.
28. Hauck B., Kunzli M. Photometric Calibrations of the Effective Temperature // *Baltic Astronomy.*— 1996.— V. 5.— P. 303–312.
29. van Leeuwen F. Validation of the new Hipparcos reduction // *A&A.*— 2007.— V. 474.— P. 653–664.
30. Hubrig S., North P., Schöller M. Evolution of magnetic fields in stars across the upper main sequence: II. Observed distribution of the magnetic field geometry // *Astronomische Nachrichten.*— 2007.— V. 328.— P. 475.
31. Lipski Ł., Stępień K. Effective temperatures of magnetic chemically peculiar stars from full spectral energy distributions // *MNRAS.*— 2008.— V. 385, no. 1.— P. 481–492.
32. Adelman S. J., Rayle K. E. On the effective temperatures, surface gravities, and optical region fluxes of the CP stars // *A&A.*— 2000.— V. 355.— P. 308–314.
33. Netopil M., Paunzen E., Maitzen H. M. et al. Chemically peculiar stars and their temperature calibration // *A&A.*— 2008.— V. 491, no. 2.— P. 545–554.
34. Renson P., Gerbaldi M., Catalano F. A. General catalogue of AP and AM stars. // *A&AS.*— 1991.— V. 89.— P. 429.
35. Саванов И. С., Рябчикова Т. А., Давыдова Е. С. Исследование атмосфер SrCrEu звезд 17 Com A и 21 Com скопления Волосы Вероники // *Письма в Астрономический журнал.*— 1996.— V. 22.— P. 910–916.

36. Adelman S. J., Pyper D. M., Lopez-Garcia Z., Caliskan H. On the effective temperatures, surface gravities, and optical region fluxes of the magnetic CP stars. // *A&A*.— 1995.— V. 296.— P. 467.
37. Ryabchikova T., Kochukhov O., Bagnulo S. Isotopic anomaly and stratification of Ca in magnetic Ap stars // *A&A*.— 2008.— V. 480.— P. 811–823.
38. Sikora J., Wade G. A., Power J., Neiner C. A volume-limited survey of mCP stars within 100 pc - I. Fundamental parameters and chemical abundances // *MNRAS*.— 2019.— V. 483, no. 2.— P. 2300–2324.
39. Рябчикова Т. А., Павлова В. М., Давыдова Е. С., Пискунов Н. Е. Распределение Сг на поверхности CP2 звезды HD 220825 κ Psc) // Письма в *Астрономический журнал*.— 1996.— V. 22.— P. 917.
40. Thompson G. I., Nandy K., Jamar C. et al. Catalogue of stellar ultraviolet fluxes. A compilation of absolute stellar fluxes measured by the Sky Survey Telescope (S2/68) aboard the ESRO satellite TD-1.— 1978.
41. Adelman S. J., Pyper D. M., Shore S. N. et al. A catalog of stellar spectrophotometry // *A&AS*.— 1989.— V. 81.— P. 221–223.
42. Breger M. Catalog of spectrophotometric scans of stars. // *ApJS*.— 1976.— V. 32.— P. 7–87.
43. Cutri R. M., Skrutskie M. F., van Dyk S. et al. VizieR Online Data Catalog: 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (Cutri+ 2003) // *VizieR Online Data Catalog*.— 2003.— V. 2246.
44. Cohen M., Wheaton W. A., Megeath S. T. Spectral Irradiance Calibration in the Infrared. XIV. The Absolute Calibration of 2MASS // *AJ*.— 2003.— V. 126.— P. 1090–1096.
45. Kurucz R. 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.— 1993.— V. 13.
46. Kochukhov O. P. 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.— P. 109–118.— astro-ph/0701084.
47. Ryabchikova T., Piskunov N., Kurucz R. L. et al. A major upgrade of the VALD database // *Phys. Scr.*— 2015.— V. 90, no. 5.— P. 054005.
48. Ryabchikova T., Leone F., Kochukhov O. Abundances and chemical stratification analysis in the atmosphere of Cr-type Ap star HD 204411 // *A&A.*— 2005.— V. 438.— P. 973–985.
49. Savanov I. S., Kochukhov O. P., Tsybal V. V. Vertical Chromium Distribution in the Atmospheres of CP Stars. II. Modeling // *Astrophysics.*— 2001.— V. 44.— P. 206–215.
50. Babcock H. W. The Magnetic Variable HD 188041. // *ApJ.*— 1954.— V. 120.— P. 66.
51. Рябчикова Т. А., Романовская А. М. Эволюционный статус Ap-звезд HD 110066 и HD 153882 // *Письма в Астрономический журнал.*— 2020.— V. 46, no. 5.— P. 353–365.
52. Глаголевский Ю. В. Особенности поведения магнитных звезд на Главной Последовательности // *Астрофизический бюллетень.*— 2019.— V. 74, no. 1.— P. 72–86.
53. Kochukhov O. Doppler imaging of chemical spots on magnetic Ap/Bp stars. Numerical tests and assessment of systematic errors // *A&A.*— 2017.— V. 597.— P. A58.

