

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи

Пахомов Юрий Васильевич

**ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
БАРИЕВЫХ ЗВЕЗД**

(01.03.02 - астрофизика и радиоастрономия)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
академик РАН Боярчук Александр Алексеевич

Москва 2004

Оглавление

Введение	4
1 Наблюдательный материал	25
1.1 Наблюдения на 2.6-м телескопе ЗТШ КрАО	25
1.2 Наблюдения на 6-м телескопе БТА САО РАН	27
1.3 Сравнительный анализ наблюдательного материала .	28
1.4 Обработка наблюдений	29
1.5 Резюме	31
2 Методика определения химического состава атмосфер ис- следуемых звезд	32
2.1 Основные положения в методике определения хими- ческого состава звездных атмосфер	32
2.2 Выбор Солнца в качестве звезды сравнения	34
2.3 Определение параметров модели звездной атмосферы	40
2.3.1 Микротурбулентная скорость	40
2.3.2 Температура и ускорение силы тяжести	44
2.4 Оценки неопределенностей в вычислении содержа- ний химических элементов	49
2.4.1 Ошибки, обусловленные неточностью приня- тых значений параметров модели звездной ат- мосферы	49
2.4.2 Влияние выбора модели конвекции	52
2.4.3 Влияние сверхтонкого расщепления спектраль- ных линий	57
2.5 Резюме	59
3 Исследование умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов	60
3.1 Вычисление химического состава	60
3.2 Анализ содержаний некоторых химических элементов	64
3.2.1 Натрий	64

3.2.2	Алюминий	66
3.2.3	Кремний	68
3.2.4	Некоторые итоги анализа содержаний Na, Al, Si	69
3.2.5	s-элементы	70
3.2.6	Содержание углерода и азота	74
3.3	Выводы	77
4	Исследование классических бариевых звезд	80
4.1	Вычисление химического состава	80
4.2	Анализ содержаний некоторых химических элементов	88
4.2.1	Натрий	92
4.2.2	Алюминий	95
4.2.3	Кремний	96
4.2.4	Магний	98
4.2.5	Некоторые итоги анализа содержаний Na, Al, Mg, Si	101
4.2.6	s-элементы	102
4.3	Учет сверхтонкого расщепления	112
4.4	Выводы	113
5	Анализ положений бариевых звезд на диаграмме "температура-светимость"	117
5.1	Определение параметров звездных атмосфер	117
5.1.1	Эффективная температура	118
5.1.2	Светимости исследуемых звезд	128
5.1.3	Масса и ускорение силы тяжести	131
5.2	Положение умеренных бариевых звезд на диаграмме "температура-светимость"	131
5.3	Положение классических бариевых звезд на диаграм- ме "температура-светимость"	133
5.4	Сравнение параметров звездных атмосфер	134
5.5	Выводы	137
	Заключение	138
	Литература	141

Введение

Обзор

Как известно, большинство звезд гигантов поздних спектральных классов имеют нормальный химический состав, то есть содержания химических элементов в их атмосферах соответствуют солнечным содержаниям. Однако иногда они показывают в своих спектрах различные химические аномалии. К таким звездам относятся, например, CN- и CH-звезды, SrII-звезды, а также, так называемые, бариевые звезды (или BaII-звезды) и другие, представляющие пекулярные группы G-K-гигантов. Большое количество эффектов, влияющих на химический состав звездных атмосфер, не позволяет классифицировать пекулярные красные гиганты только по одному какому-нибудь параметру или элементу.

Согласно теории звездной эволюции, на этапе схода звезды с главной последовательности у нее развивается конвективная оболочка, которая, постепенно расширяясь, проникает в глубокие внутренние слои звезды, в которых на стадии главной последовательности проходили ядерные реакции, и выносит продукты этих реакций в верхние слои звездной атмосферы, что приводит к изменению её химического состава [1].

Так, например, хорошо известным наблюдательным фактом является резкое уменьшение содержаний легкогорящих элементов, таких как литий, бериллий, в атмосферах звезд, сошедших с главной последовательности [2–5]. Кроме того в атмосферах таких

звезд наблюдается изменение содержаний углерода и азота, что является следствием протекания CNO-цикла горения водорода в звездных недрах [6, 7]. При этом содержание углерода в G-K гигантах понижено по сравнению с солнечным, азот находится в избытке, содержание кислорода практически не изменяется. Вследствие таких изменений величина C/N более определенно показывает, что в атмосферах красных гигантов наблюдаются продукты термоядерных реакции CNO-цикла и часто используется для их анализа [8]. Кроме того, на протекание CNO-цикла указывают и изменения изотопного содержания углерода и кислорода в атмосферах этих звезд [9–11]. Обнаруженный сравнительно недавно избыток содержания натрия в сверхгигантах [12–14] а также в нормальных красных гигантах [15] свидетельствует о том, что горение водорода осуществляется не только в CNO-цикле, но и параллельно ещё и в NeNa-цикле [16, 17].

Таким образом задача исследования содержаний химических элементов в атмосферах красных гигантов различных групп и их сравнительный анализ важны для понимания как звездной эволюции, поскольку отражают синтез элементов в недрах звезды в различные ее фазы, так и для химической эволюции Галактики.

Данная диссертация представляет исследование одной группы красных гигантов - бариевых звезд.

Впервые бариевые звезды (или звезды BaII) были выделены в отдельную группу Бидельманом и Киненом [18] при разработке двумерной спектральной классификации. По низкодисперсным спектрограммам (76 Å/мм у H_γ) они нашли пять звезд G-K гигантов, в спектрах которых резонансная линия BaII ($\lambda 4554 \text{ Å}$) имела аномально высокую интенсивность по сравнению с другими звезд-

дами того же спектрального класса; она была сравнима с интенсивностью этой линии в спектрах звезд класса S. Кроме того в спектрах этих звезд было найдено усиление линий SrII ($\lambda 4077\text{\AA}$ и $\lambda 4215\text{\AA}$), а также молекулярных полос CN (G-полоса $\lambda 4300\text{-}4312\text{\AA}$), CN ($\lambda 4215\text{\AA}$) и C₂ (система Свана около $\lambda 5165\text{\AA}$), что характерно для углеродных звезд, принадлежащих асимптотической ветви, а не для G-K гигантов. Поскольку подобные аномалии наблюдаются в сверхгигантах, а водородные линии соответствуют гигантам, авторы заключили, что данная группа звезд не может быть отнесена к нормальным звездам гигантам.

Дальнейшие спектральные исследования [19] выполненные для бариевой звезды ζ Car с более высокой дисперсией (5 $\text{\AA}/\text{мм}$ в области $\lambda 4000\text{-}4600\text{\AA}$ и 10 $\text{\AA}/\text{мм}$ в области $\lambda 6000\text{-}6900\text{\AA}$) показали, что кроме указанных выше линий усилены также линии редкоземельных элементов LaII, YII, ZrII, NdII, PrII, SmII, CeII. Было показано, что такие аномалии невозможно объяснить в рамках изменений температуры и ионизации.

В 1957 году был выполнен первый количественный анализ химического состава бариевой звезды HD 46407 [20]. Методом кривой роста Барбидж и Барбидж определили содержания около 30 элементов в её атмосфере. Они предположили, что аномалии в содержаниях элементов тяжелее железной группы образуются в недрах звезды и выносятся наверх вследствие конвективного перемешивания. Рассматривая различные ядерные процессы, авторы сделали вывод, что эти аномалии содержаний вызваны скорее всего процессом медленного захвата нейтронов, или s-процессом.

В работе [21] Уорнер, выполняя детальный анализ двадцати бариевых звезд, отметил, что линии элементов, начиная от Ca и

кончая группой железа, представляют собой нормальный спектр соответствующего спектрального класса. Автор предложил дополнительно классифицировать бариевые звезды по "степени бариевости", то есть по степени интенсивности как линий BaII ($\lambda 4554\text{\AA}$), так и более тяжелых элементов, разделяя эту классификацию на пять групп по шкале от 1 (самая слабая пекулярность) до 5 (самая сильная).

Морган и Кинан [22] по спектрограммам с низкой дисперсией ($\approx 80\text{ \AA/мм}$) обнаружили звезды, у которых интенсивность линий BaII и SrII была ниже, чем у бариевых звезд, но выше, чем у нормальных красных гигантов. Для таких звезд они ввели классификационный индекс Ba0, а сами звезды называли "полу-бариевыми". Позднее [23] эти звезды стали называться умеренными бариевыми, в отличие от классических бариевых звезд, а в классификации их "бариевости" стали использовать индексы от Ba0 до Ba1 с шагом 0.1.

Внимание к этим интересным объектам не ослабевает, их исследования продолжаются. Возросло и количество обнаруженных бариевых звезд. Если в [18] таких объектов было 5, то в современном списке бариевых звезд (классических и умеренных) [24] их насчитывается около 400. Однако общее число бариевых звезд по отношению к количеству обычных красных гигантов невелико и составляет всего 0.5-1% [25].

Исследования, направленные на выяснение природы бариевых звезд, дали много интересных результатов, основные из которых приведены ниже.

1. Классические бариевые звезды

Количественные спектральные исследования на основе на-

блюдательного материала с высоким разрешением показали (см., например, [26,27]), что в атмосферах классических бариевых звезд по сравнению с нормальными G и K гигантами наблюдаются:

- умеренный избыток содержания углерода (примерно на 0.3 dex), в то время как у нормальных красных гигантов содержание его содержание понижено примерно на 0.3 dex.
- приблизительно нормальные, относительно солнечных, содержания азота и кислорода;
- аномально высокие содержания тяжелых (тяжелее Fe) элементов, образование которых осуществляется в s-процессе.

Такие аномалии химического состава атмосфер характерны для звезд, находящихся на стадии асимптотической ветви гигантов (АВГ), в той фазе, когда происходит горение водорода и гелия в слоевых источниках и связанное с этим третье глубокое перемешивание. Проблема, однако, заключается в том, что классические бариевые звезды имеют светимость существенно ниже той, которую имеют звезды АВГ в этой фазе эволюции [28], и наблюдаемые аномалии содержаний химических элементов не должны у них наблюдаться.

Открытие двойственности бариевых звезд послужило ключом к пониманию природы этих интересных объектов. Многолетние наблюдения лучевых скоростей [21] выявили у многих классических бариевых звезд изменения лучевых скоростей, свидетельствующие об их двойственности. Анализ полученных функций масс привел к выводу, что если массу звезды, наблюдаемой как бариевая, принять равной $1.5 M_{\odot}$, то масса спутника должна составлять $0.2-0.6 M_{\odot}$ [24], т.е. спутники должны быть белыми

карликами. Белые карлики должны наблюдаться в ультрафиолетовой области спектра, где они ярче, чем главная компонента. И, действительно, поиски в УФ области спектра излучения, которое превышало бы излучение в этой области красного гиганта, увенчались успехом; у нескольких бариевых звезд такие компоненты - белые карлики, были найдены [29–31].

Согласно современным представлениям о природе классических бариевых звезд, в двойной системе со звездами, сильно различающимися по массе, более массивный компонент эволюционирует быстрее своего спутника и первым достигает фазы АВГ, при которой интенсивно теряет вещество, сбрасывает оболочку и превращается в белый карлик. Часть сброшенной оболочки попадает на спутник, загрязняя его атмосферу продуктами горения гелия и s-процесса, вследствие чего мы и наблюдаем эту звезду как бариевую.

2. Умеренные бариевые звезды

Исследования содержаний химических элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд не столь многочисленны, как в случае классических бариевых звезд, однако они привели к некоторым вполне определенным выводам:

- в отличии от классических бариевых звезд, которые имеют избыток углерода, у умеренных бариевых звезд его содержание не отличается от содержания в нормальных красных гигантах, составляющего примерно -0.3 dex [7, 27];
- содержания элементов s-процесса выше, чем в нормальных гигантах, но меньше, чем в случае классических бариевых звезд [32, 33].

Интересно заметить, что согласно [34], вопрос о двойственности умеренных бариевых звезд не так однозначен, как для классических бариевых звезд; многие из них не показывают изменения лучевых скоростей. Одни авторы считают [30], что и классические, и умеренные бариевые звезды имеют высокую степень двойственности, другие [35] - наоборот, что классические бариевые звезды имеют более высокую степень двойственности по сравнению с умеренными бариевыми звездами; в то же время в [36] отмечается, что большинство умеренных бариевых звезд, по-видимому, являются двойными и некоторые из них могли быть связаны со вспышкой ее компоненты как сверхновой (эта гипотеза нашла свое развитие в [37]). В [38] отмечено, что гипотеза двойственности не является универсальной. А в [39] сделан вывод, что эволюционный статус бариевых звезд еще до конца не выяснен, а также что имеются сомнения в однородности класса бариевых звезд.

Актуальность проблемы

В современный список бариевых звезд входит около 400 таких объектов [24]. Он включает в себя как классические, так и умеренные бариевые звезды. Несмотря на многочисленные исследования как содержаний химических элементов, так и доказательств двойственности (изменений лучевых скоростей, поиски горячего спутника в УФ), в проблеме природы бариевых звезд остается еще много неясного.

Таким образом задача исследования содержаний химических элементов в атмосферах бариевых звезд (как классических, так и умеренных) и их сравнительный анализ с аналогичными результатами для нормальных красных гигантов является актуальной зада-

чей для понимания природы этих объектов. Кроме того, данная задача актуальна для понимания звездной эволюции, поскольку аномалии химического состава отражают синтез элементов в недрах звезды и процесс их выноса в её атмосферу в различные фазы эволюции.

Взросшие возможности современной техники наблюдений и их обработки позволяют достичь бóльшей точности в определении содержаний химических элементов в атмосферах звезд, что дает возможность нахождения и более тонкого исследования особенностей химического состава атмосфер бариевых звезд.

Постановка задачи

Главной задачей диссертации является исследование химического состава бариевых звезд с целью выяснения их природы. В решение этой задачи входило:

- получение спектрального наблюдательного материала высокого качества для трех групп красных гигантов: нормальных красных гигантов, умеренных бариевых и классических бариевых звезд;
- определение содержаний химических элементов атмосфер исследуемых звезд с возможно большей точностью;
- выполнение сравнительного анализа содержаний химических элементов в атмосферах трех групп красных гигантов

Содержание работы

Диссертация состоит из Введения, 5-х глав и Заключения. Объем работы составляет 146 страниц и содержит 32 рисунков и 18 таблиц. Список цитируемой литературы включает 117 наименования.

Введение содержит обзор научных работ по бариевым звездам. Показана актуальность работы, сделана постановка задачи и даны характеристики диссертации.

Первая глава описывает наблюдательный спектральный материал высокого разрешения и с высоким отношением сигнала к шуму, полученный на телескопах ЗТШ (2.6-м, Крымская астрофизическая обсерватория, п.Научный, Крым, Украина) и БТА (6-м, Специальная астрофизическая обсерватория, п.Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия). Даются характеристики наблюдений и описывается их предварительная обработка. Выполнен сравнительный анализ эквивалентных ширин по двум спектрограммам одной звезды (β Gem). Отмечено отсутствие систематических отклонений, что свидетельствует о возможности дальнейшего совместного анализа данных, полученных на этих двух инструментах. Приводится список 23 исследованных звезд, включающий в себя 2 нормальных красных гиганта, 5 умеренных бариевых и 16 классических бариевых звезд.

Вторая глава посвящена методу определения параметров звездных атмосфер и их химического состава. В работе применяется метод моделей атмосфер и используется приближение локального термодинамического равновесия. Параметры звездных атмосфер - эффективная температура, ускорение силы тяжести и микротурбулентная скорость, - определены следующим методом.

Согласно современным представлениям теории звездной эволюции, относительные содержания элементов железной группы не меняются во время эволюции звезды на стадиях главной последовательности и гигантов, откуда следует, что содержание каждого элемента этой группы в атмосфере гиганта по отношению к содержанию его на Солнце должны быть одинаковы и отражать металличность звезды. Поэтому для оценки атмосферных параметров для каждой звезды на основании измеренных эквивалентных ширин проводились расчеты содержаний химических элементов группы железа (Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni) при различных значениях эффективных температур и ускорений силы тяжести, близких к ожидаемым (например из спектрального класса и светимости, из показателей цвета, из литературы и т.д.). Полученные результаты анализировались с целью нахождения таких параметров модели атмосферы, при которых разброс относительных содержаний элементов группы железа был бы минимальным. Как показано в работах [40,41], в рамках каждой сетки моделей всегда удастся найти такую модель, которая наилучшим образом описывает наблюдаемый спектр. При этом получаемые содержания химических элементов имеют наименьший разброс, совпадают содержания, полученные по линиям нейтральных атомов и ионов, отсутствует систематический ход содержаний с изменением потенциала возбуждения.

По найденным параметрам вычислялись модели атмосфер для каждой исследуемой звезды. В диссертации для вычисления моделей звездных атмосфер использовалась программа ATLAS9 с усовершенствованной теорией конвекции [42]. Для вычисления содержаний химических элементов по эквивалентным ширинам линий

и с соответствующей моделью атмосферы применялась программа WIDTH9. При анализе отбирались неблендированные линии с эквивалентной шириной не более 100 мÅ для уменьшения влияния неЛТР эффектов и минимизации ошибок из-за неопределенностей в атомных параметрах затухания.

Отмечается актуальность выбора метода дифференциального анализа содержаний химических элементов в звездных атмосферах по отношению к Солнцу, в рамках одной сетки моделей атмосфер и по единой методике. Часть Главы посвящена оценкам ошибок в определениях содержаний химических элементов, обусловленным возможной неточностью выбора параметров модели звездных атмосфер, влиянием выбора модели конвекции и сверхтонким расщеплением.

Третья глава посвящена определению и анализу химического состава умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов и сравнению полученных результатов. Рассматриваются содержания элементов Na, Al, Si, которые находятся в избытке как в нормальных красных гигантах, что было обнаружено раньше [15], так и в умеренных бариевых звездах. И эти избытки коррелируют с ускорением силы тяжести и имеют одну зависимость для этих двух групп звезд. Сделан вывод о едином механизме возникновения избытков этих элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов, а именно вынос из недр звезд в их атмосферу конвективным перемешиванием продуктов ядерных реакций, проходивших на стадии главной последовательности. Повышенные избытки элементов Na, Al, Si в атмосферах умеренных бариевых звезд по сравнению с нормальными красными гигантами свидетельствуют о более развитой конвекции в них.

На основании сопоставления результатов наблюдений с теоретическими работами сделан вывод о том, что эти элементы образуются в NeNa- и MgAl-циклах горения водорода, что свидетельствует о ходе этих реакции параллельно p-p- и CNO-циклам в недрах звезд на главной последовательности.

Отмечено, что ускорения сил тяжести для умеренных бариевых звезд в среднем ниже, чем для нормальных красных гигантов, что говорит о их большей светимости и об их более поздней стадии эволюции по сравнению с нормальными красными гигантами.

Анализ литературных данных по содержаниям продуктов CNO-цикла в атмосферах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов показал, что конвекция в недрах звезд первой группы развита сильнее, чем во второй, что также является следствием более продвинутой стадии их эволюции.

Проанализированы величины избытков элементов s-процесса и показана единая природа их происхождения как в умеренных бариевых звездах, так и в нормальных красных гигантах. Повышенное содержание s-элементов в умеренных бариевых звездах также говорит о более глубоком проникновении конвекции и более продвинутой фазе эволюции.

Сделан вывод, что умеренные бариевые звезды представляют собой одиночные красные гиганты, находящиеся на более поздней фазе эволюции, чем нормальные красные гиганты. Большие величины избытков элементов в умеренных бариевых звездах определяются более развитой конвективной оболочкой в них. А образование небольших избытков s-элементов, вероятно, связано с потоком нейтронов, возникающем в ходе фотонейтронных реакций, во время которых энергичные гамма-кванты могут выбить нейтроны из

атомных ядер.

Четвертая глава посвящена определению и анализу химического состава классических бариевых звезд. Для них, как и для умеренных бариевых звезд, были обнаружены избытки содержаний элементов Na, Al, Si, а также Mg. Найдено, что величины этих избытков удовлетворяют зависимостям от ускорения силы тяжести, выведенным ранее для умеренных бариевых звезд, нормальных гигантов и сверхгигантов. Это свидетельствует, что эти избытки в атмосферах звезд всех трех рассматриваемых групп имеют единую природу происхождения: в результате реакций горения водорода в NeNa- и MgAl-циклах в недрах звезд и последующим выносом их в атмосферу конвективным перемешиванием на стадии красных гигантов.

Проведен анализ содержаний s-элементов, и рассматриваются различные факторы, влияющие на возникновение феномена бариевой звезды. Подтверждено, что избытки в содержаниях элементов s-процесса увеличиваются с уменьшением орбитального периода, что и должно наблюдаться согласно гипотезе о двойственности бариевых звезд. Показано также, что избытки s-элементов тем больше, чем меньше металличность. В различных случаях может быть определяющим как один так и другой фактор.

Сделан вывод, что для объяснения спектральных особенностей классических бариевых звезд необходимо привлечение гипотезы об их двойственности: в двойной системе с компонентами, различающимися по массе, более массивная звезда быстрее эволюционирует и сбрасывает оболочку, содержащую большое количество продуктов ядерных реакций, на звезду, наблюдаемую сейчас как бариевая. Это подтверждается также и тем, что в атмосфе-

рах классических бариевых звезд наблюдаются избытки углерода. Показано, что подгруппа звезд, у которых не обнаружена двойственность, является неоднородной и включает в себя два класса объектов: классические бариевые звезды, находящиеся в широких парах или имеющие перпендикулярное расположение плоскости орбиты к лучу зрения, и умеренные бариевые звезды с низкой металличностью.

В пятой главе проводится анализ положений исследуемых звезд на диаграмме "температура-светимость". Для определения положений звезд на диаграмме необходимо знать их эффективные температуры и светимости.

Поскольку полученные нами параметры звездных атмосфер выведены на основе анализа спектров с помощью метода моделей атмосфер, то точность их соответствия реальным параметрам зависит от точности соответствия математической модели реальной звездной атмосфере. Поэтому для анализа положений исследуемых звезд на диаграмме "температура-светимость" рассматриваются эффективные температуры, которые получены неспектроскопическими методами, основанными на построении калибровочных зависимостей эффективных температур от показателей цвета различных фотометрических систем. Калибровочные зависимости построены по опорным звездам, чьи эффективные температуры получены методом инфракрасных потоков. Из фотометрических систем рассматриваются две: широкополосная система Джонсона UBV [43] и среднеполосная 13-цветная фотометрия [44].

Светимость определялась из видимых звездных величин с учетом межзвездного поглощения и расстояний до исследуемых звезд (использовались данные каталога HIPPARCOS).

Из рассмотрения положений звезд на эволюционных треках [45, 46] были выведены их массы. Последующий анализ диаграммы "температура-светимость" показал, что у умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов с большими избытками s-элементов есть тенденция располагаться в областях треков с большими массами и более поздней стадии эволюции. Это подтверждает вывод о том, что умеренные бариевые звезды - это нормальные красные гиганты с более развитой конвекцией и в более продвинутой стадии эволюции. Для классических бариевых звезд такой тенденции не было замечено, что и следовало ожидать в рамках гипотезы об их двойственности.

Заключение подводит итог всей работы и содержит выводы диссертации.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Боярчук А. А., Пахомов Ю. В., Антипова Л. И. и Боярчук М.Е., "Анализ содержаний химических элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд", *Астрономический журнал*, 2002, том 79, № 10, стр. 909
2. Антипова Л. И., Боярчук А. А., Пахомов Ю. В. и Панчук В. Е., "Исследования классических бариевых звезд", *Астрономический журнал*, 2003, том 80, № 8, стр. 704
3. Антипова Л. И., Боярчук А. А., Пахомов Ю. В. и Панчук В. Е., "Анализ химического состава атмосфер классических бариевых звезд", *Астрономический журнал*, 2004, том 81, № 6, стр. 658

Личный вклад автора

Автор диссертации:

- принимал непосредственное участие в наблюдениях на 2.6-м телескопе ЗТШ (КрАО), предварительной обработке полученного спектрального материала, а также ассистировал в части наблюдений на 6-м телескопе БТА (САО).
- выполнил обработку спектрального материала (проведение уровня непрерывного спектра, измерение эквивалентных ширин спектральных линий), а также определение параметров атмосферы и содержаний химических элементов для 4 из 7 умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов и для 13 из 16 классических бариевых звезд;
- провел сравнительный анализ эквивалентных ширин по спектрам β Gem, полученным на 2.6-м телескопе ЗТШ и на 6-м телескопе БТА;
- выполнил определение фундаментальных параметров звезд: эффективной температуры, ускорения силы тяжести, светимости, массы, на основе паралаксов и выведенных фотометрических калибровок, а также на основе метода инфракрасных потоков (IRFM). Сделал учет межзвездного поглощения на основе анализа двухцветной диаграммы;
- активно участвовал в анализе полученных данных, в частности в анализе зависимостей содержаний Na, Mg, Al, Si от ускорения силы тяжести и содержаний s-элементов в атмосферах исследованных звезд от их металличности.

Апробация результатов

Основные результаты были представлены:

- на астрофизических семинарах:
 - Института Астрономии РАН
 - Крымской Астрофизической Обсерватории (Крым, Украина)
- на конференциях ИНАСАН:
 - Конкурс молодых ученых, 2002, 2003гг.
- на российской конференции:
 - "Физика Космоса" (2001, АО УрГУ)
- на международных конференциях:
 - "9-th Open Scientist's Conference on Astronomy and Space Physics" (2002, Украина, Киев)
 - "Chemical and dynamic evolution of stars and galaxies" (2002, Украина, Одесса)

Основные положения, выносимые на защиту

Все выводы получены впервые в мире на основе анализа собственных спектральных наблюдений автора.

1. Результаты определения содержаний химических элементов в атмосферах 23 звезд с точностью, превосходящей точность ранее опубликованных результатов других авторов.

2. Существование избытков химических элементов Na, Mg, Al, Si в атмосферах бариевых звезд (умеренных и классических), а также одинаковой зависимости этих избытков от ускорения силы тяжести в атмосферах бариевых звезд и нормальных красных гигантов - вывод о единой природе возникновения аномалий в содержаниях Na, Mg, Al, Si в атмосферах этих трех групп звезд.
3. Существование зависимости величины избытков s-элементов в атмосферах классических бариевых звезд не только от величины орбитального периода, но и от их металличности.
4. Вывод, что умеренные и классические бариевые звезды являются разными по природе объектами: умеренные бариевые представляют собой одиночные красные гиганты на более поздней стадии эволюции, чем нормальные красные гиганты; классические бариевые - это компоненты в двойной системе; происхождение избытков s-элементов связано с двойственностью.

Научная новизна

Все пункты, приведенные ниже, получены автором из собственных спектральных наблюдений.

- Для большинства исследованных звезд анализ содержаний химических элементов выполнен на основании наблюдательного материала, существенно превосходящего по спектральному разрешению материалов ранее проводимых наблюдений.

- Для двух исследованных звезд (HD 88562 и HD 183915) определение химического состава атмосфер выполнено впервые.
- Впервые показано существование в атмосферах бариевых звезд (как классических, так и умеренных) избытков содержания химических элементов Na, Al, Mg, Si, величины которых зависят от ускорения силы тяжести в атмосфере звезды, то есть от ее светимости. Причем для каждого из элементов такая зависимость совпадает с аналогичной зависимостью для нормальных сверхгигантов и гигантов, что свидетельствует о единой природе происхождения этих избытков.
- Впервые выявлена зависимость избытка магния от ускорения силы тяжести для нормальных красных гигантов и бариевых звезд.
- Впервые для классических бариевых звезд из наблюдений выведена зависимость избытков s-элементов от металличности
- Впервые показано, что умеренные и классические бариевые звезды являются разными по природе группами объектов:
 - умеренные бариевые представляют собой одиночные красные гиганты, находящиеся на более поздней стадии эволюции, чем нормальные красные гиганты; наблюдаемые избытки s-элементов у них определяются развитой конвекцией, которая выносит в атмосферу продукты ядерных реакции;
 - классические бариевые являются компонентами в двойных системах; происхождение избытков s-элементов свя-

зано с двойственностью: быстрая эволюция более массивного компонента и сброс его оболочки на звезду, которая наблюдается сейчас как бариевая;

- Построены двенадцать калибровочных зависимостей, основанных на данных среднеполосной фотометрии и по температурам, которые определены методом инфракрасных потоков. Калибровочные зависимости позволяют оценивать эффективные температуры звезд по показателям цвета среднеполосной 13-цветной фотометрии [44].

Научная и практическая значимость работы

- Практическую ценность имеет спектральный материал высокого разрешения, полученный при выполнении данной задачи. В основе его лежат ПЗС-спектрограммы с высоким отношением сигнала к шуму. Спектрограммы могут быть использованы для решения других задач.
- Научную значимость представляют выведенные фундаментальные параметры звезд: эффективная температура, ускорение силы тяжести, светимость, масса, металличность, содержание химических элементов, микротурбулентная скорость. Полученные данные могут быть использованы другими исследователями при сопоставлении с результатами анализа химического содержания других звезд.
- Научную значимость представляют зависимости содержаний элементов Na, Mg, Al, Si в атмосферах умеренных и классических бариевых звезд и нормальных красных гигантах от

ускорения силы тяжести, а также выявленная из наблюдений зависимость содержаний s-элементов в атмосферах исследованных звезд от их металличности.

- Научную значимость имеет вывод о единой природе умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов, а также о разной природе классических и умеренных бариевых звезд. Полученные результаты и выводы могут быть полезны при исследовании эволюции звезд и химической эволюции Галактики.

1. Наблюдательный материал

Для решения поставленной задачи были выбраны 23 звезды (5 умеренных бариевых, 16 классических бариевых и 2 нормальных красных гиганта), и были проведены их спектральные наблюдения. Список всех звезд содержится в табл. 1.1. В последней колонке таблицы указан телескоп, на котором были проведены их спектральные наблюдения.

1.1. Наблюдения на 2.6-м телескопе ЗТШ КрАО

Спектральные наблюдения нормальных красных гигантов и умеренных бариевых звезд были выполнены на 2.6-м телескопе ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории в период с 1994 по 2002 годы в первой камере Шмидта дифракционного кудэ-спектрографа АСП-14 [47].

Спектрограф оснащен дифракционной решеткой (600 штр/мм) размером 280x290 мм. Регистрация спектрограмм проводилась во II-ом дифракционном порядке спектрографа с дисперсией $3\text{\AA}/\text{мм}$. Все наблюдения проведены при одном значении ширины входной щели равном 0.2 мм.

В качестве приемника использовалась ПЗС-матрица SDS-900 фирмы PhotoMetric GmbH (1024x256 пикселей).

Время экспозиции выбиралось таким образом, чтобы отношение сигнала к шуму было не менее 100, обычно $S/N \geq 100-300$. За одну экспозицию регистрировалась спектральная полоса шириной

Таблица 1.1: Список звезд, включенных в программу исследования

HD	Координаты (2000.0)		Спектр.класс	m_v	телескоп
	α	δ			
16458	02 ^h 47 ^m 47.7 ^s	+81° 26' 54"	G8II Ba3	5.79 ^m	БТА
46407	06 32 46.9	-11 09 59	K0II Ba3	6.30	БТА
49293	06 47 51.6	+02 24 44	K0+IIIa Ba0.2	4.48	ЗТШ
65854	08 03 32.3	+54 09 35	G8II Ba1	8.41	БТА
77247	09 03 32.3	+53 06 30	G8II Ba2	6.87	БТА
83618	09 39 51.4	-01 08 34	K2.5III-IIIb Ba0.3	3.91	ЗТШ
88562	10 12 29.9	-15 53 23	K2II Ba4	8.52	БТА
101013	11 37 53.0	+50 37 06	K0II Ba3	6.12	БТА
113226	13 02 11.0	+10 57 33	G8II ab	2.83	ЗТШ
130386	14 48 02.3	-05 30 24	K0II Ba1	7.80	БТА
133208	15 01 56.8	+40 23 26	G8IIIa Ba0.3	3.49	ЗТШ
139409	15 38 41.4	-17 39 53	G5II Ba1	7.15	БТА
153210	16 57 40.1	+09 22 30	K2III	3.20	ЗТШ
158899	17 30 44.3	+26 06 38	K3.5III Ba0.1	4.40	ЗТШ
175190	18 55 07.1	-22 40 17	K3II Ba1	4.99	БТА
176411	18 59 37.4	+15 04 06	K1-III Ba0.2	4.02	ЗТШ
178717	19 09 22.0	+10 14 28	K4II Ba4	7.14	БТА
183915	19 31 25.5	+11 37 41	K1II Ba3	7.29	БТА
196673	20 37 44.3	+33 21 59	K0II Ba1	6.97	БТА
199394	20 55 09.0	+46 21 00	G8II Ba1	7.00	БТА
199939	20 58 43.5	+44 24 53	K0II Ba4	7.44	БТА
204075	21 26 39.9	-22 24 41	G4II Ba3	3.77	БТА
205011	21 31 50.2	+23 50 43	G9II Ba2	6.43	БТА

около 60°А. Из всего возможного для данного спектрографа диапазона были выбраны 19 спектральных полос по 60°А. Спектральные полосы выбирались таким образом, чтобы зарегистрировать необходимые линии для выполнения поставленной задачи. В табл. 1.2 для каждой из выбранных полос указана центральная длина волны $\lambda_{\text{центр}}$, номер используемого фильтра и перечислены элементы, чьи спектральные линии представляют интерес для данной работы, кроме элементов группы железа, так как их многочисленные линии содержатся почти во всех указанных спектральных полосах. Все отобранные линии лежат в диапазоне от 5100 до 6800°А,

Предварительная обработка наблюдений (деление на плоское поле, удаление следов космических частиц и т.д.) была выполнена по программам, написанным сотрудниками КрАО.

1.2. Наблюдения на 6-м телескопе БТА САО РАН

Классические бариевые звезды являются относительно слабыми объектами и практически недоступны для наблюдений на ЗТШ КрАО, поэтому их наблюдения были выполнены на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН.

Наблюдения классических бариевых звезд проводились с 2000 по 2003 год с помощью эшелюного спектрографа, стацио-

Таблица 1.2: Список 19-и спектральных полос по 60\AA , получаемых на кудэ-спектрографе ЗТШ КрАО

N	$\lambda_{\text{центр}}$	фильтр	основные элементы (кроме группы железа)
1	5130	4	ZrII CeII YII LaII NdII NaI
2	5247	4	PrII NdII ScII MnI ScI CaI CeII
3	5308	4	ZrII LaII MnI PrII CeII ScII ZrI NdII YII
4	5352	4	LaII ZrII PrII NdII CeII MnI ScI CaI ScII
5	5416	4	MnI PrII ZrI NdII YII
6	5525	4	SiI MnI HfI YI MoI ScI PrII NdII ScII CeII YII
7	5715	4	LaII SiI ScI MgI NdII GdII YII
8	5780	4	SiI MoI PrII NdII
9	5853	4	LaII MnI PrII BaII CaI ZrI ScII NdII
10	6016	5	MnI MoI YI PrII CeII ZrI NdII
11	6075	5	SiI EuII
12	6135	5	ZrII SiI BaII CaI NaI ZrI
13	6194	5	SiI YI ScI CaI EuII
14	6315	5	LaII MgI ZrI ScII
15	6415	5	SiI LaII MnI CaI EuII
16	6475	5	BaII CaI ZrI
17	6628	5	SiI NdII ScII EuII YII
18	6707	5	SiI AlI YI CaI
19	6786	5	ZrII SiI LaII YI NdII CaI ZrI YII

нарно установленного в фокусе Нэсмита. Спектрограф изготовлен в 1998 году в Лаборатории звездной спектроскопии САО [48]. Узел скрещенной дисперсии представлен дифракционной решеткой (300 штр/мм), работающей в первом порядке. Дисперсия спектрограмм составляет около 2 \AA/мм для $\lambda 5000 \text{ \AA}$.

Приемником излучения являлась ПЗС-матрица 2048x2048 (размер пикселя 15x15 мкм) производства Ford-Loral Астрономической обсерватории университета г.Уппсала (Швеция). Одновременно на данной ПЗС-матрице регистрируется около 25-26 спектральных диапазонов размером около 60 \AA . Наблюдательный материал охватывает диапазон 4600-6100 \AA . Для уменьшения влияния космических лучей снимались два или более кадров, которые складывались и подвергались фильтрации.

Предварительная обработка ПЗС изображений производилась в пакете MIDAS сотрудниками Лаборатории звездной спектроскопии САО. Для привязки по длинам волн использовался спектр торий-аргоновой лампы. В результате имели выходные файлы спектров в формате 'длина волны'-'сигнал'.

1.3. Сравнительный анализ наблюдательного материала

Поскольку наблюдения звезд, включенных в программу, проводились на разных инструментах, то для дальнейшей работы с данными необходимо удостовериться в однородности получаемых спектров. С этой целью на обоих телескопах были проведены наблюдения красного гиганта $\beta \text{ Gem}$ (K0IIIb), который часто используют в качестве звезды сравнения, и измерены эквивалентные ширины одних и тех же линии. На рис.1.1 показано сравнение полученных эквивалентных ширин по наблюдениям на ЗТШ и БТА. Из

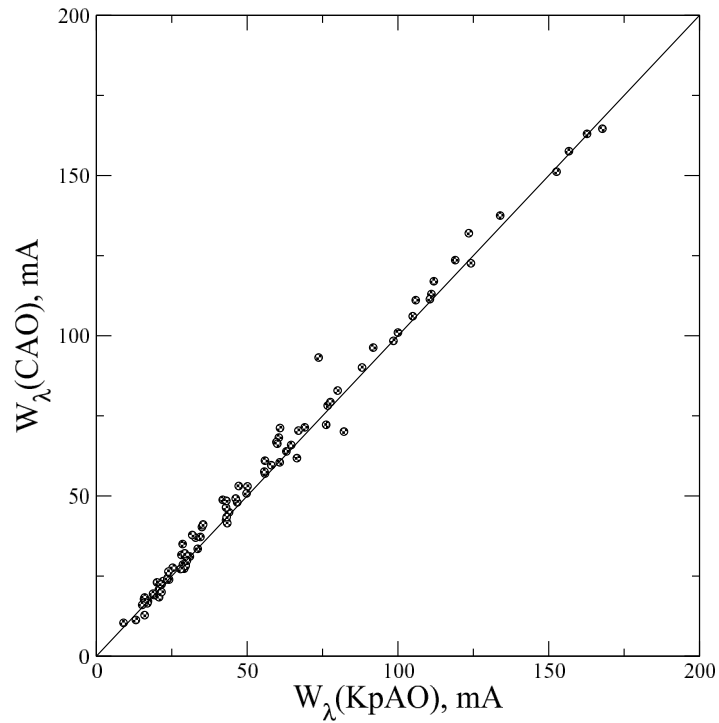


Рис. 1.1: Сравнение эквивалентных ширин спектральных линии, полученных на спектрографах ЗТШ КрАО и БТА САО

рисунка видно, что между двумя наборами данных нет систематических различий, а разброс точек не превышает нескольких миллиангстрем, что находится в пределах точности измерения. Таким образом можно заключить, что химический состав звезд, спектры которых получены на этих двух инструментах, не должен содержать систематических различий, что дает возможность проводить их дальнейший сравнительный анализ.

1.4. Обработка наблюдений

Дальнейшая обработка спектров проводилась с помощью пакетов программ, разработанных в КрАО, и включала в себя:

- **приведение спектра к лабораторным длинам волн;** для этого использовались заранее отобранные опорные чистые спек-

тральные линии с хорошо известными длинами волн

- **проведение уровня непрерывного спектра** проводилось по заранее выбранным точкам, где континуум менее всего искажен спектральными линиями; в качестве опорного материала использовались регистрограммы фотографических спектров красных гигантов, полученных на ЗТШ, протяженность которых была порядка 1000\AA , что позволяет уверенно провести на них уровень непрерывного спектра;
- **нормализацию спектра** - деление уровня наблюдаемого спектра на уровень непрерывного спектра
- **отождествление спектральных линии и измерение их эквивалентных ширин**, которое проводилось с помощью программы EW, разработанной в КрАО и позволяющей аппроксимировать профиль линий функцией распределения Гаусса и определять таким образом её эквивалентную ширину W_λ ; кроме того программа вычисляет остаточную интенсивность R_c в центре каждой линии, что позволяет построить в рамках этой программы калибровочную кривую " W_λ - R_c ", по которой можно определить W_λ по R_c в случае, когда профиль линии искажен блендированием крыльев линии, а центральная глубина остается чистой. Достоинством этой программы является еще и возможность определения полуширины линий, что позволяет отбросить довольно широкие линии, искаженные блендой.

1.5. Резюме

Для решения задач Диссертации был получен спектральный материал с высоким разрешением и отношением сигнала к шуму $S/N \approx 100 - 300$. Он включает в себя 23 звезды, из них 16 классических бариевых, 5 умеренных бариевых и 2 нормальных красных гиганта. Так как этот материал был получен на двух инструментах, то был выполнен сравнительный анализ спектрограмм одной звезды (β Gem), который показал возможность дальнейшего совместного использования всего спектрального материала.

2. Методика определения химического состава атмосфер исследуемых звезд

2.1. Основные положения в методике определения химического состава звездных атмосфер

Анализ звездных спектров позволяет получить информацию о физических условиях звездных атмосфер и их химическом составе. При этом наблюдаемые данные (непрерывный спектр, эквивалентные ширины и профили спектральных линий) сопоставляются с расчетными, полученными в рамках применяемой теории строения звездных атмосфер.

В Диссертации параметры атмосферы - температура, ускорение силы тяжести, скорость микротурбулентции, а также содержания химических элементов определены методом моделей атмосфер. Анализ проводится при допущении выполнения условия локального термодинамического равновесия (ЛТР).

Для расчета моделей звездных атмосфер использовалась программа Куруца ATLAS9 [49], созданная для расчета ЛТР моделей, в которой учтена усовершенствованная теория конвекции [42].

Достоинством моделей атмосфер Куруца является учет покровного эффекта, обусловленного большим количеством спектральных линий, за счет применения OPDF - табулированных интегральных функции непрозрачности.

Вычисления моделей были проведены на персональном компьютере под операционной системой Linux. В результате была рас-

считана сетка моделей звездных атмосфер для красных гигантов с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0, -0.2$ и -0.5 . Сетка покрывает область температур от 3500 К до 8000 К с шагом 100 К и область логарифма ускорения силы тяжести от 0.0 до 4.0 с шагом 0.25.

Для каждой звезды из данной сетки моделей выбиралась такая, которая наилучшим образом описывала наблюдаемый спектр.

Признаками правильно выбранной модели являются: одинаковые содержания, вычисленные для линий нейтральных и ионизованных атомов одного элемента (ионизационное равновесие, описываемое формулой Саха); одинаковые содержания, вычисленные для линий с разными потенциалами возбуждения одного элемента (больцмановское распределение электронов по атомным уровням)

Как было отмечено выше, при анализе допускалось выполнение условий ЛТР. Поэтому для определения содержаний химических элементов выбирались относительно слабые линии ($W_\lambda < 100$ мÅ), которые образуются в сравнительно глубоких слоях звездной атмосферы, где процессы возбуждения и ионизации определяются столкновительными процессами. Если атмосфера звезды не имеет внешних факторов воздействия (близкий горячий спутник, сильное влияние хромосферы и др.) или внутренних (более мощный поток УФ излучения в малометаллических звездах и др.), нарушающих ЛТР и вызывающих заметную переионизацию вещества или существенно нарушающих распределение электронов по атомным уровням, то это допущение о выполнении условий ЛТР вполне оправдано.

Отбор относительно слабых линий позволяет также избавиться от неопределенности в содержаниях химических элементов,

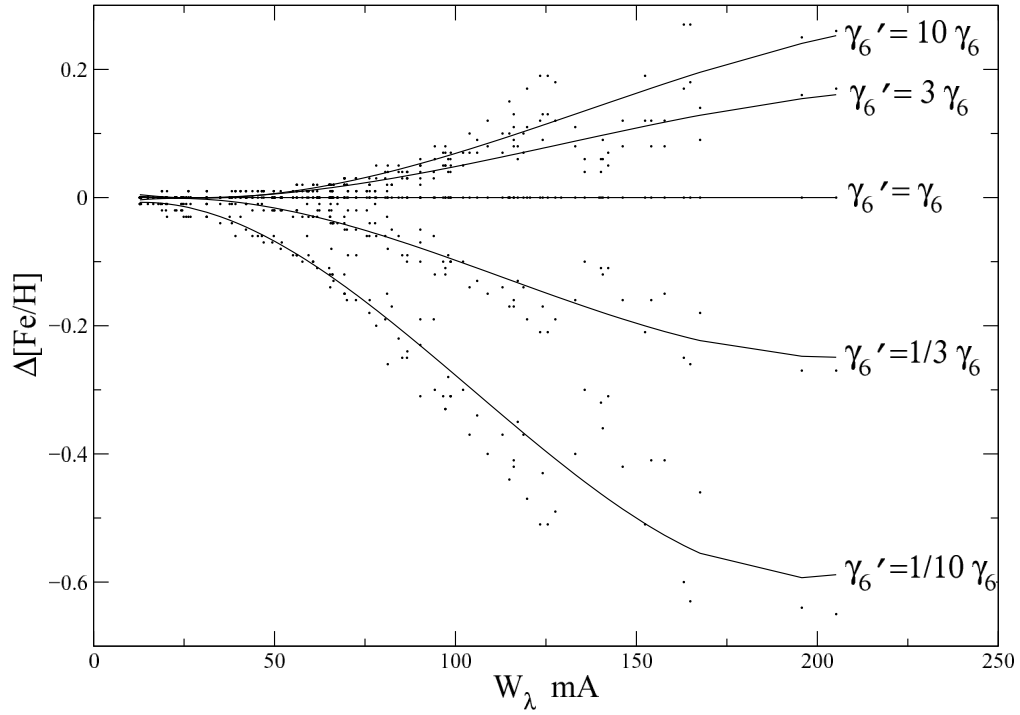


Рис. 2.1: Возможные ошибки в определении содержания железа (для звезды HD 133208) из-за неопределенностей в коэффициентах уширения Ван-дер-Ваальса (при уменьшении и увеличении их в 3 раза и 10 раз)

связанной с неточностью применяемых коэффициентов уширения Ван-дер-Ваальса γ_6 (чаще полуэмпирических). На рис. 2.1 представлены изменения содержания железа для линий разной интенсивности в умеренной бариевой звезде HD 133208 при уменьшении и увеличении в 3 раза и в 10 раз коэффициентов уширения Ван-дер-Ваальса. Из рисунка видно, что для определения содержания железа с точностью 0.10 dex выбор линий с $W_\lambda < 100 \text{ mÅ}$ позволяет иметь неопределенности в γ_6 от 1/3 и до 10 раз.

2.2. Выбор Солнца в качестве звезды сравнения

При исследовании содержаний химических элементов в атмосферах различных звезд в качестве звезды сравнения часто выби-

рают Солнце. Это ближайшая к нам звезда, и параметры ее атмосферы известны с большой точностью: эффективная температура $T_{\text{эфф}} = 5777$ К - по солнечной постоянной и значение ускорения силы тяжести на поверхности Солнца $\lg g = 4.44$ - выведенное на основании анализа движения Земли и других планет вокруг Солнца.

При исследовании содержаний химических элементов звездных атмосфер относительно Солнца применяют два подхода: либо сравнивают средние значения содержаний, полученные по всем линиям данного элемента, со средним значением содержания элемента на Солнце; либо применяют дифференциальный анализ, находя разность содержаний, вычисленной по каждой спектральной линии для звезды и Солнца, а затем усредняя полученные данные по каждому элементу. Эта процедура компенсирует неточности сил осцилляторов для отдельных линий (если анализ проводится в единой системе сил осцилляторов) и увеличивает точность определения содержаний химических элементов.

В связи с этим большую важность приобретает вопрос о том, в рамках какой модели солнечной атмосферы были определены солнечные содержания, используемые как стандартные.