54. Kochukhov O., Tsymbal V., Ryabchikova T. et al. Chemical stratification in the atmosphere of Ap star HD 133792. Regularized solution of the vertical inversion problem // *A&A.*— 2006.— V. 460.— P. 831–842.
55. Kochukhov O.— BinMag: Widget for comparing stellar observed with theoretical spectra.— *Astrophysics Source Code Library.*— 2018.— 1805.015.
56. Przybilla N., Butler K., Becker S. R. et al. Non-LTE line formation for neutral oxygen. Model atom and first results on A-type stars // *A&A.*— 2000.— V. 359.— P. 1085–1106.
57. Ситнова Т. М., Машонкина Л. И., Рябчикова Т. А. Влияние отклонений от ЛТР на определение содержания кислорода в атмосферах звезд спектральных классов А-К // *Письма в Астрономический журнал.*— 2013.— V. 39, no. 2.— P. 126–140.
58. Ситнова Т. М., Машонкина Л. И. Влияние неупругих столкновений с атомами водорода на определение содержания кислорода с учетом отклонений от ЛТР // *Письма в Астрономический журнал.*— 2018.— V. 44, no. 6.— P. 450–458.
59. Landi Degl’Innocenti E. Hyperfine structure and line formation in a magnetic field. // *A&A.*— 1975.— V. 45, no. 2.— P. 269–276.
60. Mashonkina L., Ryabchikova T., Alexeeva S. et al. Chemical diversity among A-B stars with low rotational velocities: non-LTE abundance analysis // *MNRAS.*— 2020.— V. 499, no. 3.— P. 3706–3719.
61. Romanovskaya A., Ryabchikova T., Shulyak D. et al. 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 // *MNRAS.*— 2019.— V. 488, no. 2.— P. 2343–2356.

62. 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.— 2017.— V. 43, no. 4.— P. 286–298.
63. Wade G. A., Ryabchikova T. A., Bagnulo S., Piskunov N. Chemical Stratification in Magnetic Ap Stars // Magnetic Fields Across the Hertzsprung-Russell Diagram / Ed. by G. Mathys, S. K. Solanki, D. T. Wickramasinghe.— V. 248 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series.— 2001.— P. 373.
64. Ryabchikova T., Piskunov N., Kochukhov O. et al. Abundance stratification and pulsation in the atmosphere of the roAp star γ Equulei // A&A.— 2002.— V. 384.— P. 545–553.
65. Mashonkina L., Ryabchikova T., Ryabtsev A., Kildiyarova R. Non-LTE line formation for Pr ii and Pr iii in A and Ap stars // A&A.— 2009.— V. 495.— P. 297–311.
66. Leblanc F., Monin D. Diffusion in the Atmospheres of CP Stars // JRASC.— 2005.— V. 99.— P. 139.
67. Mashonkina L., Korn A. J., Przybilla N. A non-LTE study of neutral and singly-ionized calcium in late-type stars // A&A.— 2007.— V. 461.— P. 261–275.
68. Sitnova T., Mashonkina L., Ryabchikova T., Pakhomov Y. Influence of departures from LTE on oxygen and calcium abundance determination in the atmospheres of A-K stars. // Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars / Ed. by G. Mathys, E. R. Griffin, O. Kochukhov et al.— 2014.— P. 151–156.