Хорошо известно [50], что модели солнечной атмосферы, рассчитанные при стандартных условиях классического моделирования (одномерная и стационарная атмосфера, гидродинамическое и лучистое равновесие), не воспроизводят удовлетворительно наблюдаемый спектр Солнца. Ситуацию улучшают так называемые полуэмпирические модели, при построении которых распределение температуры в атмосфере подбиралось таким образом, чтобы оптимально воспроизвести весь набор наблюдаемых данных. Сре-

ди них следует отметить модель Холвегера-Мюллер [51] (HOLMU), а также еще две - Гарвард-Смитсоновскую модель (HSRA) [52] и модель Вернацци-Аврета-Лузера (VAL) [53] - которые являются не-ЛТР-моделями. Остановимся несколько более подробно на модели (HOLMU). Для ее построения в [51] из фотоэлектрического атласа Солнца были с большой тщательностью выбраны 900 чистых спектральных линий, принадлежащих 31 различным атомам и ионам; модель солнечной атмосферы и нижней части хромосферы (до $\tau = 10^{-6}$) строилась так, чтобы при допущении условий ЛТР она способна воспроизводить непрерывный спектр и профили выбранных спектральных линий как в центре диска Солнца, так и с учетом их изменений при переходе к его краю; было показано, что построенная модель при условии ЛТР полностью достаточна для интерпретации профилей всех выбранных линий, которые образуются в слоях атмосферы глубже $\tau = 10^{-6}$ за исключением резонансных, где наблюдаемые центральные глубины превышают вычисленные; отмечается также, что температура возбуждения всего на 50 К ниже кинетической температуры и что отмеченные отклонения являются несущественными для определения содержаний химических элементов. Сравнительные исследования различных солнечных моделей, выполненные другими авторами [50, 54, 55], подтвердили, что модель HOLMU при ЛТР-расчетах намного лучше, чем другие модели объясняет поведение линий металлов и их ионов и может быть рекомендована [50, 56] как лучшая модель фотосферы из использующихся для исследования содержания химических элементов по фраунгоферовым линиям. Согласно этим рекомендациям, в настоящее время при получении новых экспериментальных значений сил осцилляторов тех или иных химических

элементов или их ионов солнечные содержания по ним определяются при использовании именно модели HOLMU. Именно такие значения содержаний и приводятся в качестве фотосферных содержаний в появляющихся периодически компиляциях Гревесса (см., например, [56, 57]) которые широко используются как стандартные.

Имея в виду все вышесказанное, надежность используемых нами значений сил осцилляторов используемых в анализе спектральных линий, была проверена путем вычисления на их основании солнечных содержаний в рамках модели HOLMU [41], которое показало хорошее согласие полученных нами солнечных содержаний с общепринятыми значениями [56, 57].

Однако, если Солнце выбрано в качестве звезды сравнения при дифференциальном анализе звездных атмосфер, вопрос о выборе модели атмосферы Солнца вновь становится актуальным. Дело в том, что, как известно, разные модели солнечной атмосферы при одних и тех же исходных данных (эквивалентных ширинах линий, значениях их сил осцилляторов и т.п.) дают заметно различающиеся значения содержаний химических элементов. Поэтому, проводя анализ звезд в рамках какой-либо сетки моделей атмосфер (например, Белл и др. [58] или Куруц [59]), вообще говоря нельзя быть уверенным в корректности использования стандартных содержаний, полученных с помощью модели HOLMU, как бы хорошо она не описывала солнечный спектр. Модели, содержащиеся в [58] и [59], являются образцами классического моделирования, в то время как HOLMU - полуэмпирическая модель с искусственно измененным распределением температуры. В данном случае для сравнительного анализа логичнее получить данные о содержаниях

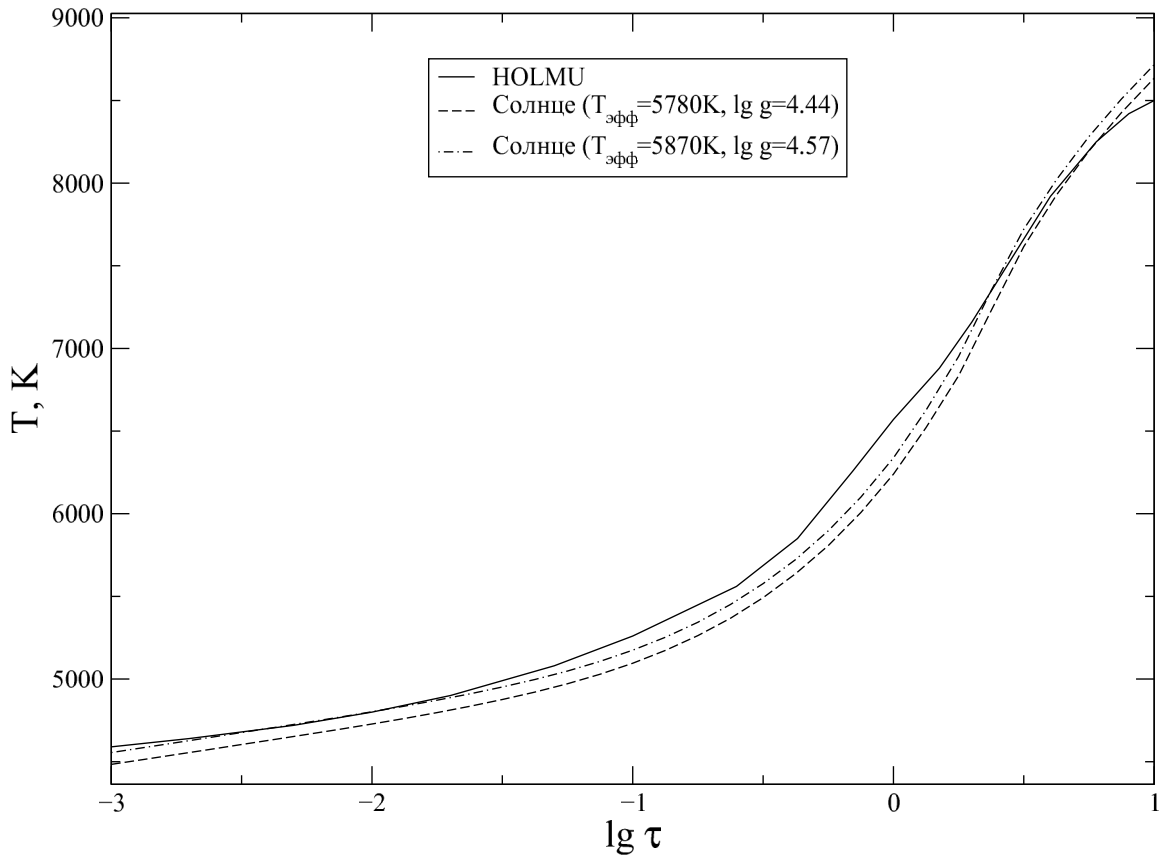


Рис. 2.2: Распределение температуры в солнечной модели Холвегера-Мюллер и двух моделях Куруца

химических элементов в атмосферах и звездах, и Солнца в рамках одной сетки моделей, чтобы особенности их строения одинаковым образом отразились на выведенных результатах.

В сетках моделей [58, 59] имеются вычисленные автором модели, соответствующие солнечным параметрам: эффективной температуре $T_{\text{эфф}} = 5770$ К и $\lg g = 4.44$. В работе [41], посвященной исследованию Солнца как звезды сравнения, было показано, что, солнечные содержания, полученные в рамках этих моделей, показывают большую дисперсию значений; не совпадают значения содержаний, определенные по линиям ионов и нейтральных атомов; отмечены также различные уровни металличности (см. рис.3 в [41]). Там же показано, что наблюдаемые расхождения не могут

быть отнесены за счет неверно выбранных значений эквивалентных ширин, сил осцилляторов и т.п., поскольку эти же исходные значения в рамках модели HOLMU дают содержания, хорошо согласующиеся с общепринятыми (см. рис.2 в [41]). И, наконец, там же было показано, что в каждой из сеток моделей [58, 59] можно найти такую модель, в рамках которых вычисленные содержания лишены указанных выше недостатков (см. рис.5 в [41]). В разделе 2.3.2 описан такой способ нахождения спектроскопических параметров атмосферы звезды, который использовался в анализе всех звезд данной работы. Этот метод позволяет найти в сетке моделей такую, при которой содержания какого-либо химического элемента, вычисленные по линиям с разными потенциалами возбуждения, равны (выполняется уравнение Больцмана), а также содержания, вычисленные по линиям нейтральных элементов и ионизированных, равны (выполняется условие ионизационного равновесия Саха). Этот же метод, примененный к Солнечному спектру дал следующие значения параметров атмосферы для него: $T_{\text{эфф}} = 5887$ К и $\lg g = 4.57$ [41]. Отметим, что эффективная температура более чем на 100 К выше общепринятой эффективной температуры Солнца, причем это значительно больше возможных ошибок. На рис. 2.2 показаны распределения температуры в атмосфере Солнца в различных моделях. Видно, что используемая нами модель Куруца ближе всего к распределению температуры в наилучшей для Солнца модели HOLMU.

В данной работе исследование содержаний химических элементов выполнено методом дифференциального анализа в рамках одной сетки моделей атмосфер как для звезд, так и для Солнца, и по одной методике, что повышает точность определения содержа-

ний.

2.3. Определение параметров модели звездной атмосферы

2.3.1. Определение микротурбулентной скорости

Движение атомов, которые участвуют в образовании спектральной линии, оказывают влияние на ее профиль. Атомы, движущиеся в одном направлении со скоростью v вдоль луча зрения, приводят к сдвигу линии, согласно закону Доплера

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

. Хаотическое движение атомов будет расширять линию. Различают два вида таких движений: тепловое и турбулентное.

Тепловое движение, при котором средняя скорость атомов определяется формулой

$$v_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

, где k - постоянная Больцмана, m - масса атома. Полуширины спектральных линий

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

, образованных в таких условиях, не являются одинаковыми и зависят от атомной массы атомов, их образующих.

Природа турбулентного движения ещё до конца не понята. Согласно современным представлениям, крупномасштабное конвективное движение газа сопровождается турбулентными вихрями. В результате в атмосфере звезды имеются ячейки различных размеров. Движение атомов внутри них будет вызывать расширение спектральной линии, которое в отличие от теплового движе-

ния не зависит от атомного веса, и считается одинаковым для линии всех элементов (при химической однородности). Если размер такой ячейки велик по сравнению с длиной свободного пробега фотона, то такое явление называют макротурбулентностью. При этом уширение спектральной линии будет увеличивать полуширину её профиля, но её интенсивность останется неизменной. В другом случае, когда размер турбулентной ячейки меньше длины свободного пробега фотона, наблюдаем явление микротурбулентности, при котором изменяется не только профиль линии, но и её эквивалентная ширина. Полуширина спектральной линии будет определяться скоростью $v = \sqrt{v_0^2 + \xi^2}$, где ξ - микротурбулентная скорость, и вычисляется по формуле

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m} + \xi^2}$$

Из всех этих факторов, влияющих на спектральные линии, при определении параметров и химического состава звездных атмосфер методом анализа эквивалентных ширин, нам необходимо знать только микротурбулентную скорость ξ , так как макротурбулентность не изменяет эквивалентных ширин линии, а тепловая скорость вычисляется по выше приведенной формуле.

Как было отмечено, скорость микротурбулентности не зависит от атомного веса, поэтому ее определяют по линиям одного элемента, представленного в спектре многочисленными линиями разной интенсивности. Как правило, таким элементом является FeI. Условием правильного выбора величины ξ является одинаковое содержание, получаемое по линиям разной интенсивности. С помощью выбранной модели атмосферы вычисляются содержания FeI для каждой линии для нескольких значений ξ . Далее строятся графики $\epsilon(FeI) = f(W_\lambda)$ и, используя линейную аппроксимацию

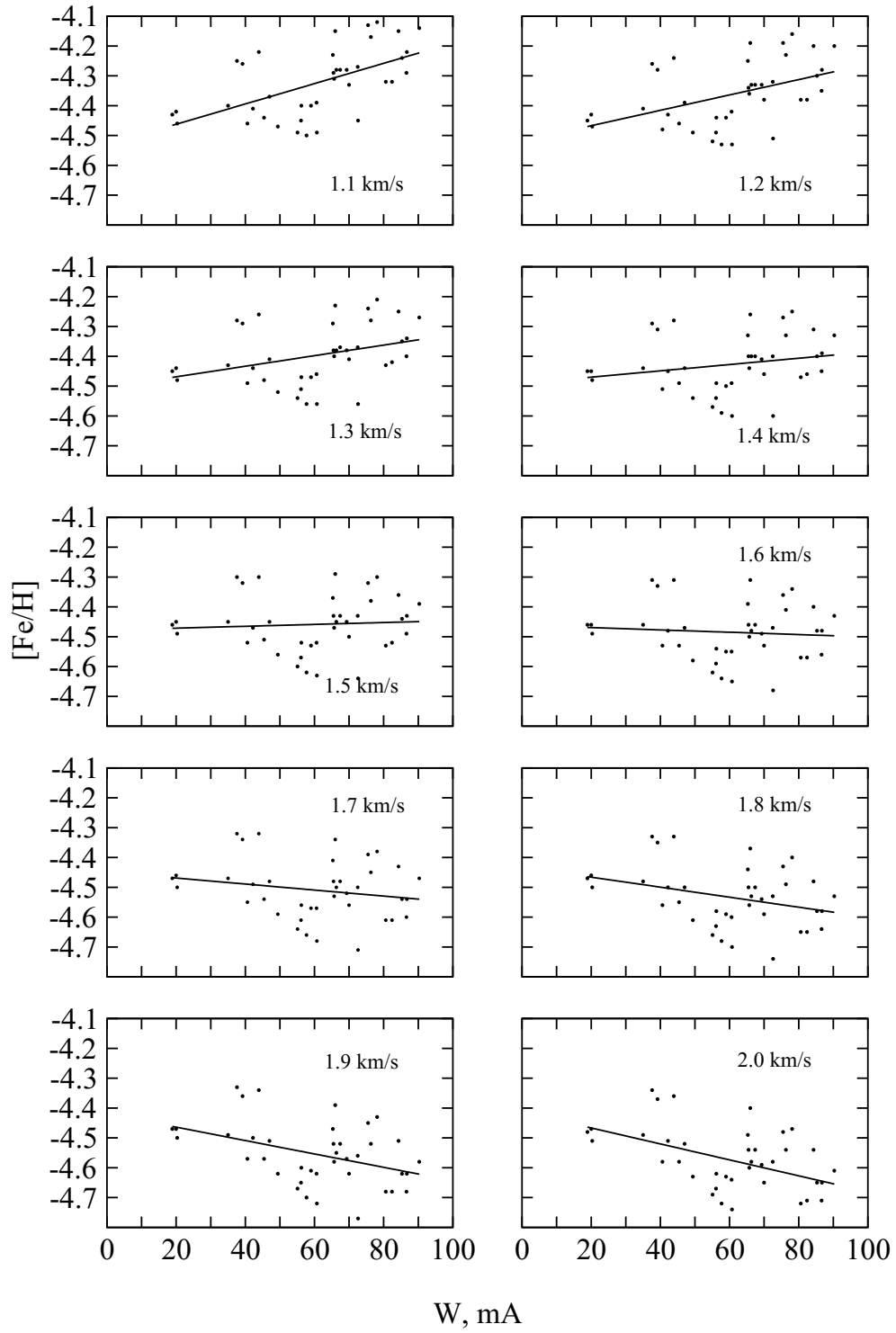


Рис. 2.3: Зависимость содержания FeI от эквивалентных ширин линии для различных значений микротурбулентной скорости ξ (на примере звезды HD133208)

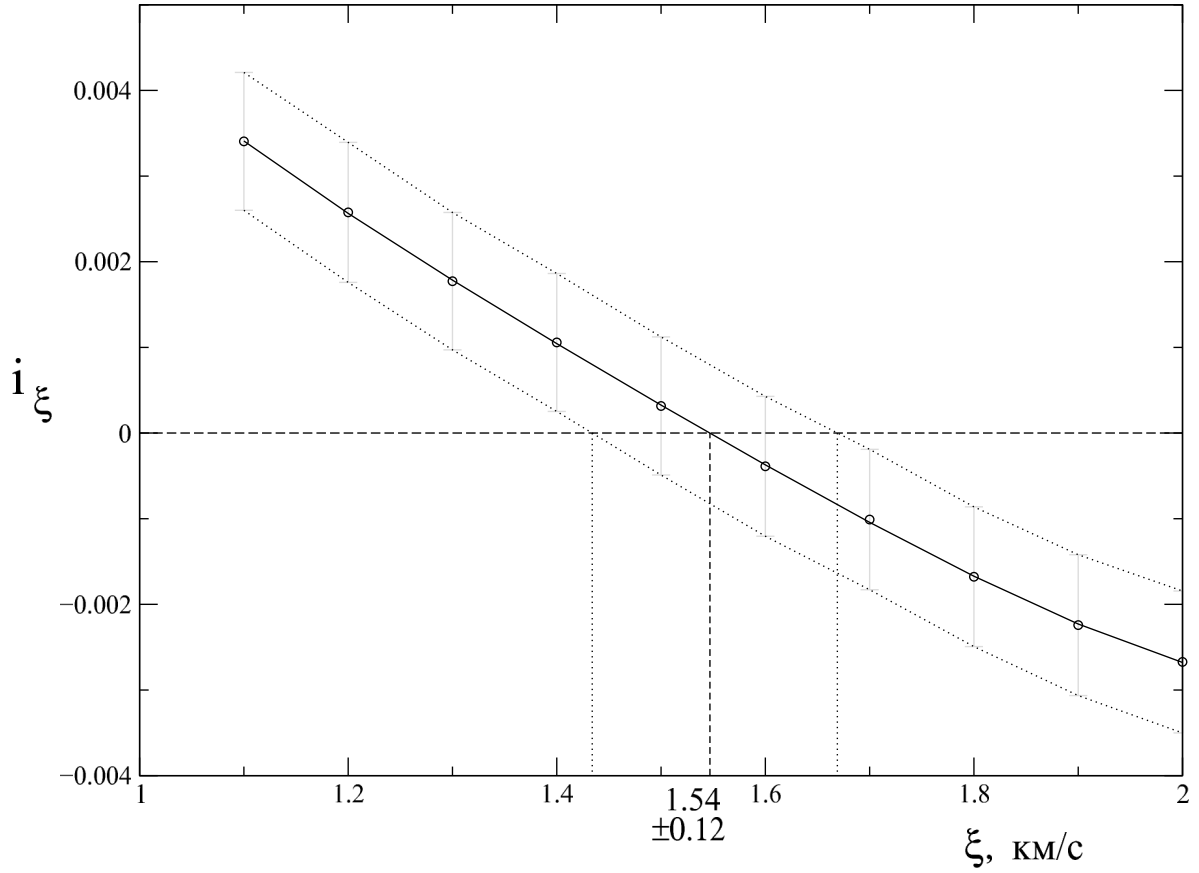


Рис. 2.4: Определение микротурбулентной скорости (на примере звезды HD133208)

данной зависимости, находим ее наклон i_ξ для ряда значений микротурбулентной скорости ξ (рис. 2.3).

Полученные данные о зависимости наклона от ξ , которая является монотонной функцией, хорошо аппроксимируются полиномом второй или третьей степени, по которому находим координату пересечения этой функции с осью абсцисс рис. 2.4. В результате получим искомую величину ξ .

Ошибка в определении ξ вычисляется по формуле

$$\Delta \xi = \frac{d \xi}{d i_\xi} \Delta i_\xi$$

где Δi_ξ - средняя ошибка определения величины i_ξ , и обычно составляет 0.10-0.15 км/с.

Определенные таким образом значения микротурбулентной скорости для всех исследованных звезд приведены в табл. 3.1 и 4.1.

2.3.2. Определение температуры и ускорения силы тяжести

Современный анализ химического состава звезд осуществляется с использованием моделей звездных атмосфер. Моделирование звездных атмосфер имеет своей целью описать спектр излучения звезды не только в континууме, но и в линиях. Точность определения химического состава исследуемой звезды будет определяться тем, насколько хорошо выбранная модель атмосферы будет описывать физические условия в атмосфере данной звезды.

К настоящему времени разными авторами рассчитано довольно много сеток моделей атмосфер для различных групп объектов, различных диапазонов атмосферных параметров, при условии выполнения ЛТР и без него и т.д.

При спектроскопическом анализе спектра звезды из сетки моделей необходимо выбрать наиболее подходящую, для чего надо знать основные параметры атмосферы этой звезды: её эффективную температуру $T_{\text{эфф}}$ и ускорение силы тяжести $\lg g$.

Для ряда звезд эти параметры могут быть определены из наблюдательных данных без привлечения анализа с помощью моделей звездных атмосфер. Так для некоторых звезд значения их эффективных температур выводятся на основе наблюдений покрытия звезд Луной и из интерферометрических наблюдений. Эти значения являются наиболее точными определениями эффективных температур и используются для построения многочисленных калибровок "цвет-эффективная температура". На основании этих

калибровок можно оценить температуры звезд, для которых имеются измерения соответствующих показателей цвета. Ускорение силы тяжести на поверхности звезды может быть рассчитано, если известен её параллакс. К сожалению, число звезд, параметры атмосфер которых можно определить такими независимыми от анализа атмосфер методами, невелико. Для остальных звезд, как правило достаточно слабых, оценки $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$ так или иначе связаны с расчетами с применением моделей атмосфер (такие параметры атмосферы, выведенные на основе анализа спектра звезды методом моделей звездных атмосфер, называют спектроскопическими). Часто они оказываются единственными доступными оценками атмосферных параметров, хотя следует заметить, что в ряде случаев такие спектроскопические оценки параметров атмосферы используют для уточнения их значений, полученных другими методами.

Поскольку главной задачей проведенного исследования является получение данных о содержаниях химических элементов в атмосферах бариевых звезд и сравнение их с соответствующими данными для нормальных красных гигантов, то в целях однородности сравниваемого материала необходимо, чтобы они были получены одним методом. Поэтому в данной работе параметры атмосфер всех исследуемых звезд были определены из анализа спектра звезды, подробно описанным в работах [40,41], и применённым для исследования нормальных красных гигантов и Солнца как звезды сравнения.

Суть этого метода состоит в следующем. Согласно современным представлениям теории звездной эволюции, относительные содержания элементов железной группы не меняются во время

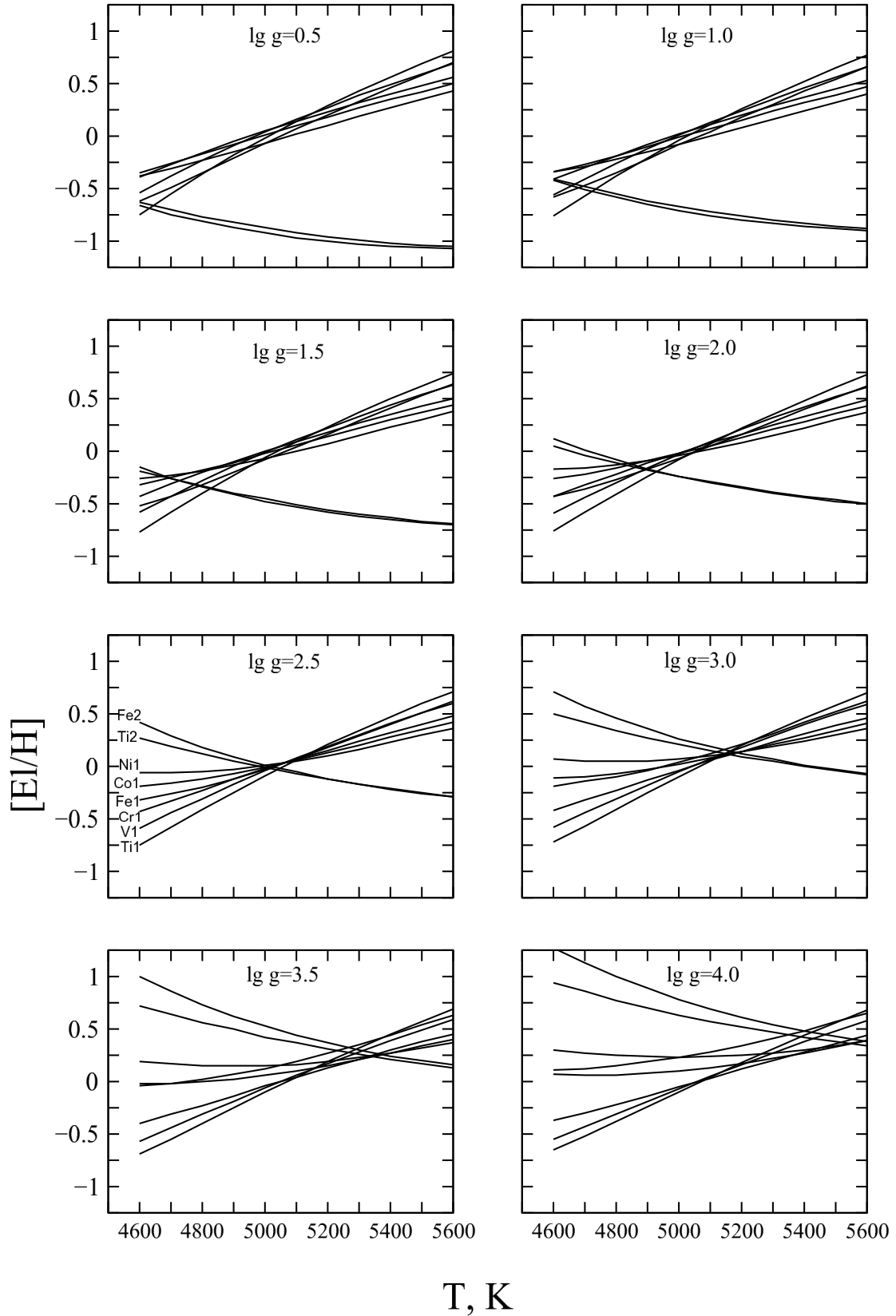


Рис. 2.5: Зависимости содержания нейтральных и ионизованных атомов группы железа от $T_{\text{эфф}}$ для различных значений $\lg g$ (на примере звезды HD133208)

жизни звезды на стадиях главной последовательности и гигантов, откуда следует, что содержание каждого элемента этой группы в атмосфере гиганта по отношению к содержанию его на Солнце должны быть одинаковы и отражать металличность звезды. Поэтому для оценки атмосферных параметров для каждой звезды на основании измеренных эквивалентных ширин проводились расчеты содержаний химических элементов группы железа (Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni) при различных параметрах $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$, близких к ожидаемым (например из спектрального класса и светимости, из показателей цвета, из литературы и т.д.). Полученные результаты анализировались с целью определения таких параметров атмосферы, при которых разброс относительных содержаний элементов группы железа был бы минимальным. Как показано в работах [40,41], в рамках каждой сетки моделей всегда удастся найти такую модель, которая наилучшим образом описывает наблюдаемый спектр, т.е. получаемые содержания химических элементов имеют наименьший разброс, совпадают содержания, полученные по линиям нейтральных атомов и ионов, отсутствует систематический ход содержаний с изменением потенциала возбуждения.

Здесь пример такого анализа показан для звезды HD133208. На рис. 2.5 представлены содержания элементов группы железа относительно их содержаний на Солнце, рассчитанные для различных значений параметров атмосферы. Из рисунка видно, что для каждого значения $\lg g$ имеется соответствующее значение $T_{\text{эфф}}$, при котором разброс относительных значений рассматриваемых элементов минимален - это самое узкое место графика, причем, его ширина Δ разная для разных значений $\lg g$. В результате для каждого значения $\lg g$ из сетки моделей имеем две функции $T_{\text{эфф}}(\lg g)$

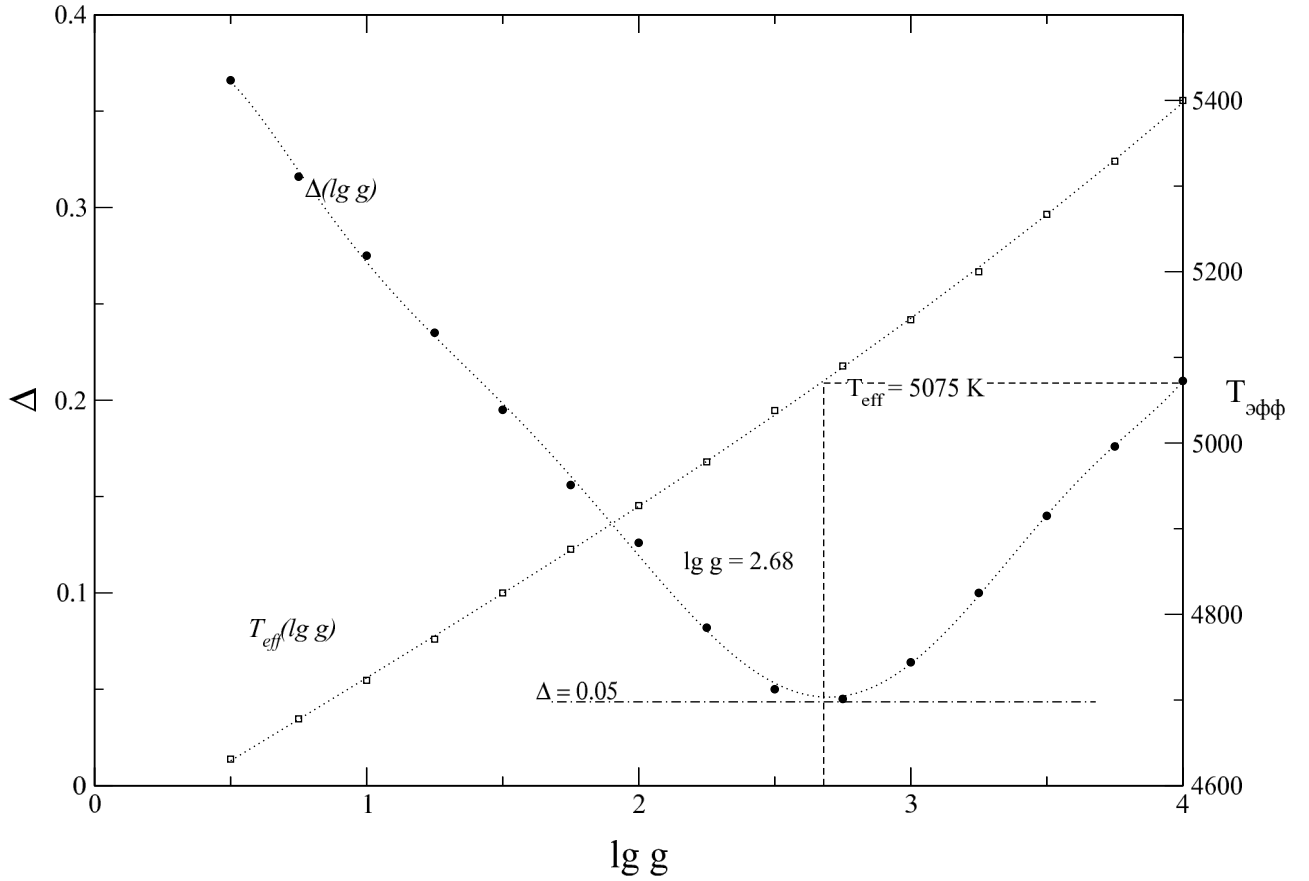


Рис. 2.6: Определение $T_{\text{эфф}}$, $\lg g$ и ошибки в металличности (на примере звезды HD133208)

и $\Delta(\lg g)$. Первая представляет собой монотонно возрастающую функцию, аппроксимация которой полиномом второй или третьей степени дает очень хорошее приближение. Вторая функция имеет вид гиперболы с ветвями, направленными вверх. Координаты её минимального значения дадут искомую величину силы тяжести $\lg g$ и среднюю ошибку определения металличности. Зная величину $\lg g$, из первой функции находим $T_{\text{эфф}}$. Как следует из рис. 2.5, для звезды HD133208 это $T_{\text{эфф}} = 5075 \text{ K}$, $\lg g = 2.68$.

Далее по программе ATLAS9 вычислялась модель, соответствующая найденным параметрам, которая использовалась для

уточнения микротурбулентной скорости ξ . Окончательным шагом является определение с помощью программы WIDTH9 содержаний всех элементов в атмосфере рассматриваемой звезды на основе измеренных по спектрограммам эквивалентных ширин. Эта программа во входном файле требует список спектральных линий с их атомными данными и эквивалентными ширинами, значение микротурбулентной скорости и файл с вычисленной моделью атмосферы. На выходе программа дает список линий, для каждой из которых приведено вычисленное содержание элемента, а также для каждого элемента усредненное содержание и дополнительную информацию.

2.4. Оценки неопределенностей в вычислении содержаний химических элементов

Для оценки достоверности полученных результатов работы рассмотрим несколько факторов, влияющих на точность определения содержаний химических элементов.

2.4.1. Ошибки, обусловленные неточностью принятых значений параметров модели звездной атмосферы

Для оценки относительной внутренней точности в содержаниях химических элементов были выполнены расчеты химического состава для одной из исследуемых звезд HD 16458 ($T_{\text{эфф}} = 4560$ К, $\lg g = 1.73$, $\xi = 1.53$ км/с) при измененных отдельных параметрах ($\Delta T_{\text{эфф}} = \pm 100$ К, $\Delta \lg g = \pm 0.1$ dex, $\Delta \xi = \pm 0.1$ км/с). Полученные разности в содержаниях отражены в табл. 2.1. А на рис. 2.7 в качестве примера показаны изменения содержаний химических

Таблица 2.1: Изменения в содержаниях атомов при изменении параметров звездной атмосферы для звезды HD16458

Элемент	Кол-во линии	$\Delta[El]$ dex		
		$\Delta T_{\text{эфф}}=\pm 100$ K	$\Delta \lg g=\pm 0.1$ dex	$\Delta \xi=\pm 0.1$ км/с
Na I	5	0.08	0.00	0.03
Mg I	1	0.06	0.00	0.05
Al I	1	0.07	0.01	0.01
Si I	8	0.03	0.02	0.02
Ca I	7	0.10	0.01	0.05
Sc I	6	0.15	0.00	0.02
Sc II	5	0.02	0.04	0.04
Ti I	24	0.15	0.00	0.02
Ti II	6	0.01	0.05	0.05
V I	10	0.17	0.00	0.02
V II	3	0.05	0.05	0.01
Cr I	13	0.11	0.00	0.02
Cr II	1	0.09	0.03	0.04
Mn I	4	0.07	0.00	0.03
Fe I	76	0.05	0.01	0.04
Fe II	5	0.10	0.05	0.04
Co I	5	0.07	0.02	0.03
Ni I	22	0.02	0.02	0.03
Zn I	1	0.04	0.03	0.05
Sr I	1	0.10	0.01	0.03
Y I	2	0.19	0.00	0.05
Y II	6	0.01	0.04	0.07
Zr I	12	0.19	0.00	0.04
Zr II	3	0.01	0.05	0.07
Mo I	5	0.15	0.00	0.06
Ru I	5	0.14	0.01	0.02
Ba II	1	0.02	0.02	0.03
La II	4	0.02	0.04	0.11
Ce II	11	0.01	0.04	0.06
Pr II	8	0.01	0.04	0.05
Nd II	31	0.01	0.04	0.08
Sm II	5	0.03	0.05	0.04
Eu II	1	0.01	0.05	0.01

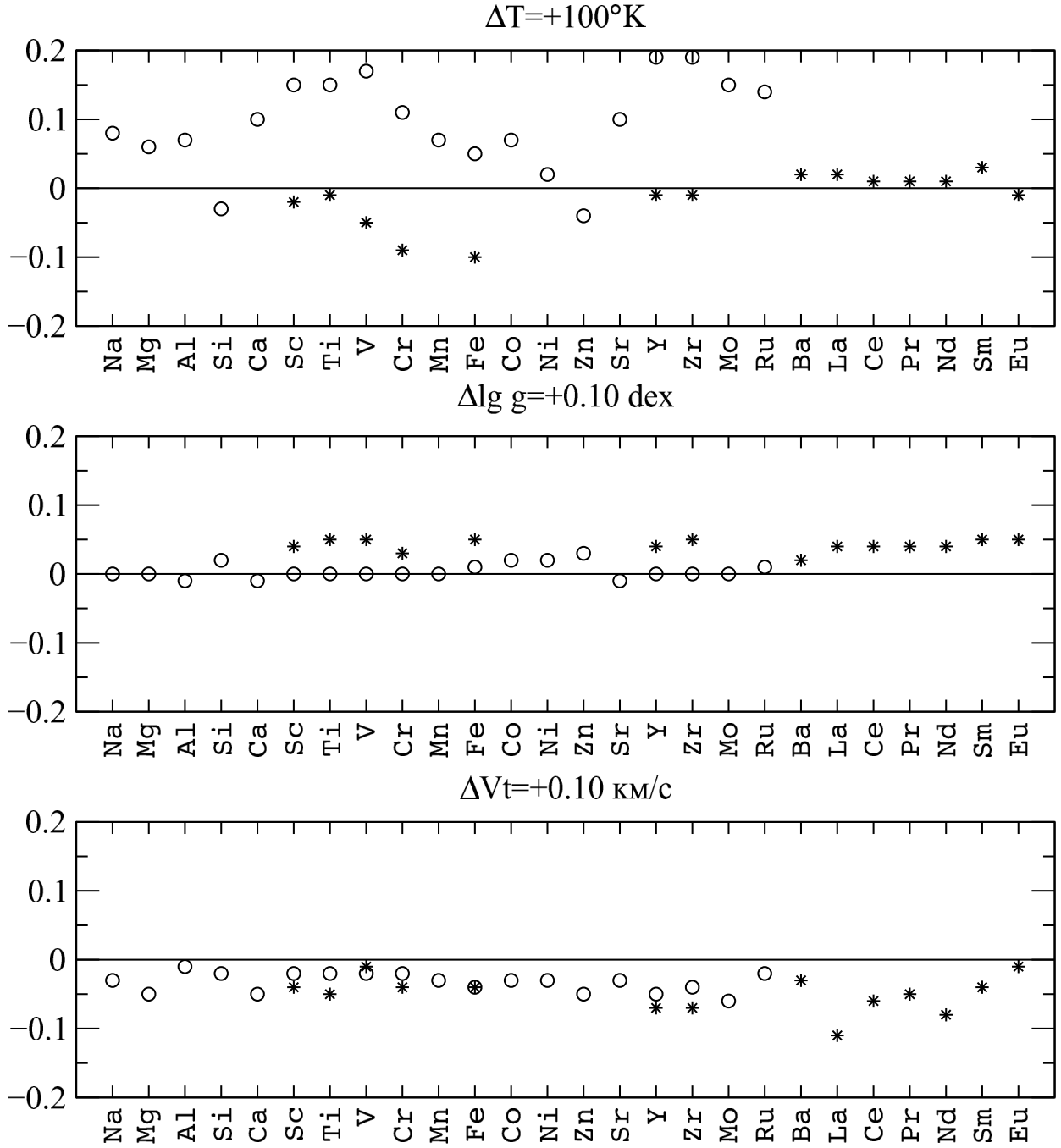


Рис. 2.7: Изменения в содержаниях химических элементов при изменении параметров звездной атмосферы (HD 16458)

элементов для некоторых изменений параметров. Из таблицы и рисунка следует, что увеличение

температуры на 100 К - приводит к завышению в среднем на 0.10 dex содержаний нейтральных атомов и к занижению содержаний ионизованных атомов в среднем на 0.01 dex, кроме s-элементов; вследствие чего разница между ними для элементов железной группы достигает 0.20 dex;

ускорения силы тяжести на 0.1 dex - в среднем практически не изменяет содержаний нейтральных атомов и приводит к завышению примерно на 0.04 dex содержаний всех ионизованных атомов;

микротурбулентной скорости на 0.1 км/с - приводит к уменьшению содержаний как нейтральных атомов (в среднем на 0.03), так и ионизованных атомов (в среднем на 0.05)

2.4.2. Влияние выбора модели конвекции

В настоящей работе исследование химического состава звезд было выполнено методом моделей атмосфер, вычисленных по программе Куруца ATLAS9 [49]. Существуют модели атмосфер, вычисленные специально для холодных звезд [58,60]. Однако, предпочтение было отдано именно программе ATLAS9, доступность которой позволяла самостоятельно вычислять любую модель и избежать применяемого часто процесса интерполяции моделей, что вносит неточность, величину которой определить трудно.

Существует ряд модификаций программы ATLAS9. Дело в том, что в литературе имеется критика описания конвекции в моделях Куруца, и поэтому в разное время были предложены различ-

ные способы ее улучшения. Представление о конвекции в настоящее время еще достаточно грубо. Обычно звездные атмосферы описываются одномерными гидростатическими конфигурациями, где перенос конвективной энергии вычисляется из так называемой теории длины перемешивания (ТДП) [61]. Эта теория предполагает, что конвективными элементами являются поднимающиеся и опускающиеся пузыри. Пузыри диаметра l проходят расстояние l , когда часть их энергии излучается, и затем опускаются вниз (l - шкала перемешивания). Отношение шкалы перемешивания к шкале высот $\alpha = l/h$ обычно допускается постоянным. Характерными являются значения от 1 до 2. В программе ATLAS9 принято значение $\alpha = 1.25$. Ряд модификаций программы ATLAS9 включает в себя различные параметры α . Другие - включение или не включение в расчет атмосферы "овершутинга- [62] (*overshooting* (англ. "прострел") - означает проникновение конвекционных пузырей в фотосферу звезды, что приводит к некоторому дополнительному ее нагреву). Третьи используют комбинации этих факторов. И все эти попытки построить такую модель атмосферы, которая бы правильно описывала все наблюдения звезды - распределение энергии в спектре, показатели цвета, крылья водородных линий, спектральные линии металлов - пока не дали удовлетворительных результатов. И поиски решения этой проблемы продолжаются. В частности, была разработана более совершенная теория конвекции [42]. Она введена в одну из модификаций ATLAS9 вместо ТДП.

В представленной работе анализ спектров звезд был выполнен на основе моделей звездных атмосфер, рассчитанных с помощью модификации программы ATLAS9, в которой конвекция описывается в рамках теории [42] и без включения "овершутинга".

Таблица 2.2: Распределение температуры в атмосфере Солнца
($T_{\text{эфф}}=5780$ К, $\lg g=4.44$) для различных значений параметра α ТДП

$\lg \tau_R$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.25$	$\alpha=2.00$	τ_R	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.25$	$\alpha=2.00$
-6.875	3706.1	3706.5	3707.9	-2.375	4635.5	4636.1	4637.6
-6.75	3730.6	3731.0	3732.4	-2.25	4664.7	4665.3	4666.8
-6.625	3753.2	3753.6	3754.9	-2.125	4694.3	4694.9	4696.5
-6.5	3777.3	3777.7	3778.9	-2	4725.2	4725.8	4727.4
-6.375	3802.7	3803.1	3804.4	-1.875	4757.5	4758.1	4759.8
-6.25	3829.1	3829.5	3830.8	-1.75	4791.7	4792.4	4794.0
-6.125	3854.6	3855.0	3856.3	-1.625	4828.4	4829.1	4830.8
-6	3879.5	3879.9	3881.2	-1.5	4868.4	4869.0	4870.8
-5.875	3903.8	3904.2	3905.5	-1.375	4912.6	4913.3	4915.1
-5.75	3927.6	3928.0	3929.4	-1.25	4962.4	4963.2	4965.1
-5.625	3951.3	3951.7	3953.0	-1.125	5019.3	5020.1	5022.1
-5.5	3974.8	3975.2	3976.6	-1	5086.9	5087.7	5089.9
-5.375	3998.4	3998.8	4000.2	-0.875	5164.3	5165.2	5167.5
-5.25	4021.8	4022.2	4023.6	-0.75	5254.7	5255.7	5258.2
-5.125	4044.9	4045.3	4046.7	-0.625	5359.9	5361.0	5363.9
-5	4067.9	4068.4	4069.7	-0.5	5484.6	5486.0	5489.5
-4.875	4091.0	4091.4	4092.8	-0.375	5630.4	5632.1	5636.1
-4.75	4114.7	4115.2	4116.5	-0.25	5800.3	5802.4	5808.3
-4.625	4138.8	4139.2	4140.6	-0.125	6000.1	6003.5	6010.0
-4.5	4163.2	4163.6	4165.0	0	6233.3	6236.9	6256.4
-4.375	4188.5	4189.0	4190.3	0.125	6505.8	6519.8	6554.4
-4.25	4214.3	4214.8	4216.1	0.25	6818.9	6834.5	6894.0
-4.125	4240.6	4241.0	4242.4	0.375	7183.0	7229.6	7214.5
-4	4267.3	4267.8	4269.1	0.5	7592.8	7615.6	7483.3
-3.875	4294.7	4295.1	4296.5	0.625	8073.8	7925.0	7731.6
-3.75	4322.7	4323.1	4324.5	0.75	8560.2	8192.8	7943.8
-3.625	4350.7	4351.2	4352.5	0.875	8959.7	8423.8	8150.7
-3.5	4379.1	4379.6	4380.9	1	9240.1	8631.7	8331.4
-3.375	4407.6	4408.1	4409.4	1.125	9513.7	8827.4	8517.4
-3.25	4436.1	4436.6	4438.0	1.25	9719.4	9007.2	8681.2
-3.125	4464.5	4465.0	4466.4	1.375	9952.2	9188.2	8857.9
-3	4492.8	4493.3	4494.7	1.5	10131.4	9355.1	9013.5
-2.875	4521.4	4521.9	4523.4	1.625	10352.5	9532.0	9186.4
-2.75	4549.9	4550.4	4551.8	1.75	10526.6	9694.4	9338.9
-2.625	4578.2	4578.7	4580.2	1.875	10743.5	9873.1	9510.9
-2.5	4606.8	4607.4	4608.9	2	10928.8	10035.4	9664.5

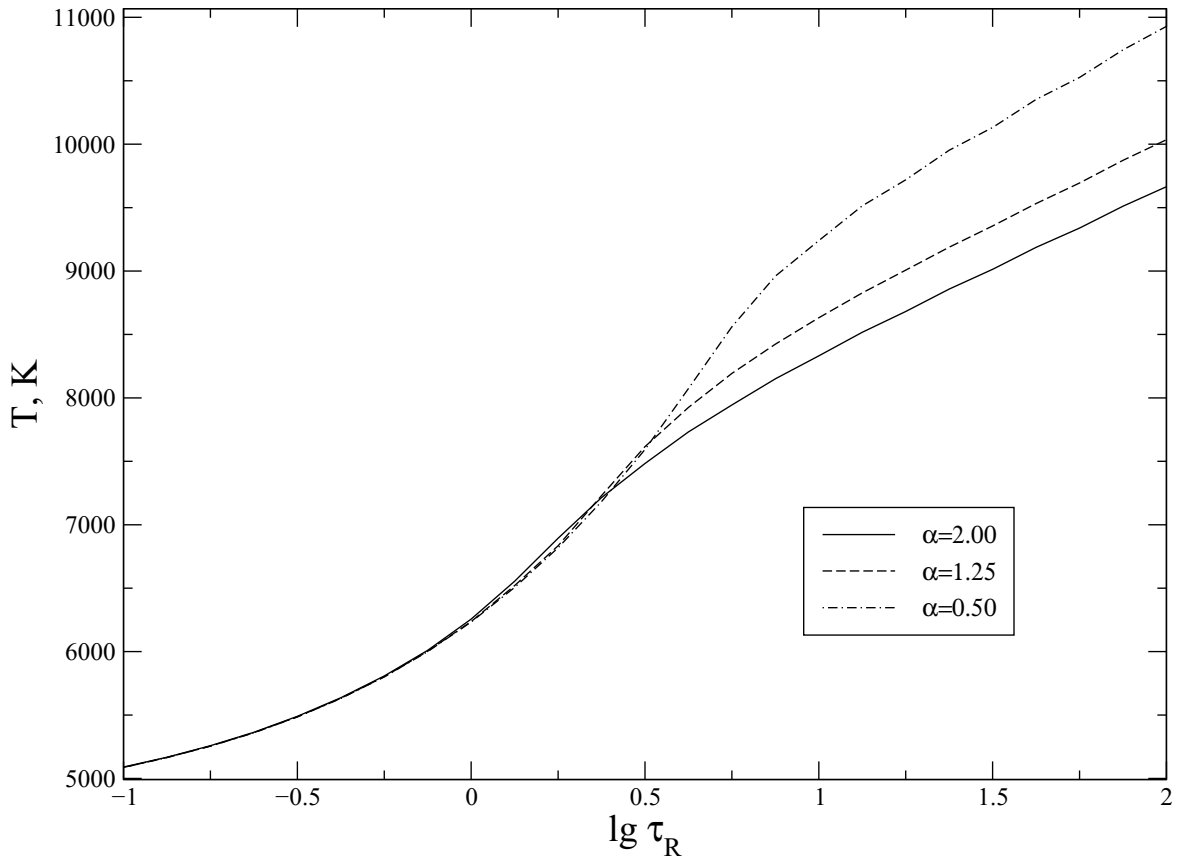


Рис. 2.8: Распределение температуры в атмосфере Солнца ($T_{\text{эфф}}=5780$ K, $\lg g=4.44$) для различных значений параметра α ТДП

В последнее время появился ряд работ, в которых попытки согласовать теоретические показатели цвета с наблюдаемыми привели к выводу, что последние сильнее реагируют на величину длины перемешивания, чем на разновидность используемой теории конвекции, причем найдено, что это согласие лучше при меньшем значении длины перемешивания, а именно при $\alpha = 0.5$ [63,64]. Аналогичный вывод сделан при сравнении наблюдаемых и теоретических крыльев водородных линий H_α и H_β [65]. Поэтому представляет интерес проверить влияет ли выбор фактора перемешивания α на содержания металлов, вычисляемых по наблюдаемым эквивалентным ширинам.