69. Gaia Collaboration. VizieR Online Data Catalog: Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2018) // VizieR Online Data Catalog.— 2018.— P. I/345.
70. Molnar M. R. The Ultraviolet Variations of ϵ UMa. // Bulletin of the American Astronomical Society.— V. 5.— 1973.— P. 325.
71. Kr̕tička J., Mikulášek Z., Henry G. W. et al. The nature of the light variability of the silicon star HR 7224 // A&A.— 2009.— V. 499, no. 2.— P. 567–577.
72. Kr̕tička J., Mikulášek Z., Lüftinger T. et al. Modelling of the ultraviolet and visual SED variability in the hot magnetic Ap star CU Virginis // A&A.— 2012.— V. 537.— P. A14.
73. Kr̕tička J., Mikulášek Z., Lüftinger T., Jagelka M. Visual and ultraviolet flux variability of the bright CP star θ Aurigae // A&A.— 2015.— V. 576.— P. A82.
74. Shulyak D., Kr̕tička J., Mikulášek Z. et al. Modelling the light variability of the Ap star ϵ Ursae Majoris // A&A.— 2010.— V. 524.— P. A66.
75. Amôres E. B., Lépine J. R. D. Models for Interstellar Extinction in the Galaxy // AJ.— 2005.— V. 130, no. 2.— P. 659–673.
76. Lallement R., Capitanio L., Ruiz-Dern L. et al. Three-dimensional maps of interstellar dust in the Local Arm: using Gaia, 2MASS, and APOGEE-DR14 // A&A.— 2018.— V. 616.— P. A132.
77. Green G. M., Schlafly E. F., Finkbeiner D. et al. Galactic reddening in 3D from stellar photometry - an improved map // MNRAS.— 2018.— V. 478, no. 1.— P. 651–666.
78. Gontcharov G. A., Mosenkov A. V. VizieR Online Data Catalog: HIP and TGAS stars reddening and extinction (Gontcharov+ 2018) // VizieR Online Data Catalog.— 2018.— P. II/354.

79. Fitzpatrick E. L. Correcting for the Effects of Interstellar Extinction // PASP.— 1999.— V. 111, no. 755.— P. 63–75.
80. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission / Ed. by ESA.— V. 1200 of ESA Special Publication, 1997.
81. Lallement R., Vergely J. L., Valette B. et al. 3D maps of the local ISM from inversion of individual color excess measurements // A&A.— 2014.— V. 561.— P. A91.
82. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // A&A.— 2018.— V. 616.— P. A1.
83. Романовская А. М., Рябчикова Т. А., Шуляк Д. В. Фундаментальные параметры Ар-звезды HD 108662 // Сборник научных трудов ИНАСАН.— 2020.— V. 5.— P. 219–223.
84. Kochukhov O., Shultz M., Neiner C. Magnetic field topologies of the bright, weak-field Ap stars θ Aurigae and ϵ Ursae Majoris // A&A.— 2019.— V. 621.— P. A47.
85. Girardi L., Bressan A., Bertelli G., Chiosi C. Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: From 0.15 to 7 M_{sun} , and from $Z=0.0004$ to 0.03 // A&AS.— 2000.— V. 141.— P. 371–383.
86. Landstreet J. D., Bagnulo S., Andretta V. et al. Searching for links between magnetic fields and stellar evolution: II. The evolution of magnetic fields as revealed by observations of Ap stars in open clusters and associations // A&A.— 2007.— V. 470, no. 2.— P. 685–698.

87. Bailey J. D., Landstreet J. D., Bagnulo S. Discovery of secular variations in the atmospheric abundances of magnetic Ap stars // *A&A.*— 2014.— V. 561.— P. A147.
88. Pyper D. M., Adelman S. J. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. XIII. HD 51418, 53 Camelopardalis, 78 Virginis, and kappa Piscium. // *A&AS.*— 1983.— V. 51.— P. 365–384.
89. Silvester J., Wade G. A., Kochukhov O. et al. Stokes IQUV magnetic Doppler imaging of Ap stars - I. ESPaDOnS and NARVAL observations // *MNRAS.*— 2012.— V. 426.— P. 1003–1030.
90. Wade G. A., Donati J. F., Landstreet J. D., Shorlin S. L. S. High-precision magnetic field measurements of Ap and Bp stars // *MNRAS.*— 2000.— V. 313, no. 4.— P. 851–867.
91. Martinez P. The Cape Oscillating Ap Star Survey: Ph. D. thesis / , University of Cape Town, SA, (1993).— 1993.
92. Kaiser A. Determination of Fundamental Parameters with Stroemgren Photometry // *Astrophysics of Variable Stars* / Ed. by C. Aerts, C. Sterken.— V. 349 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.*— 2006.— P. 257.
93. Moon T. T., Dworetzky M. M. Grids for the determination of effective temperature and surface gravity of B, A and F stars using uvby-beta photometry // *MNRAS.*— 1985.— V. 217.— P. 305–315.
94. Napiwotzki R., Schoenberner D., Wenske V. On the determination of effective temperature and surface gravity of B, A, and F stars using Stromgren UVB γ beta photometry // *A&A.*— 1993.— V. 268.— P. 653–666.
95. Balona L. A. Effective Temperature Bolometric Correction and Mass Calibration of O-F // *MNRAS.*— 1994.— V. 268.— P. 119.