Для решения этой задачи было выбрано Солнце, которое ис-

Таблица 2.3: Содержания химических элементов в атмосфере Солнца ($T_{\text{эфф}}=5780$ К, $\lg g=4.44$) для различных значений параметра α ТДП

Элемент	число линий	$\alpha=0.50$	$\alpha=1.25$	$\alpha=2.00$
Al I	2	-5.67	-5.67	-5.67
Ba II	3	-9.74	-9.75	-9.75
C I	2	-3.26	-3.26	-3.25
Ca I	22	-5.82	-5.83	-5.82
Ce II	8	-10.46	-10.46	-10.45
Co I	53	-7.22	-7.22	-7.21
Cr I	89	-6.42	-6.42	-6.42
Cr II	15	-6.26	-6.26	-6.25
Cu I	2	-8.43	-8.43	-8.43
Er II	1	-10.42	-10.42	-10.42
Eu II	8	-11.31	-11.31	-11.31
Fe I	219	-4.60	-4.60	-4.60
Fe II	41	-4.41	-4.41	-4.40
La II	6	-10.82	-10.82	-10.82
Li I	1	-11.25	-11.25	-11.25
Mg I	4	-4.51	-4.51	-4.51
Mn I	26	-6.46	-6.46	-6.45
Mo I	1	-10.03	-10.03	-10.03
Na I	2	-5.76	-5.77	-5.77
Nd II	25	-10.64	-10.64	-10.64
Ni I	149	-5.80	-5.80	-5.80
O I	1	-2.83	-2.81	-2.78
Pr II	5	-11.33	-11.34	-11.33
Sc I	13	-9.10	-9.10	-9.10
Sc II	20	-8.87	-8.87	-8.87
Si I	31	-4.48	-4.48	-4.48
Si II	1	-3.99	-4.00	-3.99
Ti I	125	-7.13	-7.13	-7.13
Ti II	30	-6.94	-6.94	-6.94
V I	58	-8.11	-8.11	-8.11
V II	12	-7.98	-7.98	-7.97
Y I	14	-9.93	-9.93	-9.92
Y II	41	-9.74	-9.74	-9.74
Zr I	30	-9.61	-9.61	-9.61
Zr II	26	-9.48	-9.48	-9.47

пользовано в качестве звезды сравнения и для которого параметры атмосферы - $T_{\text{эфф}} = 5780$ К и $\lg g = 4.44$ - известны с большой точностью. По модификации программы ATLAS9, включающей в себя ТДП и без "овершутинга" были вычислены модели атмосферы Солнца для нескольких значений параметра α . В табл. 2.2 и на рис. 2.8 для сравнения приведены температуры вычисленных моделей как функции оптической толщи τ_R (в шкале Росселанда [49]). Из рисунка видно, что температуры моделей для разных α под фотосферой ($\tau_R > 1$, $\lg \tau_R > 0$) заметно различаются, зато в области образования линий поглощения ($\tau_R < 1$, $\lg \tau_R < 0$) это расхождение практически отсутствует. Вычисления содержаний химических элементов, выполненные при использовании вычисленных моделей атмосфер приведены в табл. 2.3, из которой видно, что различия в содержаниях при значениях $\alpha = 0.50, 1.25, 2.00$ практически отсутствуют.

Таким образом, можно сделать вывод, что

- варьирование величины α не изменяет результаты определения химического состава звезд;
- выбором соответствующей величины α невозможно решить проблему расхождения содержаний химических элементов, вычисленных по линиям нейтральных элементов и их ионов, в рамках моделей Куруца для действительных солнечных параметров, что было отмечено в предыдущем разделе.

2.4.3. Влияние сверхтонкого расщепления спектральных линий

Как известно, уровни энергии электронов в атомах с нечетной массой ядра имеют сверхтонкое расщепление из-за взаимодей-

ствия магнитных моментов ядра и электрона. Для s-элементов, чьи линии усилены в бариевых звездах, неучет сверхтонкого расщепления может привести к систематическому завышению оценок их содержания. Действительно, расщепление энергетических уровней приведет к соответствующему расщеплению линий на ряд смещенных компонентов, сложение которых (в случае достаточно большой оптической толщи в линиях) приведет к более высокому значению эквивалентной ширины, а в зависимости от картины расщепления - еще и к деформации профиля линии. Этот так называемый HFS-эффект (high fine structure) замечен в том случае, если номер элемента нечетный, а сама линия достаточно сильна. Последнее обстоятельство особо важно в классических бариевых звездах, где содержания s-элементов превышают солнечные содержания в отдельных случаях на 1.5 dex. При этом линии, слабые или вообще на грани обнаружения в спектре Солнца, в спектрах классических бариевых звезд оказываются довольно интенсивными. Примерами этого могут служить линии LaII в спектре звезды HD 199939 класса, эквивалентные ширины которых более 100 mÅ, полученное по ним содержание La в атмосфере звезды почти на полтора порядка выше солнечного. Заметим, что чистых слабых линий LaII в спектре звезды не найдено. В этой ситуации важно оценить величину возможного эффекта HFS.

Как было описано выше в разделе 1.4, эквивалентные ширины линий измерялись программой EW, которая также определяла и полуширину линии, что позволяло контролировать измерения и исключать из дальнейшего анализа широкие и искаженные линии.

Более подробно этот вопрос рассмотрен в разделе 4.1.5, посвященный анализу химического состава классических бариевых

звезд, где показано, что учет сверхтонкого расщепления несколько уменьшает содержания таких элементов, но не влияет на выводы, сделанные в Диссертации.

Изотопический сдвиг в данной работе не учитывался, оценки его свидетельствуют о том, что этот эффект также не скажется на выводах работы.

2.5. Резюме

Во второй Главе показано, что применение описанной методики, основанной на дифференциальном анализе химического состава, дает возможность минимизировать ошибки, связанные с неопределенностью в атомных данных, выбором модели конвекции и другие, и определить относительные содержания химических элементов с максимально возможной точностью.

3. Исследование умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов

3.1. Вычисление химического состава

В табл. 3.1 приведен список умеренных бариевых звезд, для которых в данной работе выполнено определение содержаний ряда химических элементов в их атмосферах. Кроме того, аналогичное исследование выполнено для двух нормальных красных гигантов, сведения о которых также указаны в табл. 3.1. Спектральный класс всех звезд указан в соответствии с [66]. Там же для каждой звезды приведены оценки параметров моделей атмосфер, полученные так, как это было описано в предыдущей Главе. Для каждой звезды была вычислена модель её атмосферы с соответствующими параметрами. Список спектральных линий, отобранных для исследования химического состава, соответствующие значения сил осцилляторов $lg gf$ и измеренные эквивалентные ширины W_λ доступны в электронном виде по адресу <ftp://ftp.inasan.rssi.ru/pakhomov/>. С помощью программы WIDTH9 были вычислены содержания химических элементов в атмосфере каждой звезды.

В табл. 3.2 представлены оценки содержаний 21 химических элементов в атмосферах исследованных звезд. Величина содержания $[El/H]$ определялась по формуле

$$[El/H] = lg \left(\frac{N(El)}{N(H)} \right)_* - lg \left(\frac{N(El)}{N(H)} \right)_\odot$$

на основании измеренных эквивалентных ширин по программе

Таблица 3.1: Список исследуемых умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов и принятые параметры моделей атмосфер

N	HD	Звезда	Спектр	T, K	lg g	ξ , км/с
Умеренные бариевые звезды						
1	49293	18 Mon	K0+IIIaBa0.2	4717	2.45	1.42
2	83618	ι Hya	K2.5III-IIIbBa0.3	4355	1.95	1.47
3	133208	β Boo	G8IIIaBa0.3	5075	2.68	1.54
4	158899	λ Her	K3.5IIIBa0.1	4180	1.57	1.34
5	176411	ϵ Aql	K1-IIIBa0.2	4691	2.35	1.39
Нормальные красные гиганты						
6	113226	ϵ Vir	G8IIIab	5187	3.20	1.41
7	153210	κ Oph	K2III	4593	2.52	1.14

WIDTH9 с помощью модели атмосферы, рассчитанной по программе ATLAS9 Куруца для соответствующих параметров атмосферы (табл.3.1). Указанные в табл. 3.2 значения содержаний определены как средние по значениям, полученным по отдельным линиям. Число использованных линий содержится в отдельной колонке для каждой звезды.

Согласно табл. 3.2, исследуемые звезды имеют различную металличность (среднее значение металличности определяется как среднее относительное содержание элементов группы железа). На рис. 3.1 приведены содержания различных элементов по отношению к металличности. Здесь открытыми кружками обозначены нейтральные элементы, звездочками - ионы. Для всех значений указаны области ошибок, определяемые как дисперсия средних значений содержаний. Отсутствие области ошибок означает, что содержание было определено по одной линии.

Из табл. 3.2 и рис. 3.1 следует, что для всех исследованных звезд содержания элементов Na, Al и Si в различной степени увеличены. Кроме того, в умеренных бариевых звездах содержания

Таблица 3.2: Содержания атомов в атмосферах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов относительно их содержаний на Солнце

Элемент	Умеренные бариевые красные гиганты										Нормальные красные гиганты			
	HD 49293		HD 83618		HD 133208		HD 158899		HD 176411		HD 113226		HD 153210	
	n	[El/H]	n	[El/H]	n	[El/H]	n	[El/H]	n	[El/H]	n	[El/H]	n	[El/H]
Na I	2	0.44±0.03	2	0.24±0.10	2	0.30±0.06	2	0.37±0.02	2	0.31±0.07	2	0.38±0.03	2	0.29±0.02
Mg I	4	0.27±0.10	1	0.19	2	0.21±0.04	1	0.43	2	0.19±0.08	2	0.25±0.04	2	0.40±0.06
Al I	2	0.25±0.03	2	0.04±0.05	2	0.19±0.03	1	0.14	1	0.36	2	0.31±0.07	1	0.32
Si I	11	0.17±0.08	10	0.06±0.08	14	0.14±0.06	7	0.22±0.13	6	0.13±0.09	20	0.24±0.06	14	0.21±0.11
Ca I	4	0.15±0.15	3	0.17±0.07	1	-0.08	2	-0.11±0.03	6	-0.08±0.07	5	0.27±0.11	3	0.12±0.06
Sc II	5	0.14±0.09	6	-0.07±0.07	6	0.08±0.09	6	-0.01±0.07	5	0.00±0.06	9	0.26±0.05	8	0.11±0.07
Ti I	28	0.01±0.08	25	-0.06±0.07	16	0.04±0.04	15	-0.11±0.12	17	-0.03±0.07	36	0.22±0.09	29	0.10±0.09
V I	6	0.10±0.07	7	-0.00±0.07	13	0.02±0.05	4	-0.08±0.04	6	-0.03±0.06	24	0.23±0.10	7	0.15±0.08
Cr I	20	0.04±0.09	16	-0.05±0.06	11	0.04±0.08	8	-0.09±0.10	5	-0.08±0.07	32	0.29±0.09	16	0.08±0.09
Cr II	4	0.09±0.06	3	0.02±0.08	6	0.02±0.05	1	-0.06	3	-0.04±0.03	8	0.28±0.05	3	0.14±0.03
Mn I	3	0.10±0.04	3	0.07±0.08	2	-0.12±0.01	2	-0.12±0.04	1	-0.01	4	0.26±0.08	–	–
Fe I	67	0.08±0.08	69	-0.06±0.10	40	0.07±0.09	43	0.00±0.16	52	-0.05±0.12	111	0.24±0.09	125	0.15±0.14
Fe II	6	0.05±0.09	8	-0.05±0.05	6	0.05±0.11	2	-0.11±0.06	6	-0.07±0.08	12	0.23±0.05	6	0.09±0.04
Co I	17	0.20±0.09	20	0.02±0.06	6	0.07±0.05	6	0.08±0.07	1	-0.01	22	0.27±0.11	11	0.18±0.08
Ni I	18	0.13±0.07	13	-0.09±0.10	17	0.05±0.06	16	-0.01±0.12	16	-0.05±0.11	38	0.19±0.10	25	0.16±0.08
Y II	6	0.29±0.06	3	-0.00±0.04	3	0.15±0.02	3	0.08±0.09	2	-0.14±0.05	5	0.32±0.03	4	-0.11±0.11
Zr II	2	0.30±0.04	–	–	1	0.45	1	0.10	–	–	2	0.44±0.03	–	–
Ba II	2	0.55±0.01	2	0.22±0.01	–	–	3	0.28±0.02	2	-0.01±0.01	2	0.26±0.05	3	0.21±0.13
La II	2	0.31±0.02	2	0.28±0.06	1	0.43	2	0.36±0.04	2	-0.13±0.01	2	0.23±0.01	3	0.13±0.10
Ce II	4	0.23±0.10	3	0.22±0.08	3	0.21±0.06	1	0.15	2	0.13±0.01	4	0.38±0.08	4	-0.02±0.04
Pr II	1	0.30	2	0.37±0.07	2	0.22±0.01	2	0.12±0.01	1	0.04	2	0.30±0.02	3	0.09±0.06
Nd II	7	0.27±0.07	5	0.17±0.06	4	0.22±0.09	4	0.23	3	0.09±0.03	7	0.32±0.05	9	0.01±0.06
Eu II	2	0.29±0.06	2	0.12±0.10	2	0.16±0.02	1	0.17	2	0.06±0.01	2	0.27±0.08	2	0.21±0.03

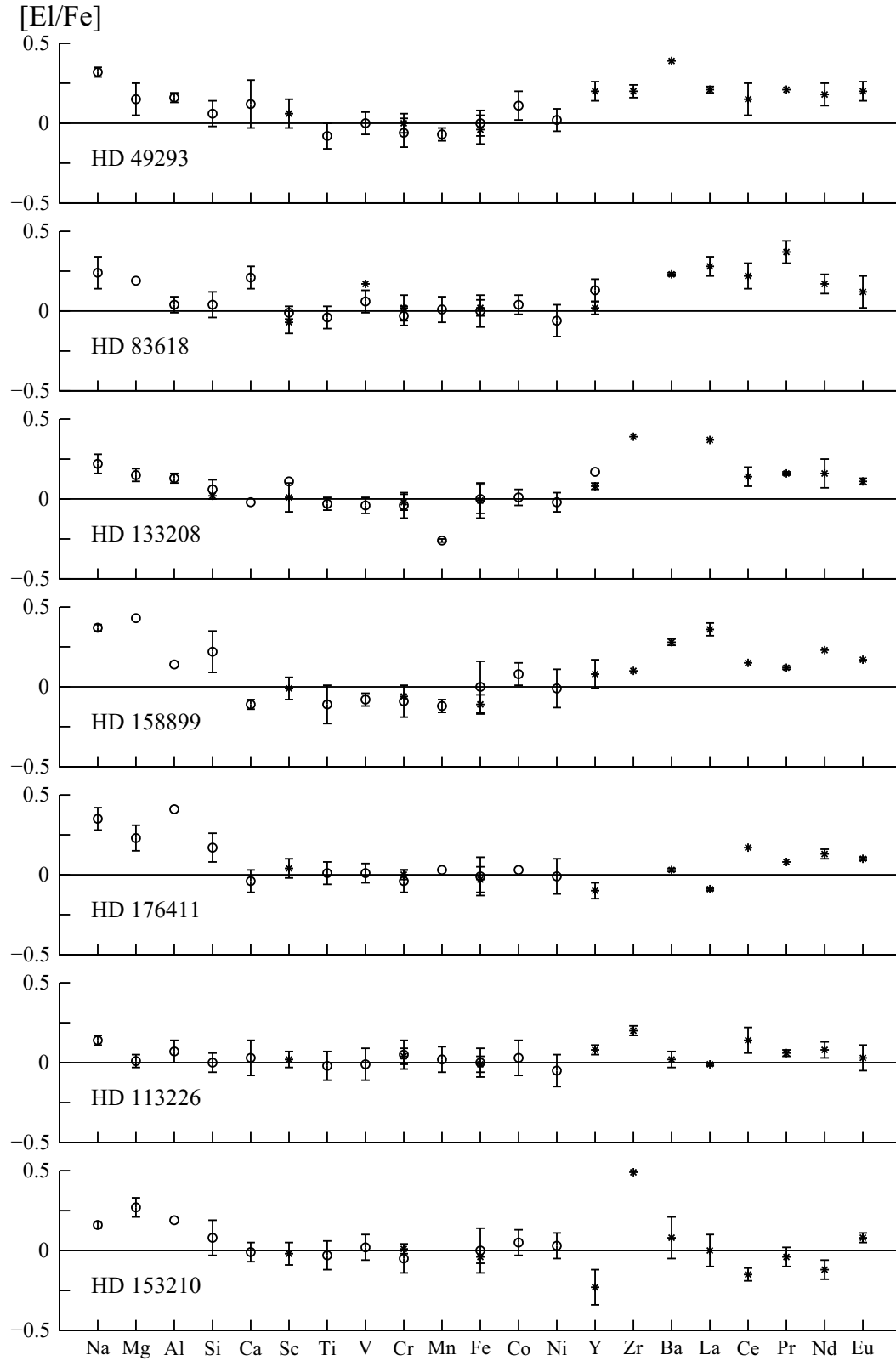


Рис. 3.1: Содержание химических элементов в спектрах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов

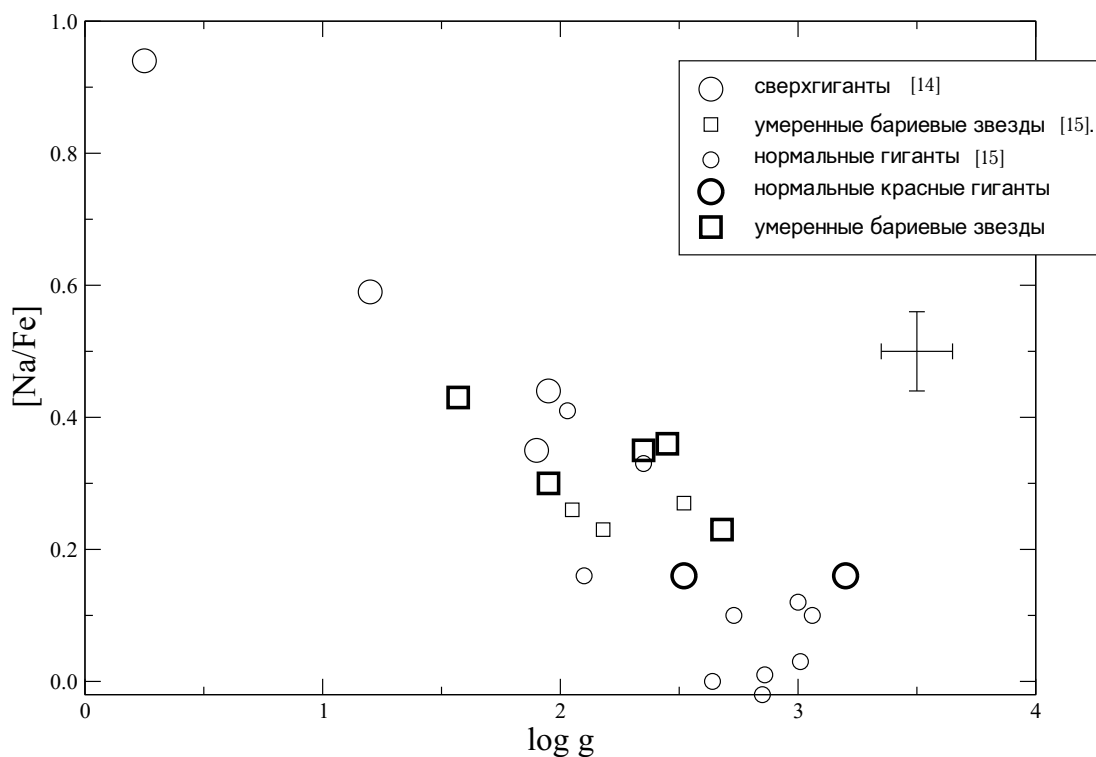


Рис. 3.2: Избыток величины отношения содержания натрия к содержанию железа в атмосферах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов по сравнению с аналогичной величиной для Солнца.

элементов s-процесса так же всегда выше, чем у нормальных красных гигантов. Проанализируем данные табл. 3.2.

3.2. Анализ содержаний некоторых химических элементов

3.2.1. Натрий

Избытки содержаний Na впервые были обнаружены у сверхгигантов класса F [12–14], и было показано, что величина избытка зависит от светимости звезды. Авторами была выдвинута гипотеза [14], что Na может образовываться в реакции $^{22}\text{Ne}(p, \gamma)^{23}\text{Na}$, которая входит в неоновый цикл горения водорода в ядрах звезд на стадии главной последовательности, и может быть вынесен в

атмосферу звезды конвекцией, развивающейся в ходе эволюции звезды от главной последовательности к стадии красного гиганта. Теоретические расчеты, выполненные в [16, 17] подтвердили справедливость этой гипотезы. Кроме того, в пользу ее свидетельствует и обнаруженная зависимость величин избытков Na от отношения изотопов $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ [16].

На рис. 3.2 представлена зависимость величины $[\text{Na}/\text{Fe}]$ от ускорения силы тяжести $\lg g$, построенная на основании данных табл. 3.2 и данных [15], в которой химический состав атмосфер ряда звезд был определен по такой же методике, как и в данной диссертации. Все точки на этом рисунке соответствуют результатам наблюдений на одном и том же телескопе - ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории. Заметим также, что для всех звезд содержания Na определялись по субординатным линиям $\lambda 6161\text{\AA}$ и $\lambda 6154\text{\AA}$. Специально проведенные исследования возможных отклонений от ЛТР [68, 69] показали, а более поздние [70, 71] подтвердили, что для этих линий неЛТР-эффекты малы. На рисунке более мелкие значки соответствуют звездам, на основании которых такая зависимость была построена в [15]; более крупные - звездам, исследованным в данной работе (табл. 3.2). Из рисунка 3.2 видно, что все они также показывают увеличение избытка натрия $[\text{Na}/\text{Fe}]$ с уменьшением $\lg g$. Кроме того, можно видеть, что умеренные бариевые звезды (пять из настоящей работы и три из [15]) хорошо лежат на зависимости, построенной для нормальных гигантов и сверхгигантов, что свидетельствует о том, что процессы производства Na в ядрах этих звезд и выноса его наружу не отличаются от аналогичных процессов у нормальных красных гигантов поля.

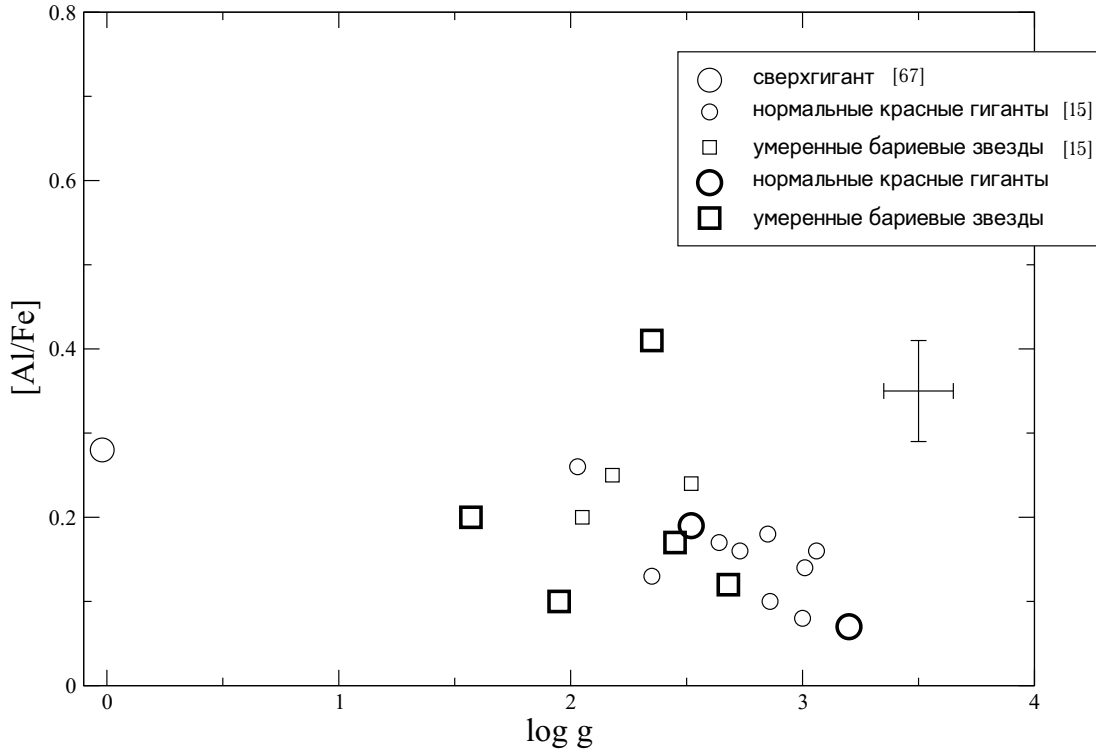


Рис. 3.3: Аналогично 3.2 для алюминия

3.2.2. Алюминий

В работе [15] было отмечено существование небольших избытков содержаний Al в атмосферах исследованных красных гигантов и построена зависимость их величин от ускорения силы тяжести $\lg g$, которая также как в случае Na, свидетельствует об увеличении избытков алюминия $[Al/Fe]$ с увеличением светимости звезды (то есть с уменьшением $\lg g$). На рис. 3.3, аналогично рис. 3.2, мелкими значками показана зависимость " $[Al/Fe]-\lg g$ ", построенная в [15] для красных гигантов, а крупными значками нанесены данные из табл. 3.2 для исследуемых звезд, также представлена одна точка, соответствующая значению $[Al/Fe]$ для сверхгиганта из [67]. Из рисунка видно, что зависимость эта является довольно слабой. Отметим, что алюминий не богат линиями,

достаточно интенсивными для проведения надежных измерений и имеющих уверенные измерения сил осцилляторов. Большая часть исследований содержания Al в звездах диска и гало Галактики выполнены на основании измерений резонансной линии $\lambda 3964^{\circ}\text{A}$. Однако, как показано в [72], у этой линии значительны эффекты отклонения от ЛТР. Все определения содержания Al, нанесенные на рис. 3.3, выполнены на основе наблюдений субординатных линий $\lambda 6696^{\circ}\text{A}$ и $\lambda 6698^{\circ}\text{A}$, для которых поправка к содержаниям за неЛТР-эффекты существенно меньше, чем для резонансных линий [72]. Следует заметить, что, согласно [72], для Al эта поправка всегда положительна, и величина ее увеличивается с уменьшением $\lg g$. Таким образом, введение поправок за отклонение от ЛТР должно несколько увеличить полученные значения $[\text{Al}/\text{Fe}]$ и тем больше, чем меньше величина $\lg g$. Поэтому можно заключить, что зависимость на рис. 3.3 при этом должна быть более четко выраженной. Из рисунка видно, что умеренные бариевые звезды хорошо соответствуют зависимости " $[\text{Al}/\text{Fe}]-\lg g$ ", построенной для нормальных красных гигантов. Поэтому вывод об одном и том же механизме возникновения избытков Al в атмосферах нормальных красных гигантов и умеренных бариевых звезд, аналогичный выводу при рассмотрении избытков Na, должен быть сделан и в данном случае.

В [15] было отмечено, что Al, возможно, образуется в MgAl-цикле горения водорода [73] на стадии главной последовательности и может быть также, как и Na, вынесен на поверхность звезды вследствие перемешивания при эволюции звезды в стадию красного гиганта.

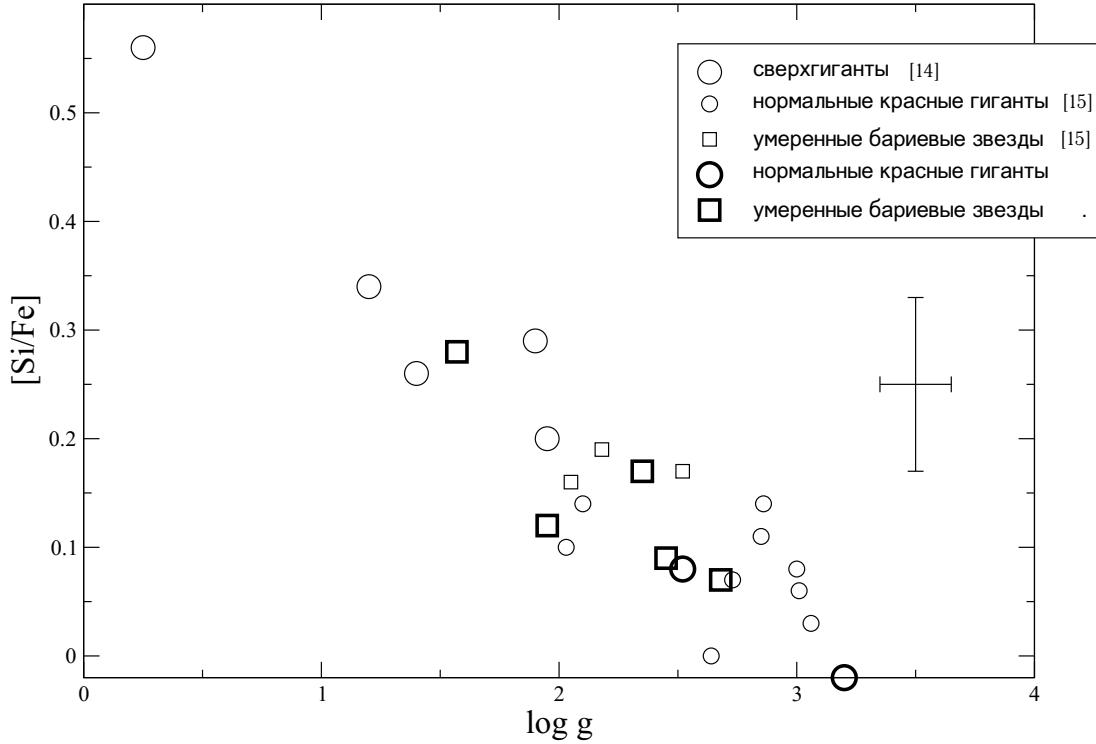


Рис. 3.4: Аналогично 3.2 для кремния

3.2.3. Кремний

На рис. 3.4 изображена зависимость " $[\text{Si}/\text{Fe}] - \lg g$ ", аналогичная построенным зависимостям для Na и Al (взятая из [15] с добавлением данных диссертации (табл. 3.2)). Все обозначения соответствуют обозначениям рис. 3.2. Из рисунка следует, что данные для сверхгигантов, нормальных красных гигантов и умеренных бариевых звезд, как и в случае Na, удовлетворяют одной зависимости. Расчет поправок за неЛТР-эффекты в литературе отсутствуют. Однако, заметим, что потенциалы возбуждения нижних уровней линий Si, используемых в нашем анализе, большие (более 5.5эВ), и, следовательно, эти линии образуются довольно глубоко в атмосфере звезды, где заселение энергетических уровней определяется столкновительными процессами (особенно это справедливо

для уровней, лежащих близко к ионизационному пределу). Поэтому больших отклонений от ЛТР ожидать не приходится. Таким образом существование этой зависимости можно считать реальным. Из рисунка видно, что умеренные бариевые звезды хорошо удовлетворяют зависимости для нормальных красных гигантов и сверхгигантов, что также свидетельствует о единой природе происхождения избытков кремния в этих звездах.

В работе [15] было высказано предположение, что выведенная из наблюдений зависимость "[Si/Fe]-lg g " может быть следствием реакции $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$, которая является реакцией утечки из MgAl-цикла горения водорода [74].

3.2.4. Некоторые итоги анализа содержаний Na, Al, Si

Рассмотрение избытков содержаний Na, Al, Si приводит к следующим общим выводам:

- умеренные бариевые звезды (пять из настоящей работы и три из [15]) хорошо соответствуют зависимостям, построенным для нормальных гигантов и сверхгигантов, что свидетельствует о том, что процессы производства Na, Al и Si в ядрах умеренных бариевых звезд и выноса их наружу не отличаются от аналогичных процессов в нормальных красных гигантах поля;
- как следует из табл. 3.1 и табл.1 из [15] величины lg g у умеренных бариевых звезд систематически ниже, чем у нормальных красных гигантов (для умеренных бариевых звезд среднее из 8 значений lg g = 2.22, а для нормальных красных гигантов среднее из 11 значений lg g = 2.67). То же можно ви-

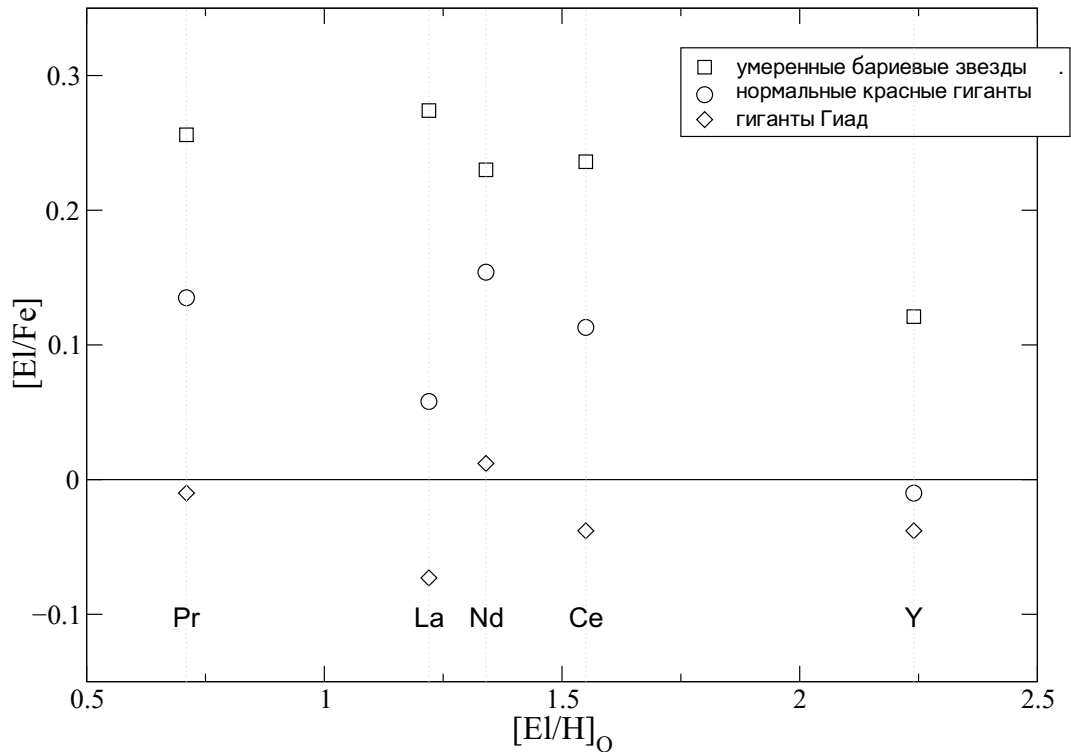


Рис. 3.5: Избыток величины отношения средних содержания элементов s-процесса к содержанию железа в атмосферах умеренных бариевых звезд, нормальных красных гигантов поля и гигантах звездного скопления Гиады в зависимости от их содержания на Солнце

деть и на соответствующих зависимостях " $[Элемент/Fe]-\lg g$ ": звезды обеих групп лежат на одной зависимости, а центр тяжести расположения группы умеренных бариевых звезд лежит на ней выше, чем центр тяжести расположения группы нормальных красных гигантов; иначе, их светимость в среднем слегка выше. Это может свидетельствовать об их более продвинутой фазе эволюции по сравнению с нормальными красными гигантами.

3.2.5. s-элементы

Из рис. 3.1 следует, что содержания s-элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд в среднем несколько выше, чем в

атмосфере Солнца, хотя и существует заметный разброс значений от звезды к звезде.

Интересно отметить, что выполненный по такой же методике анализ содержаний элементов в атмосферах нормальных красных гигантов различных групп в [15] показал, что небольшие избытки содержаний элементов s-процесса присущи не только умеренным бариевым звездам - они наблюдаются также у ряда нормальных красных гигантов звездного поля. Избытки содержаний s-элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд несколько превышают аналогичные величины для нормальных красных гигантов. Для анализа возможного происхождения избытков этих элементов в [15] был построен график зависимости величин избытков содержаний s-элементов от их содержаний на Солнце (стандартного содержания). Если эти избытки содержаний возникают в s-процессе, то при последовательном захвате нейтронов с последующим β -распадом относительные приращения должны быть больше у тех элементов, первоначальное содержание которых меньше, т.е. такой тренд качественно должен наблюдаться. Оказалось, что такая тенденция действительно существует.

В [15] были использованы данные только для трех умеренных бариевых звезд. Поэтому, поскольку вопрос существования s-процесса в недрах звезд малой светимости не является тривиальным, этот график здесь был уточнен добавлением еще пяти исследованных в диссертации умеренных бариевых звезд (см. рис 3.5). Здесь по оси ординат отложены усредненные величины избытков содержаний элементов s-процесса к содержанию железа в атмосферах восьми умеренных бариевых звезд (квадратики), одиннадцати нормальных красных гигантов поля (кружки) и, для сравне-

ния, трех красных гигантов молодого рассеянного звездного скопления Гиады (ромбики). По оси абсцисс - содержание s-элементов на Солнце. Рис. 3.5 подтверждает (см. рис.5 в [15]), что тенденция увеличения содержаний элементов с уменьшением их первоначального количества действительно существует как для умеренных бариевых звезд, так и для нормальных красных гигантов. Таким образом, можно заключить, что избытки содержаний рассматриваемых элементов в обеих группах звезд, по-видимому, обусловлены s-процессом, протекающем в недрах звезд на главной последовательности; они могут быть вынесены в атмосферу звезды конвекцией, развивающейся при переходе звезды в стадию красного гиганта. В связи с этим интересно отметить следующее: из рис. 3.5 видно, что гиганты рассеянного скопления Гиады не показывают никаких избытков s-элементов, нормальные гиганты поля имеют небольшие аномалии их содержаний, а наибольшие избытки s-элементов принадлежат умеренным бариевым звездам. По-видимому, обнаруженные отличия в содержаниях s-элементов связаны с разницей в возрастах этих групп звезд, и, как следствие, различной степенью развитости процессов конвективного перемешивания. У гигантов Гиад - очень молодого скопления, возраст которого составляет 0.1 возраста Солнца - конвекция еще не достигла слоев, где протекали реакции s-процесса, и перемешивание не успело обогатить атмосферу продуктами его деятельности. Нормальные красные гиганты поля старше по возрасту и демонстрируют обогащение атмосфер продуктами s-процесса в разной степени. Наибольшие избытки элементов s-процесса наблюдаются у умеренных бариевых звезд, что, вероятно, свидетельствует о более продвинутой фазе их эволюции по сравнению с нормаль-

ными красными гигантами и наиболее глубоким проникновении конвекции в недра звезды.

Заметим, что вывод о более продвинутой фазе эволюции звезд, классифицируемых как умеренные бариевые звезды, относительно нормальных красных гигантов полностью совпадает с выводом, сделанным при сравнительном анализе содержаний элементов Na, Al и Si в их атмосферах (в разделе 3.2.4).

Избытки содержаний s-элементов свидетельствуют о наличии заметного количества нейтронов. Обычно считается, что основными реакциями - поставщиками нейтронов являются реакции горения гелия, например, $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$, которые могут происходить при очень высоких температурах ($T \approx 2 \times 10^8$ K). Такие температуры реализуются в ядрах звезд, находящихся на асимптотической ветви гигантов. С этой точки зрения наблюдаемые избытки s-элементов, хотя и небольшие, требуют объяснения.

В работе [15] было высказано предположение, что заметную роль могут играть фотонейтронные реакции типа $^{13}\text{C}(\gamma, n)^{12}\text{C}$, $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ и др., которые протекают при более низких температурах ($T \approx 10^7$ - 10^8 K). Согласно [75], при протекании CNO-цикла горения водорода в недрах звезды на главной последовательности возникает большое количество энергичных гамма-квантов, способных выбить нейтрон из некоторых элементов или их изотопов. Этот источник нейтронов слаб и не может объяснить аномалии s-элементов, наблюдаемые у звезд асимптотической ветви гигантов, но, как отмечено в [75], он является вторым по интенсивности среди всех известных источников нейтронов и, возможно, мог бы объяснить небольшие аномалии элементов s-процесса, наблюдаемые у звезд, находящихся на стадии красного гиганта.

Выводы из анализа содержаний s-элементов

- Избыток в содержании элементов тяжелее железа в нормальных красных гигантах и в умеренных бариевых звездах имеет одну природу и обусловлен протеканием s-процесса в недрах звезд на стадии главной последовательности и, последующим выносом s-элементов в атмосферу конвективным перемешиванием на стадии красного гиганта.
- Более высокие содержания элементов s-процесса у умеренных бариевых звезд по сравнению с нормальными красными гигантами свидетельствует, вероятно, о более развитой конвекции у первых, а следовательно, о более продвинутой стадии их эволюции по сравнению со вторыми.

3.2.6. Содержание углерода и азота

Проверить предположение о более продвинутой стадии эволюции умеренных бариевых звезд по сравнению с нормальными красными гигантами можно было бы путем сравнения содержаний элементов CNO-цикла и их изотопов в атмосферах обеих групп звезд. Действительно, выход звезды на ветвь красных гигантов характеризуется развитием конвективной оболочки и выносом на поверхность звезды продуктов CNO-цикла, что сопровождается уменьшением содержания углерода в атмосфере звезды (по сравнению с солнечным содержанием) и увеличением содержания азота; вследствие этого особенно чувствительным к этому процессу оказывается отношение содержаний C/N , которое при этом уменьшается.

Определение содержаний элементов C, N и O не входило в

Таблица 3.3: Металличность и содержания элементов CNO-цикла в атмосферах нормальных красных гигантов и умеренных бариевых звезд согласно [6, 9, 73, 76–82].

	[Fe/H]	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	[C/Fe]	C/N
Нормальные гиганты (53 звезды)	-0.10 ± 0.21	17.2 ± 8	-0.19 ± 0.15	1.72 ± 0.8
наши 12 зв.	-0.00 ± 0.13	17.0 ± 6	-0.22 ± 0.14	1.62 ± 0.6
Умеренные бариевые (20 звезд)	-0.09 ± 0.15	18.7 ± 9	-0.30 ± 0.20	1.10 ± 0.5
наши 7 зв.	-0.02 ± 0.15	19.0 ± 4	-0.37 ± 0.23	0.91 ± 0.5

задачи данного исследования. Поэтому анализ содержаний этих элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов был проведен на основе литературных данных. В работах [6, 7, 9, 27, 73, 76–81] были найдены данные для 53 нормальных гигантов (в число которых входило 12 звезд, исследованных в наших работах) и для 20 умеренных бариевых звезд (из которых 7 также являются звездами нашей программы).

В табл. 3.3 приведены средние значения отношений содержаний рассматриваемых элементов, отношений изотопов углерода, а также металличности, выведенные на основании этих работ, причем это сделано как для всех звезд каждой рассматриваемой подгруппы, так и отдельно для исследованных нами здесь и в [15]. Идентичность значений металличности для всех рассматриваемых звезд свидетельствует о том, что все они принадлежат одному и тому же типу галактического населения - тонкому диску. Из таблицы видно также, что в пределах ошибок измерений данные о содержаниях для звезд нашей программы совпадают с соответствующими данными для всех звезд данной подгруппы, т.е. исследованные нами звезды являются типичными представителями своих подгрупп.

Кроме того, из таблицы следует, что относительное содержа-

ние углерода в атмосферах умеренных бариевых звезд не отличается по сравнению с соответствующими содержаниями для нормальных гигантов и находится в недостатке, что характерно для протекания CNO-цикла. Это совпадает с тем, что было найдено для этих звезд в более ранних работах, см. [7, 27]. Хотя в пределах разброса содержание $[C/Fe]$ для умеренных бариевых звезд можно считать совпадающим с соответствующими величинами для нормальных красных гигантов, все же это значение несколько ниже, чем у последних. Это обстоятельство, наряду с несколько более низким для них отношением углерода к азоту C/N можно объяснить, если в умеренных бариевых звездах существует более глубокое конвективное перемешивание и, как следствие, больший вынос продуктов горения элементов CNO-цикла по сравнению с нормальными красными гигантами. Совпадение значений отношения изотопов углерода $^{12}C/^{13}C$ для нормальных красных гигантов и умеренных бариевых звезд не противоречит выводу о более развитой конвекции в случае последних, поскольку детальное исследование фазы красного гиганта [82] свидетельствует, что когда конвективная оболочка достигает слоя, обогащенного изотопом ^{13}C , и выносит его вещество на поверхность звезды, это отношение резко уменьшается, однако при дальнейшем развитии фазы красного гиганта и более глубоком проникновении конвекции оно остается практически постоянным.

Заметим, что, как было отмечено во Введении содержания CNO-элементов в умеренных и в классических бариевых звездах существенным образом различаются. Наблюдения свидетельствуют не о недостатке, а избытке углерода, который в рамках общепринятой в настоящее время гипотезы о двойственности бариевых

звезд является продуктом горения гелия в недрах проэволюционировавшего компонента, и углерод попал в атмосферу бариевой звезды вследствие сброса оболочки.

Выводы из анализа содержаний углерода и азота

Содержания углерода и азота в атмосферах умеренных бариевых звезд свидетельствует в пользу протекания CNO-цикла в недрах рассматриваемых звезд, о более глубоком проникновении конвекции, и не дает подтверждений гипотезы двойственности, принятой для классических бариевых звезд.

3.3. Выводы

Проведенный анализ содержаний химических элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов привел к заключению, что эти звезды составляют единую по своей природе группу звезд, которые различаются между собой только фазой эволюции, а именно, умеренные бариевые звезды находятся на более продвинутой фазе эволюции. Об этом свидетельствуют следующие выводы:

1. В обеих подгруппах наблюдаются аномалии содержаний Na, Al, Si - элементов, включенных в NeNa- и MgAl-циклы горения водорода, величины которых зависят от ускорения силы тяжести (то есть от светимости), причем для каждого элемента наблюдается одна зависимость для обеих групп звезд. Сделан вывод о едином механизме возникновения этих аномалий - вынос наружу конвективным перемешиванием продуктов горения водорода в недрах звезд.

2. Величина ускорения силы тяжести $\lg g$ для умеренных бариевых звезд в среднем ниже, чем у нормальных красных гигантов, то есть выше их светимость, что свидетельствует об их более продвинутой стадии эволюции по сравнению с последними.
3. Рассмотрение содержаний продуктов CNO-цикла в атмосферах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов показало, что конвекция в недрах звезд первой группы развита сильнее, чем во второй, что также является следствием более продвинутой стадии их эволюции.
4. Содержания s-элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд несколько выше, чем в нормальных красных гигантах, что также говорит о более глубоком проникновении конвекции и более продвинутой фазе эволюции.
5. Положение группы умеренных бариевых звезд на диаграмме "температура-светимость" (см. рис. 5.6) показывает, что они располагаются в той же области, где и нормальные красные гиганты. Причем звезды с бóльшим содержанием s-элементов имеют тенденцию располагаться в области бóльших масс и меньших температур, что также согласуется с выводом о разных фазах эволюции этих двух групп звезд.

Таким образом, умеренные бариевые звезды и нормальные красные гиганты - объекты одной природы, красные гиганты, находящиеся на разных стадиях эволюции. Для объяснения особенностей в содержаниях химических элементов привлечение гипотезы о двойственности (как в случае классических бариевых звезд) не требуется. К тому же, согласно [34], где отмечено, что среди тех

звезд, которые не показывают сильных избытков s-элементов, процент двойных звезд не отличается от соответствующей величины для нормальных G и K гигантов.

4. Исследование классических бариевых звезд

4.1. Вычисление химического состава

Список исследованных в диссертации классических бариевых звезд приведен в таблице 4.1, где представлены 16 классических бариевых звезд, их положения на небесной сфере, видимые звездные величины, спектральные классы (в соответствии с [66]) и значения параметров моделей их атмосфер, которые были определены в данной работе. Для каждой звезды, согласно полученным параметрам, вычислялась модель атмосферы программой ATLAS9. По эквивалентным ширинам с помощью программы WIDTH9 были вычислены содержания химических элементов во всех звездах данной работы.

Содержания химических элементов относительно соответствующих содержания на Солнце приведены в табл. 4.2, то есть

$$[El/H] = \lg \left(\frac{N(El)}{N(H)} \right)_* - \lg \left(\frac{N(El)}{N(H)} \right)_{\odot}$$

Для каждой звезды и каждого элемента указано количество линий, по которым проводились определения их содержаний. Список спектральных линий, отобранных для исследования химического состава, а также соответствующие значения сил осцилляторов $\lg gf$ и измеренные эквивалентные ширины W_{λ} доступны в электронном виде по адресу <ftp://ftp.inasan.rssi.ru/pakhomov/>.