96. Kunzli M., North P., Kurucz R. L., Nicolet B. A calibration of Geneva photometry for B to G stars in terms of T_{eff} , $\log G$ and $[M/H]$ // A&AS.— 1997.— V. 122.— P. 51–77.
97. Kochukhov O., Makaganiuk V., Piskunov N. Least-squares deconvolution of the stellar intensity and polarization spectra // A&A.— 2010.— V. 524.— P. A5.
98. Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A. et al. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // A&AS.— 1999.— V. 138.— P. 119–133.
99. Kochukhov O. Atmospheric parameters and chemical composition of the ultra-cool roAp star HD 213637 // A&A.— 2003.— V. 404.— P. 669–676.
100. Gelbmann M. J. Chemical composition and fundamental parameters of roAp stars // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso.— 1998.— V. 27, no. 3.— P. 280–284.
101. Ryabchikova T. A., Savanov I. S., Hatzes A. P. et al. Abundance analyses of roAp stars. VI. 10 Aql and HD 122970 // A&A.— 2000.— V. 357.— P. 981–987.
102. Бойко С.— Дипломная работа "Поиск и исследование пульсаций лучевых скоростей в атмосфере магнитной пекулярной звезды HD 185256".— Master's thesis, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Колмогорова, 1с2, 2011.
103. Ryabchikova T. A., Landstreet J. D., Gelbmann M. J. et al. Abundance analysis of roAp stars. IV. HD24712 // A&A.— 1997.— V. 327.— P. 1137–1146.
104. Gelbmann M., Kupka F., Weiss W. W., Mathys G. Abundance analysis of roAp stars. II. HD 203932 // A&A.— 1997.— V. 319.— P. 630–636.

105. Семенко Е. А., Сачков М. Е., Рябчикова Т. А. et al. Исследование химического состава и поиск нерадиальных пульсаций в атмосфере химически пекулярной звезды HD 115708 // Письма в *Астрономический журнал*.— 2008.— V. 34, no. 6.— P. 455–464.
106. Kochukhov O., Ryabchikova T., Bagnulo S., Lo Curto G. The discovery of high-amplitude, 10.9-minute oscillations in the cool magnetic Ap star HD 115226 // *A&A*.— 2008.— V. 479, no. 2.— P. L29–L32.
107. Gelbmann M., Ryabchikova T., Weiss W. W. et al. Abundance analysis of roAp stars. V. HD 166473 // *A&A*.— 2000.— V. 356.— P. 200–208.
108. Ryabchikova T., Ryabtsev A., Kochukhov O., Bagnulo S. Rare-earth elements in the atmosphere of the magnetic chemically peculiar star HD 144897. New classification of the Nd III spectrum // *A&A*.— 2006.— V. 456.— P. 329–338.
109. Рябчикова Т. А., Саванов И. С., Маланушенко В. П., Кудрявцев Д. О. Исследование редкоземельных элементов в атмосферах химически пекулярных звезд. Линии Pr III и Nd III // *Астрон. журн.*— 2001.— V. 78.— P. 444.
110. Alentiev D., Kochukhov O., Ryabchikova T. et al. Discovery of the longest period rapidly oscillating Ap star HD 177765 // *MNRAS*.— 2012.— V. 421, no. 1.— P. L82–L86.
111. Титаренко А. П., Рябчикова Т. А., Кочухов О. П., Цымбал В. В. Химический состав и эволюционный статус Ap-звезды HD138633 // Письма в *Астрономический журнал*.— 2013.— V. 39, no. 5.— P. 390–400.
112. Rusomarov N., Kochukhov O., Ryabchikova T., Ilyin I. Magnetic Doppler imaging of the chemically peculiar star HD 125248 // *A&A*.— 2016.— V. 588.— P. A138.