Согласно табл. 4.2, исследуемые звезды имеют различную металличность. Для каждой из исследованных звезд содержания

химических элементов относительно металличности показаны на рис. 4.1. Из рис. 4.1 видно, что качественно химический состав в атмосферах всех классических бариевых звезд выглядит примерно одинаково - выделяются три основных участка:

- *Первый участок* – это легкие элементы (Na, Mg, Al, Si), их содержания относительно железа имеют положительный знак, т.е. эти элементы по отношению к Fe находятся в некотором избытке.
- *Второй участок* содержит элементы группы железа. Из рисунка видно, что отношения содержаний [El/Fe] имеют небольшой разброс, что свидетельствует о том, что в пределах ошибок определения химического состава относительные

Таблица 4.1: Список классических бариевых звезд, включенных в программу исследования, и результаты определения параметров моделей их атмосфер

HD	Координаты (2000.0)		m_v	Спектр	$T_{\text{эфф}}$, К	$\lg g$	ξ , км/с
	α	δ					
16458	02 ^h 47 ^m 47.7 ^s	+81° 26' 54"	5.79 ^m	G8II Ba3	4560	1.73	1.53
46407	06 32 46.9	-11 09 59	6.30	K0III Ba3	4916	2.48	1.43
65854	08 03 32.3	+54 09 35	8.41	G8III Ba1	4958	2.74	1.30
77247	09 03 32.3	+53 06 30	6.87	G8III Ba2	4978	2.20	1.51
88562	10 12 29.9	-15 53 23	8.52	K2III Ba4	4274	1.74	1.49
101013	11 37 53.0	+50 37 06	6.12	K0III Ba3	5080	3.10	1.40
130386	14 48 02.3	-05 30 24	7.80	K0III Ba1	4720	2.41	1.44
139409	15 38 41.4	-17 39 53	7.15	G5II Ba1	4731	2.13	1.47
175190	18 55 07.1	-22 40 17	4.99	K3II Ba1	4188	1.36	1.50
178717	19 09 22.0	+10 14 28	7.14	K4III Ba4	4073	0.01	1.81
183915	19 31 25.5	+11 37 41	7.29	K1II Ba3	4616	1.88	1.56
196673	20 37 44.3	+33 21 59	6.97	K0III Ba1	4905	2.38	1.53
199394	20 55 09.0	+46 21 00	7.00	G8II Ba1	5080	2.81	1.53
199939	20 58 43.5	+44 24 53	7.44	K0III Ba4	4600	1.91	1.74
204075	21 26 39.9	-22 24 41	3.77	G4II Ba3	5300	1.75	2.16
205011	21 31 50.2	+23 50 43	6.43	G9III Ba2	4880	2.63	1.51

Таблица 4.2: Содержания химических элементов в атмосферах классических бариевых звезд относительно их содержаний на Солнце

Элемент	HD 16458		HD 46407		HD 65854		HD 77247		HD 88562		HD 101013		HD 130386		HD 139409	
	N	[E/H]	N	[E/H]	N	[E/H]	N	[E/H]	N	[E/H]	N	[E/H]	N	[E/H]	N	[E/H]
Na I	5	-0.02±0.05	2	0.06±0.04	2	-0.15±0.01	2	0.29±0.08	3	-0.12±0.05	4	-0.01±0.07	3	0.21±0.05	1	-0.36
Mg I	1	-0.02	-	-	1	0.05	-	-	-	-	1	-0.01	-	-	-	-
Al I	1	-0.02	-	-	1	-0.02	1	0.21	-	-	1	0.10	-	-	-	-
Si I	8	-0.32±0.08	5	-0.14±0.03	4	-0.24±0.04	3	0.09±0.07	4	-0.10±0.03	7	0.01±0.08	4	0.01±0.05	5	-0.19±0.05
Ca I	7	-0.21±0.09	4	-0.11±0.03	5	-0.09±0.05	2	0.13±0.01	2	-0.21±0.06	6	-0.00±0.09	2	-0.03	4	-0.33±0.09
Sc I	6	-0.22±0.02	1	0.03	2	-0.23±0.02	-	-	3	-0.06±0.09	4	0.02±0.04	3	-0.02±0.05	2	-0.51±0.10
Sc II	5	-0.22±0.08	5	0.00±0.03	4	-0.25±0.06	-	-	5	-0.03±0.06	4	0.12±0.03	4	-0.03±0.09	-	-
Ti I	24	-0.29±0.09	35	-0.10±0.07	47	-0.19±0.06	13	0.06±0.07	14	-0.19±0.06	37	0.05±0.08	33	-0.08±0.08	18	-0.42±0.06
V I	10	-0.32±0.05	9	-0.16±0.04	13	-0.20±0.07	4	0.10±0.08	6	-0.16±0.08	10	0.01±0.06	7	0.02±0.04	11	-0.53±0.05
Cr I	13	-0.39±0.07	12	-0.11±0.08	33	-0.21±0.09	7	0.08±0.05	17	-0.36±0.09	15	0.01±0.08	18	-0.02±0.09	6	-0.66±0.10
Cr II	-	-	4	0.04±0.02	6	-0.21±0.04	6	0.12±0.08	-	-	5	0.09±0.11	1	0.10	2	-0.53±0.05
Fe I	76	-0.27±0.09	63	-0.14±0.08	105	-0.20±0.08	40	0.09±0.05	42	-0.16±0.07	95	0.00±0.07	83	0.01±0.07	49	-0.51±0.06
Fe II	5	-0.34±0.08	7	-0.14±0.04	11	-0.35±0.07	8	0.08±0.07	5	-0.17±0.09	9	-0.02±0.04	11	-0.02±0.08	4	-0.47±0.04
Co I	5	-0.13±0.12	13	-0.08±0.07	12	-0.16±0.06	7	0.08±0.08	8	0.02±0.07	14	0.06±0.10	7	0.09±0.09	5	-0.31±0.06
Ni I	22	-0.42±0.08	24	-0.20±0.07	57	-0.27±0.10	17	-0.03±0.07	14	-0.24±0.07	43	-0.07±0.09	33	-0.03±0.08	24	-0.49±0.07
Zn I	1	-0.61	1	-0.15	1	-0.35	2	0.23±0.07	-	-	1	-0.15	1	-0.15	1	-0.31
Sr I	1	0.93	-	-	-	-	-	-	1	0.74	2	1.10±0.02	1	0.55	-	-
Y II	6	0.74±0.08	4	1.07±0.02	6	0.41±0.07	4	0.59±0.06	5	0.69±0.04	6	1.14±0.09	5	0.60±0.10	6	0.18±0.10
Zr II	3	0.99±0.06	4	1.40±0.10	3	0.61±0.07	1	0.77	2	0.92±0.01	5	1.36±0.10	2	0.55±0.05	2	0.32±0.03
Mo I	5	0.51±0.09	3	0.85±0.09	4	0.33±0.04	1	0.25	3	0.27±0.03	4	0.82±0.08	2	0.22±0.04	2	-0.33±0.01
Ba II	1	1.21	-	-	-	-	1	1.23	1	0.90	1	1.37	1	0.51	2	0.20±0.01
La II	4	1.25±0.11	5	1.39±0.04	7	0.61±0.16	3	0.74±0.05	4	0.99±0.10	5	1.23±0.06	4	0.18±0.04	1	-0.06
Ce II	11	1.09±0.07	13	1.23±0.09	8	0.56±0.08	4	0.57±0.12	9	0.83±0.11	14	1.26±0.10	5	0.02±0.11	2	-0.17±0.10
Pr II	8	1.07±0.09	7	1.20±0.09	3	0.55±0.02	2	0.55±0.10	5	0.97±0.09	7	1.14±0.11	3	-0.06±0.06	2	0.00
Nd II	31	1.17±0.11	24	1.19±0.12	17	0.67±0.12	9	0.55±0.10	13	0.94±0.10	28	1.24±0.12	7	0.21±0.06	9	0.24±0.06
Sm II	5	0.50±0.05	4	0.53±0.08	3	0.02±0.06	2	0.33±0.05	1	0.72	2	1.21±0.10	2	0.15±0.01	1	0.00
Eu II	1	0.55	-	-	-	-	-	-	1	0.50	1	0.40	-	-	-	-

Таблица 4.2: Содержания химических элементов в атмосферах классических бариевых звезд относительно их содержаний на Солнце (продолжение)

Элемент	HD 175190		HD 178717		HD 183915		HD 196673		HD 199394		HD 199939		HD 204075		HD 205011	
	N	[El/H]	N	[El/H]	N	[El/H]	N	[El/H]	N	[El/H]	N	[El/H]	N	[El/H]	N	[El/H]
Na I	2	0.06±0.06	2	0.60±0.04	1	-0.31	2	0.47±0.08	3	0.09±0.05	3	-0.03±0.05	2	0.33±0.07	2	0.12±0.02
Mg I	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.09	-	-	1	0.09	1	0.00
Al I	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.04	-	-	1	0.11	1	0.01
Si I	9	0.16±0.09	4	-0.34±0.08	6	-0.25±0.09	4	0.19±0.06	11	0.02±0.07	4	-0.14±0.04	4	-0.09±0.03	4	-0.07±0.02
Ca I	2	-0.15±0.21	2	-0.30±0.07	3	-0.36±0.05	2	0.32	2	-0.01±0.09	2	-0.28±0.02	5	0.14±0.12	4	-0.08±0.04
Sc I	-	-	2	-0.12±0.03	6	-0.49±0.06	2	0.28±0.05	7	-0.10±0.05	4	-0.31±0.05	-	-	2	-0.12±0.04
Sc II	4	-0.14±0.08	-	-	4	-0.40±0.05	2	0.21±0.01	5	-0.06±0.08	3	-0.22±0.08	3	-0.21±0.03	3	-0.04±0.02
Ti I	23	-0.16±0.10	25	-0.01±0.10	40	-0.51±0.11	9	0.23±0.08	47	-0.05±0.10	33	-0.39±0.10	23	-0.03±0.09	35	-0.08±0.07
V I	9	-0.14±0.07	4	-0.07±0.15	12	-0.55±0.08	7	0.16±0.07	13	-0.12±0.12	9	-0.40±0.06	5	-0.28±0.11	10	-0.07±0.06
Cr I	19	-0.16±0.09	12	-0.35±0.10	14	-0.48±0.17	4	0.14±0.11	30	-0.03±0.11	8	-0.45±0.09	10	0.03±0.14	13	0.01±0.09
Cr II	2	-0.15±0.08	-	-	3	-0.33±0.13	1	0.16	7	0.00±0.05	2	-0.27±0.09	6	-0.12±0.04	8	0.10±0.07
Fe I	60	-0.13±0.08	64	-0.31±0.14	93	-0.43±0.10	25	0.27±0.08	119	0.01±0.11	71	-0.30±0.10	57	-0.04±0.11	60	-0.03±0.05
Fe II	5	-0.15±0.07	5	-0.30±0.09	9	-0.48±0.07	4	0.23±0.08	8	-0.08±0.03	4	-0.36±0.05	5	-0.08±0.07	7	-0.07±0.05
Co I	12	0.04±0.10	7	-0.15±0.11	12	-0.40±0.07	3	0.25±0.11	14	-0.06±0.09	5	-0.33±0.04	5	-0.15±0.07	11	0.05±0.07
Ni I	26	-0.13±0.09	18	-0.58±0.15	37	-0.48±0.12	13	0.15±0.05	49	-0.10±0.10	21	-0.41±0.10	35	-0.08±0.13	30	-0.11±0.07
Zn I	1	-0.32	1	-0.65	1	-0.61	1	0.20	1	-0.09	1	-0.40	1	-0.03	2	0.02±0.07
Sr I	1	0.70	1	1.24	1	0.64	-	-	1	1.08	1	1.03	-	-	1	1.04
Y II	5	0.71±0.11	3	0.64±0.06	4	0.43±0.01	5	0.31±0.06	5	0.83±0.06	4	0.87±0.09	2	0.77±0.08	7	0.85±0.07
Zr II	3	0.83±0.07	2	0.83±0.05	3	0.79±0.15	-	-	2	0.84±0.05	2	1.21±0.03	-	-	1	0.77
Mo I	5	0.29±0.16	4	0.60±0.18	4	0.12±0.06	-	-	3	0.56±0.07	3	0.55±0.05	1	0.69	3	0.43±0.05
Ba II	2	0.51±0.09	1	0.94	1	0.66	1	0.78	1	1.07	1	1.41	-	-	1	1.01
La II	3	0.55±0.07	2	0.63±0.03	3	0.69±0.04	4	0.40±0.05	4	0.91±0.15	6	1.48±0.12	3	0.76±0.10	4	0.77±0.10
Ce II	12	0.30±0.09	7	0.66±0.12	12	0.75±0.14	3	0.23±0.11	5	0.83±0.06	12	1.22±0.11	7	0.90±0.10	6	0.68±0.07
Pr II	6	0.26±0.11	5	0.89±0.07	11	0.74±0.15	2	0.41±0.07	1	1.03	14	1.18±0.18	6	0.76±0.19	3	0.69±0.01
Nd II	21	0.32±0.10	11	0.83±0.17	26	0.78±0.15	2	0.63±0.01	23	0.95±0.19	28	1.18±0.13	8	0.92±0.05	19	0.76±0.10
Sm II	2	0.05±0.12	-	-	1	0.11	2	0.89±0.07	1	0.51	3	0.64±0.13	4	0.35±0.16	1	0.71
Eu II	2	0.11	-	-	1	0.14	-	-	-	-	1	0.61	1	0.19	-	-

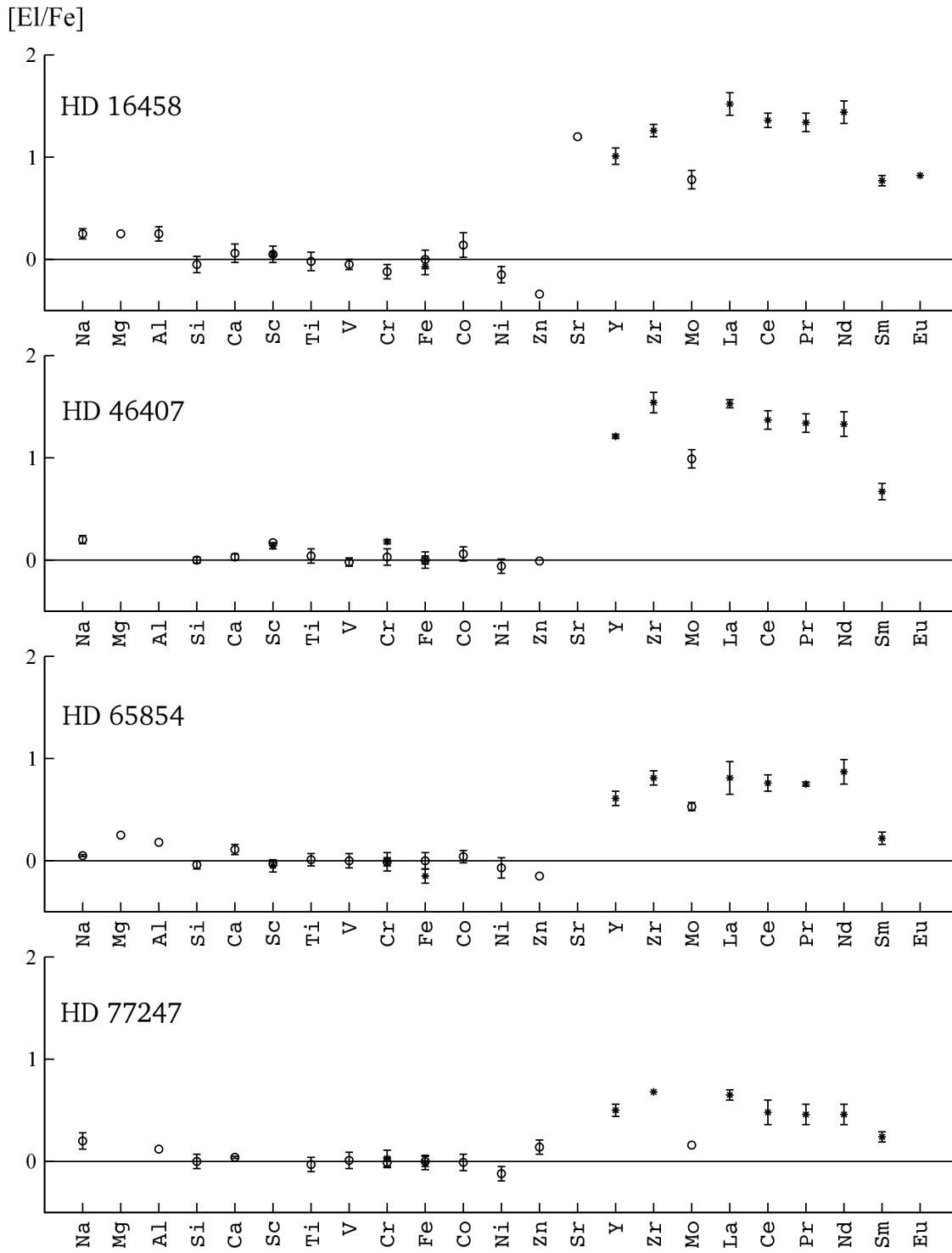


Рис. 4.1: Содержание химических элементов в спектрах классических бариевых звезд

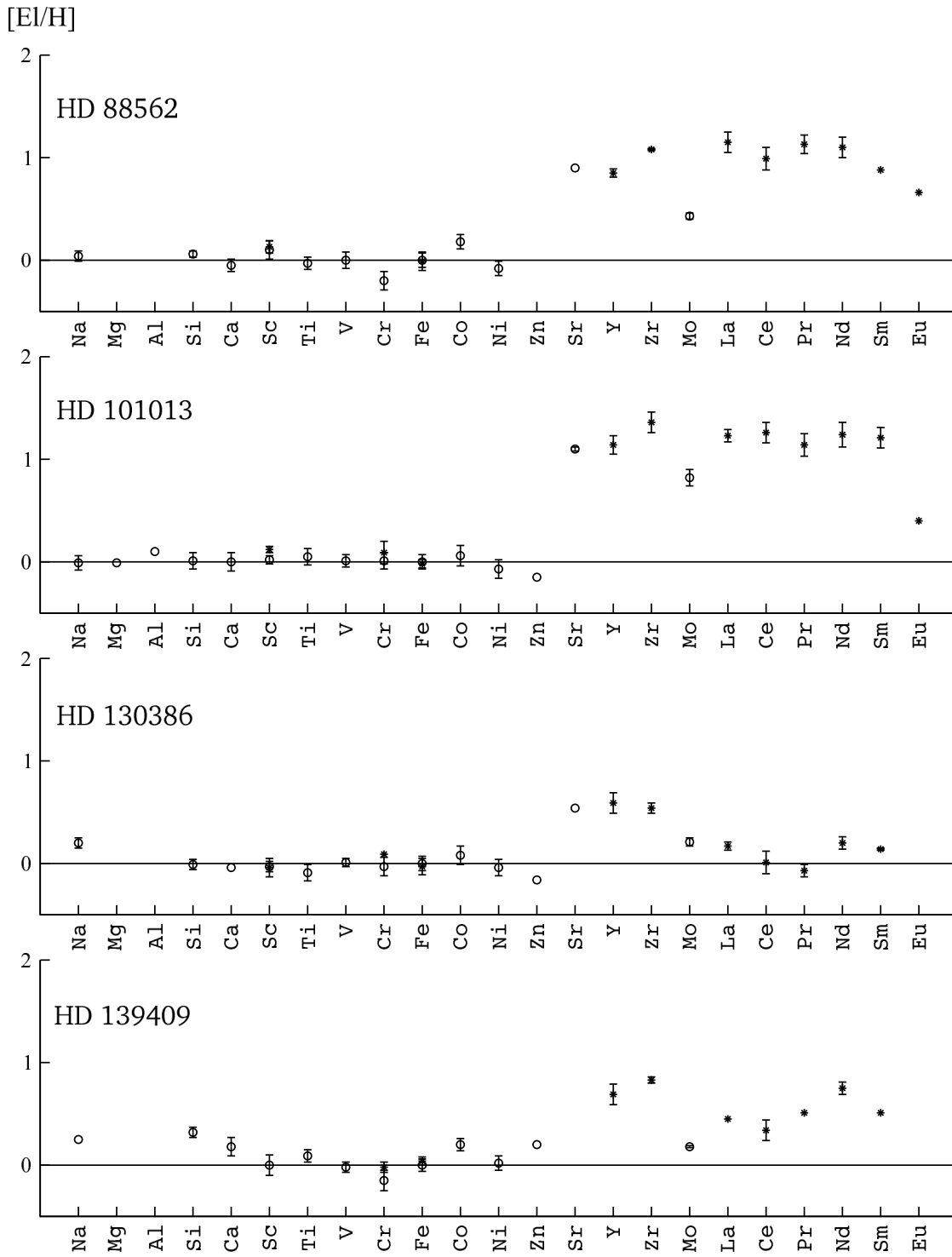


Рис. 4.1: Содержание химических элементов в спектрах классических бариевых звезд (продолжение)

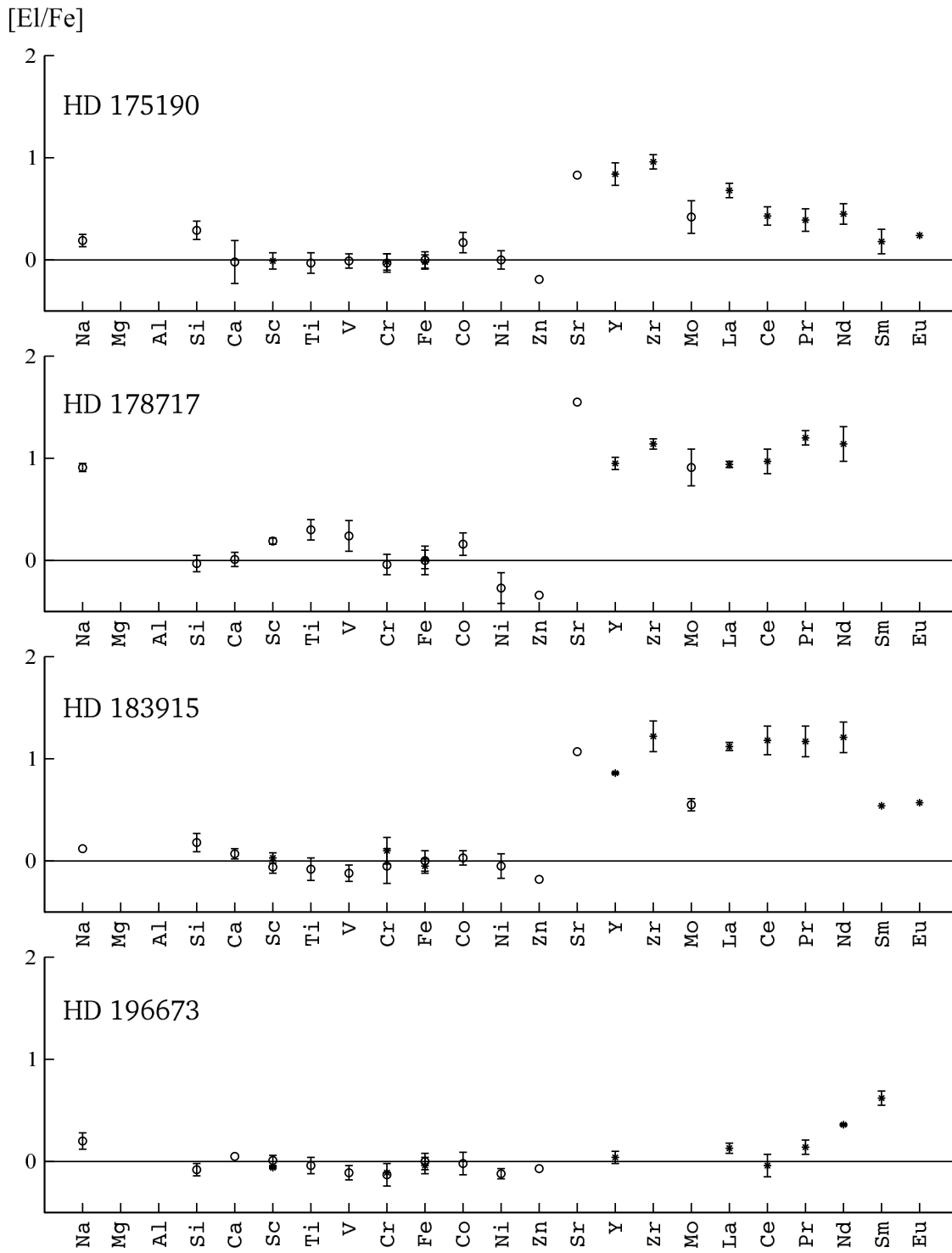


Рис. 4.1: Содержание химических элементов в спектрах классических бариевых звезд (продолжение)