113. Kato K.-I. Abundance Analysis of the Silicon Star HR 6958 // PASJ.— 2003.— V. 55.— P. 1133–1139.
114. Ryabchikova T. Direct evidence for stratification in A/B stellar atmospheres // EAS Publications Series / Ed. by G. Alecian, O. Richard, S. Vauclair.— V. 17 of EAS Publications Series.— 2005.— P. 253–262.
115. Kochukhov O., Landstreet J. D., Ryabchikova T. et al. Discovery of rapid radial velocity variations in the roAp star 10 Aql and possible pulsations of β CrB // MNRAS.— 2002.— V. 337, no. 2.— P. L1–L5.
116. Ryabchikova T., Kochukhov O., Kudryavtsev D. et al. HD 178892 - a cool Ap star with extremely strong magnetic field // A&A.— 2006.— V. 445.— P. L47–L50.
117. Глаголевский Ю. В., Рябчикова Т. А., Чунтонов Г. А. Магнитное поле и химический состав пекулярной звезды HD 10221 // Письма в Астрономический журнал.— 2005.— V. 31.— P. 363–371.
118. Asplund M., Amarsi A. M., Grevesse N. The chemical make-up of the Sun: A 2020 vision // arXiv e-prints.— 2021.— P. arXiv:2105.01661.
119. Smith W. W., Gallagher A. Radiative Lifetime of the First $^2P_{3/2}$ State of Ionized Calcium and Magnesium by the Hanle Effect // Physical Review.— 1966.— V. 145.— P. 26–34.
120. Theodosiou C. E. Accurate calculation of the 4p lifetimes of Ca^+ // Physical Review A.— 1989.— V. 39.— P. 4880–4883.— (T).
121. Seaton M. J., Yan Y., Mihalas D., Pradhan A. K. Opacities for Stellar Envelopes // Monthly Notices Roy. Astron. Soc.— 1994.— V. 266.— P. 805.— (TB). Opacity Progec.

122. O'Brian T. R., Wickliffe M. E., Lawler J. E. et al. Lifetimes, transition probabilities, and level energies in Fe I // *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*.— 1991.— V. 8.— P. 1185–1201.— (BWL).
123. Smith G., Raggett D. S. J. Oscillator strengths and collisional damping parameters for lines of neutral calcium // *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics*.— 1981.— V. 14.— P. 4015–4024.— (SR).
124. Raassen A. J. J., Uylings P. H. M. On the determination of the solar iron abundance using Fe II lines // *A&A*.— 1998.— V. 340.— P. 300–304.— (RU). <ftp://ftp.wins.uva.nl/pub/orth>.
125. Kurucz R. L.— Robert L. Kurucz on-line database of observed and predicted atomic transitions.— 2010.
126. Kurucz R. L.— Robert L. Kurucz on-line database of observed and predicted atomic transitions.— 2013.
127. Kurucz R. L.— Robert L. Kurucz on-line database of observed and predicted atomic transitions.— 2014.
128. Kurucz R. L.— Robert L. Kurucz on-line database of observed and predicted atomic transitions.— 2016.
129. Kurucz R. L. Semiempirical calculation of gf values for the iron group // *Commission 14 on Atomic and Molecular Spectroscopy, Transactions of the IAU / Ed. by G. Cayrel de Strobel & M. Spite*.— IAU Symposium.— 1988.— P. 168–172.— (K88).
130. May M., Richter J., Wichelmann J. Experimental oscillator strengths of weak Fe I lines // *A&AS*.— 1974.— V. 18.— P. 405–+.— (MRW).
131. Blackwell D. E., Ibbetson P. A., Petford A. D., Shallis M. J. Precision measurement of relative oscillator strengths. IV - Attainment of 0.5 per

- cent accuracy: Fe I transitions from levels a5 D/0-4/ /0.00-0.12 eV/ // MNRAS.— 1979.— V. 186.— P. 633–650.— (BIPS).
132. Bard A., Kock M. Fe I oscillator strengths for lines with excitation energies between 3 and 7eV // Astron. and Astrophys.— 1994.— V. 282.— P. 1014–1020.— (BK).
133. Bard A., Kock A., Kock M. Fe I oscillator strengths of lines of astrophysical interest // Astron. and Astrophys.— 1991.— V. 248.— P. 315–322.— (BKK).
134. Pinnington E. H., Ji Q., Guo B. et al. Beam-laser lifetime measurements for low-lying levels in CrII // Canadian Journal of Physics.— 1993.— V. 71.— P. 470–+.— (PGBH).
135. Sobek J. S., Lawler J. E., Sneden C. Improved Laboratory Transition Probabilities for Neutral Chromium and Redetermination of the Chromium Abundance for the Sun and Three Stars // Astrophys. J.— 2007.— V. 667.— P. 1267–1282.— (SLS).
136. Blackwell D. E., Shallis M. J., Simmons G. J. Oscillator strengths of Fe II lines derived from the solar spectrum - Choice of solar model atmosphere // Astron. and Astrophys.— 1980.— V. 81.— P. 340–343.— (BSS-cor). (+0.2).
137. Ryabchikova T. A., Piskunov N. E., Stempels H. C. et al. The Vienna Atomic Line Data Base - a Status Report // Physica Scripta Volume T.— 1999.— V. 83.— P. 162–173.— (T83av). average value for Fe II.
138. Hannaford P., Lowe R. M., Grevesse N., Noels A. Lifetimes in Fe II and the solar abundance of iron // Astron. and Astrophys.— 1992.— V. 259.— P. 301–306.— (HLGN).