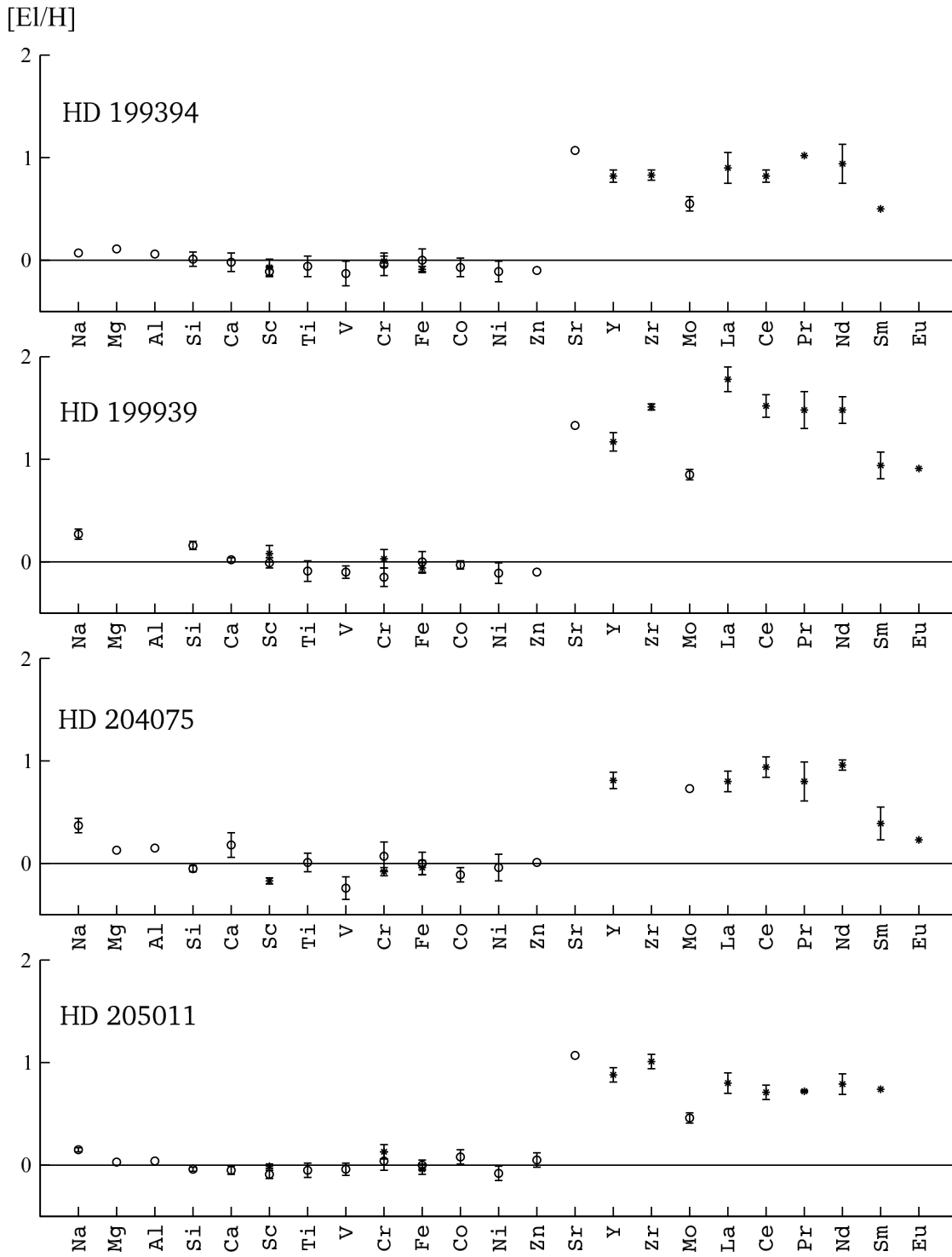


Рис. 4.1: Содержание химических элементов в спектрах классических бариевых звезд (продолжение)

содержания этих элементов не отличаются от соответствующих содержаний в атмосфере Солнца.

- *Третий участок* – элементы тяжелее элементов группы железа, которые в основном образуются в s- и r-процессах; из рис. 4.1 видно, что все рассматриваемые звезды имеют большие аномалии содержаний этих элементов, что является основной отличительной чертой классических бариевых звезд.

4.2. Анализ содержаний некоторых химических элементов

Для дальнейшего анализа была определена величина среднего относительного содержания s-элементов, которая определялась на основании данных из табл. 4.2 по формуле:

$$[s\text{-el}/Fe] = \frac{[Sr1/H] + [Zr2/H] + [Y2/H] + [Ce2/H] + [La2/H] + [Nd2/H] + [Pr2/H]}{7} - [Fe/H].$$

Эта вычисленная величина приводится в табл. 4.3. Здесь, как и в случае умеренных бариевых звезд, при вычислении величины $[s\text{-el}/Fe]$ не использовались данные по $BaII$ из-за большой интенсивности его линий и связанных с этим проблем точного определения его содержания, а также линий Mo , Sm , Eu , значительная доля которых образуются в r-процессе.

В этой же табл. 4.3 для каждой звезды представлены значения металличности и орбитальных периодов (если они известны), а также для двойных систем сведения о компоненте из литературы.

Из гипотезы о двойственности бариевых звезд следует, что величина избытков содержаний s-элементов должна быть тем меньше, чем больше больше период двойной системы, т.е. с увеличением ее размеров. Такая зависимость действительно была ранее

Таблица 4.3: Характеристики бариевых звезд

HD	Спектральный класс	[Fe/H]	[s-el/Fe]	$P_{orb, \text{сут}}$	Сведения о компоненте
Классические бариевые звезды в двойных системах					
16458	K1IIIBa3	-0.27±0.09	1.30±0.16	2018.0	визуально-двойная [83]
46407	K0IIIBa3	-0.14±0.08	1.39±0.12	457.4	
77247	G8IIIBa2	+0.09±0.05	0.54±0.09	80.5	
88562	K2IIIBa4	-0.16±0.07	1.03±0.11	1445.05	
101013	K0IIIBa3	+0.00±0.07	1.21±0.08	1710.9	
178717	K4IIIBa4	-0.31±0.14	1.13±0.20	2866.0	
196673	K0IIIBa1	+0.27±0.08	0.13±0.13	6500.0	
199394	G8IIIBa1	+0.02±0.12	0.90±0.09	4382.6	
199939	K0IIIBa4	-0.34±0.11	1.51±0.17	584.9	
204075	G4IIIBa3	-0.04±0.11	0.86±0.07	2378.2	
205011	G9IIIBa2	-0.03±0.05	0.82±0.11	2836.8	
Классические бариевые звезды без признаков двойственности					
65854	G8IIIBa1	-0.20±0.08	0.69±0.08	—	
130386	K0IIIBa1	+0.01±0.07	0.23±0.25	—	
139409	G5IIIBa1	-0.51±0.06	0.58±0.17	—	
175190	K3IIIBa0.8	-0.13±0.08	0.56±0.21	—	
183915	K1IIIBa3	-0.43±0.10	1.04±0.12	—	
Умеренные бариевые звезды					
49293	K0+IIIBa0.2	+0.08±0.05	0.20±0.03	1760.9	спектрально-двойная [66]
74739	G7.5IIIBa0.1	-0.24±0.05	0.29±0.05	—	визуально-двойная [66]
83618	K2.5IIIBa0.3	-0.03±0.04	0.29±0.12	—	спектрально-двойная [66], белый карлик [84]
133208	G8IIIBa0.3	+0.04±0.02	0.21±0.12	—	
158899	K3.5IIIBa0.1	-0.06±0.06	0.24±0.10	—	
176411	K1-IIIBa0.2	-0.04±0.02	0.01±0.11	1270.6	
202109	G8IIIBa0.6	-0.08±0.03	0.43±0.08	—	
215665	G8IIIBa0.3	+0.08±0.01	0.24±0.08	—	

найдена [85]. Наши результаты (см. рис. 4.2) подтверждают ее.

В пользу гипотезы о двойственности свидетельствует и высокий процент звезд с изменениями лучевых скоростей среди классических бариевых, по сравнению с нормальными красными гигантами. Как видно из этого рисунка, звезда HD 77247 (в левом

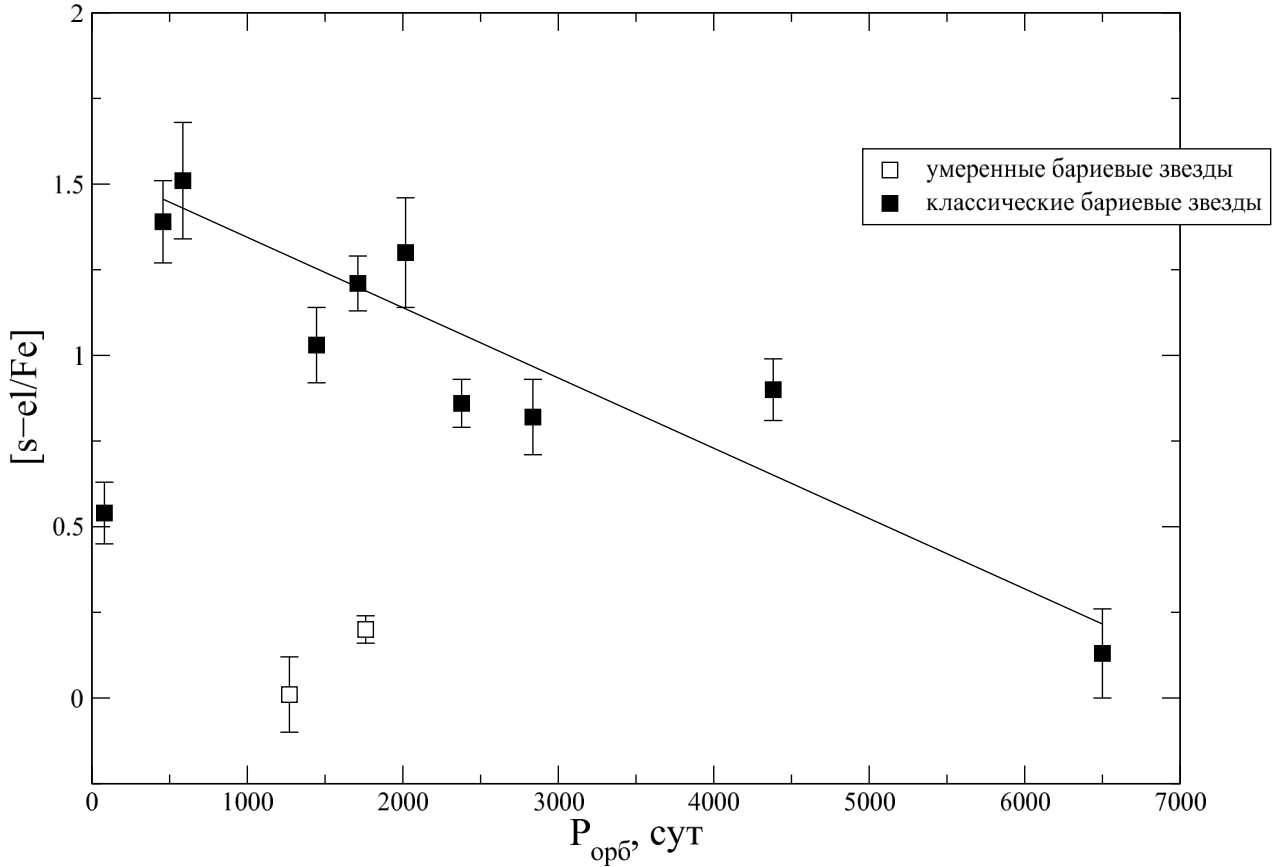


Рис. 4.2: Зависимость величины избытка s-элементов от периода обращения в двойных системах.

нижнем углу) этой зависимости не подчиняется. Являясь бариевой звездой с самым коротким орбитальным периодом, она должна была бы иметь наибольший избыток элементов s-процесса. Здесь и далее для краткости степень обогащения атмосферы звезды элементами s-процесса будем называть степенью бариевости. Однако, для HD 77247 этот избыток, или степень бариевости, на порядок меньше, чем можно было бы ожидать, исходя из этой зависимости. Проверка показала, что ошибками наблюдений и определения параметров атмосферы это расхождение объяснить невозможно. Не исключено, что кроме двойственности имеется какой-то другой фактор, влияющий на степень бариевости этой звезды, либо

звезда входит в кратную систему [85].

С целью поиска такого фактора, который может влиять на содержания s-элементов в классических бариевых звездах, все исследуемые объекты были разделены на две группы: звезды с обнаруженной двойственностью и звезды, у которых изменения лучевых скоростей не выявлены (см. табл. 4.3).

Следует отметить, что все исследованные нами звезды являются гигантами поля и имеют достаточно большой диапазон металличности ($-0.51 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.27$). Поэтому, кроме аномалий в содержаниях некоторых элементов, характерных для красных гигантов и умеренных бариевых звезд, можно ожидать, что некоторая доля в наблюдаемых избытках содержаний каких-либо элементов от нормальных содержаний, может быть связана с химической эволюцией Вселенной, т.е. с возрастом исследуемых объектов. Поскольку возможно наложение этих эффектов, то с целью выяснить, в какой степени наблюдаемые аномалии являются следствием эволюционных процессов, проходящих в звезде, полезно при обсуждении каждого элемента сравнивать его содержание в красных гигантах с аналогичной величиной для звезд-карликов с такой же металличностью (т.е. такого же возраста), химический состав которых отражает химический состав материи, из которой образовывались звезды в ту эпоху. В качестве источника таких данных была использована работа [86], в которой исследовались содержания химических элементов в атмосферах около 200 F - и G -карликов галактического диска в диапазоне металличностей ($-0.8 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.2$).

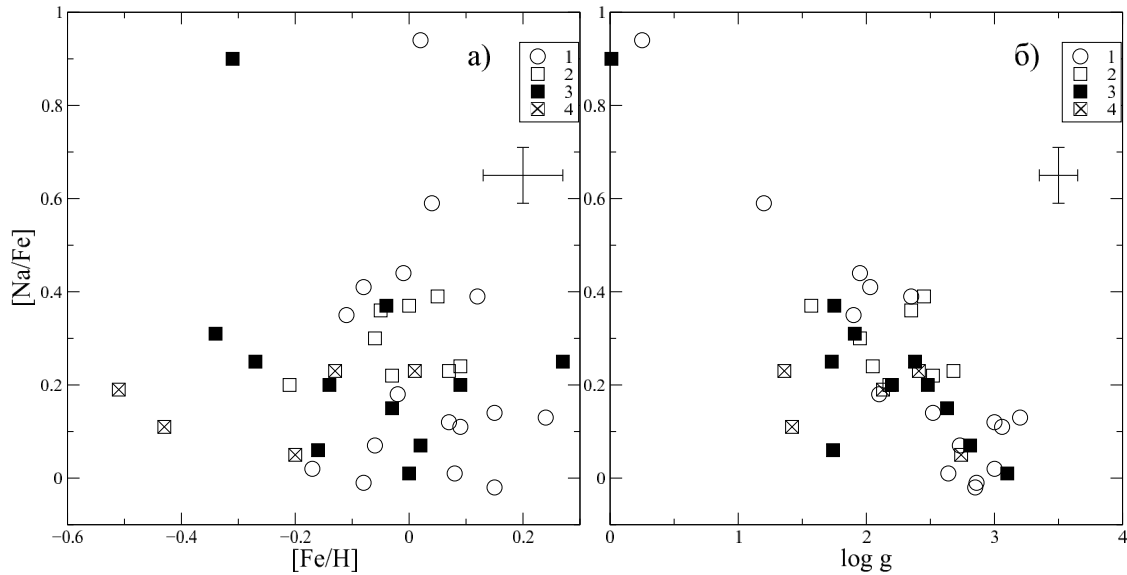


Рис. 4.3: Избыток величины отношения содержания натрия к содержанию железа в атмосферах красных гигантов по сравнению с аналогичной величиной для Солнца: 1 - нормальные гиганты и сверхгиганты, 2 - умеренные бариевые звезды, 3 - классические бариевые звезды в двойных системах (настоящая работа), 4 - классические бариевые звезды без признаков двойственности (настоящая работа).

4.2.1. Натрий

Имея в виду вышесказанное, для анализа содержания натрия построено два графика: зависимость величины $[Na/Fe]$ от металличности $[Fe/H]$ (рис. 4.3а) и от ускорения силы тяжести $\lg g$ (рис. 4.3б). При этом для сравнения были привлечены аналогичные данные по рассмотренным ранее (см. Главу 3) нормальным красным гигантам и умеренным звездам.

Из работы [86], следует, что в рассматриваемом нами диапазоне металличностей карлики галактического диска не показывают каких-либо систематических отклонений в содержаниях Na, что могло бы свидетельствовать об изменениях химического состава вещества, из которого образовались исследуемые звезды. Поэтому введение коррекции в содержание Na за химическую эволюцию

Галактики не требуется. Среднее содержание $[\text{Na}/\text{Fe}]$ для карликов составляет $+0.04 \pm 0.04$ dex, то есть они находятся в узком интервале. Напротив, красные гиганты и бариевые звезды разных подгрупп (см. подписи к рис. 4.3а) располагаются значительно выше этой величины и показывают большой разброс по величине $[\text{Na}/\text{Fe}]$, существенно превосходящий ошибок измерений.

Как известно из многочисленных работ, например, [13, 14, 16], наблюдаемые избытки содержаний Na в атмосферах красных гигантов определяются эволюционными процессами в этих звездах – выносом конвекцией, развивающейся на стадии красных гигантов, на поверхность звезды продуктов ядерных реакций, которые протекали в ее недрах на стадии главной последовательности.

Для звезд разных подгрупп и масс эволюционные стадии могут различаться, что приводит к разным величинам избытка натрия и соответственно к большому разбросу точек на рис. 4.3а.

Все же некоторые тенденции на этом рисунке можно видеть:

- при близких значениях $[\text{Fe}/\text{H}]$ выше располагаются звезды, у которых ускорение силы тяжести меньше (см. табл. 4.3, 4.1, 3.1), то есть у которых светимость выше;
- умеренные бариевые звезды в среднем находятся выше нормальных красных гигантов, что совпадает с выводом Главы 3 об их более продвинутой стадии эволюции.

На рис. 4.3б повторена хорошо известная для сверхгигантов и гигантов зависимость величин избытков содержания Na от величины ускорения силы тяжести $\lg g$ (см. рис. 3.2 Диссертации раздел 3.2), с добавлением туда данных о вновь изученных классических бариевых звездах. Из рисунка отчетливо видно, что

положения звезд выстраиваются в довольно узкую зависимость $[Na/Fe] \sim \lg g$, которая совпадает с последовательностью, построенной для нормальных красных гигантов и умеренных бариевых звезд. Это свидетельствует о том, что во всех этих группах звезд природа происхождения избытков натрия обусловлена одним и тем же процессом - выносом вследствие конвективного перемешивания продуктов ядерных реакций, которые шли в недрах звезды на стадии главной последовательности.

Отметим, что на рис. 4.3б классические бариевые звезды не имеют какого-либо характерного выделенного расположения и распределяются вдоль всей зависимости. Это не согласуется с тем, что наблюдается для умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов, и не может быть объяснено в рамках гипотезы об одиночных звездах, находящихся в разных фазах эволюции. Однако это может быть понято в рамках гипотезы о двойственности звезды, которая сейчас наблюдается как классическая бариевая. Действительно, как следует из анализа избытков Na в сверхгигантах и гигантах [12–15], в одиночных звездах выработка Na в недрах звезды зависит от ее массы (см. также [87]), однако о массе компоненты бариевой звезды, которая уже рассеялась в пространстве, мы ничего не знаем. Но поскольку степень загрязнения атмосферы ныне бариевой звезды зависит от многих параметров - от массы компонента, от расстояния между компонентами двойной, от массы самой бариевой звезды и фазы ее эволюции (что важно при перемешивании вещества в ее атмосфере) - в таких двойных звездах можно ожидать широкий диапазон аномалий содержаний Na, что и наблюдается.

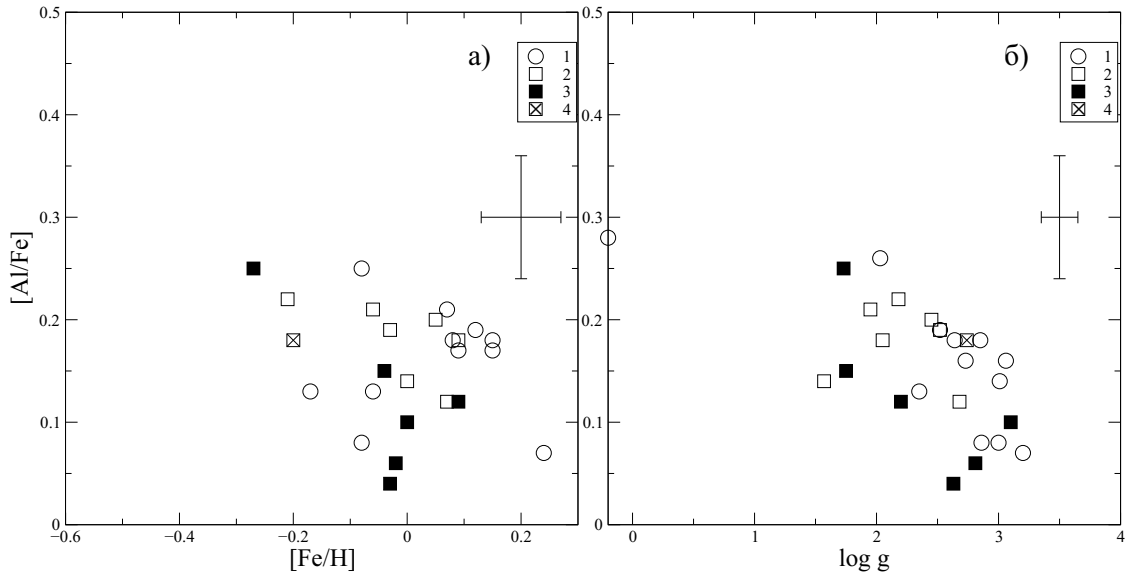


Рис. 4.4: Избыток величины отношения содержания алюминия к содержанию железа в атмосферах красных гигантов по сравнению с аналогичной величиной для Солнца. Обозначения аналогичны рис. 4.3

4.2.2. Алюминий

Как было отмечено ранее в разделе 3.2.2, для нормальных красных гигантов (данные из [15]) и умеренных бариевых звезд (см. рис. 3.3) имеется зависимость $[Al/Fe] \sim \lg g$, аналогично $[Na/Fe] \sim \lg g$. В работе [15] было высказано предположение о возможном происхождении избытков Al в MgAl-цикле на стадии главной последовательности и последующим выносом конвекцией в верхние слои звездной атмосферы.

Аналогичные избытки $[Al/Fe]$ наблюдаются и в классических бариевых звездах. К сожалению, из-за ограниченности исследуемого спектрального диапазона нам удалось измерить содержания Al лишь для семи классических бариевых звезд. На рис. 4.4, который по структуре аналогичен рис. 4.3 для натрия, показаны оценки $[Al/Fe]$. Согласно работе [86] карлики галактического диска не показывают систематического хода содержания $[Al/Fe]$ с металлич-

ностью. Их среднее значение $[Al/Fe] = +0.08 \pm 0.06$. Таким образом, как и в случае с натрием, не требуется вносить поправки за химическую эволюцию Галактики.

Большой разброс точек на рис. 4.3а и 4.3б, как и в случае Na, превышает ошибки наблюдений. Избытки $[Al/Fe]$ растут с уменьшением величины силы тяжести $\lg g$, как и у красных гигантов. Кроме того звезды всех рассматриваемых групп удовлетворяют одной и той же зависимости, свидетельствующей о справедливости вывода о едином механизме происхождения избытков содержания алюминия в их атмосферах - горение водорода в MgAl-цикле на стадии главной последовательности и вынос наружу продуктов реакций путем конвективного перемешивания на стадии красных гигантов.

4.2.3. Кремний

Кремний принадлежит к числу четных элементов, образование которых связывают главным образом с горением гелия при вспышках сверхновых II типа. Поскольку сверхновые этого типа чаще вспыхивали в ранний период эволюции Галактики, избытки содержания четных элементов, в том числе и Si, являются хорошо известной характерной чертой атмосфер старых звезд (с низкой металличностью). Что же касается более молодых звезд, которые составляют большую часть населения диска Галактики, то избытков содержания четных элементов в них не наблюдается. Действительно, по данным из работы [86] в рассматриваемом диапазоне металличностей среднее содержание $[Si/Fe]$ составляет $+0.05 \pm 0.03$ и не показывает систематических отклонений с металличностью. Анализ спектральных наблюдений показывает,

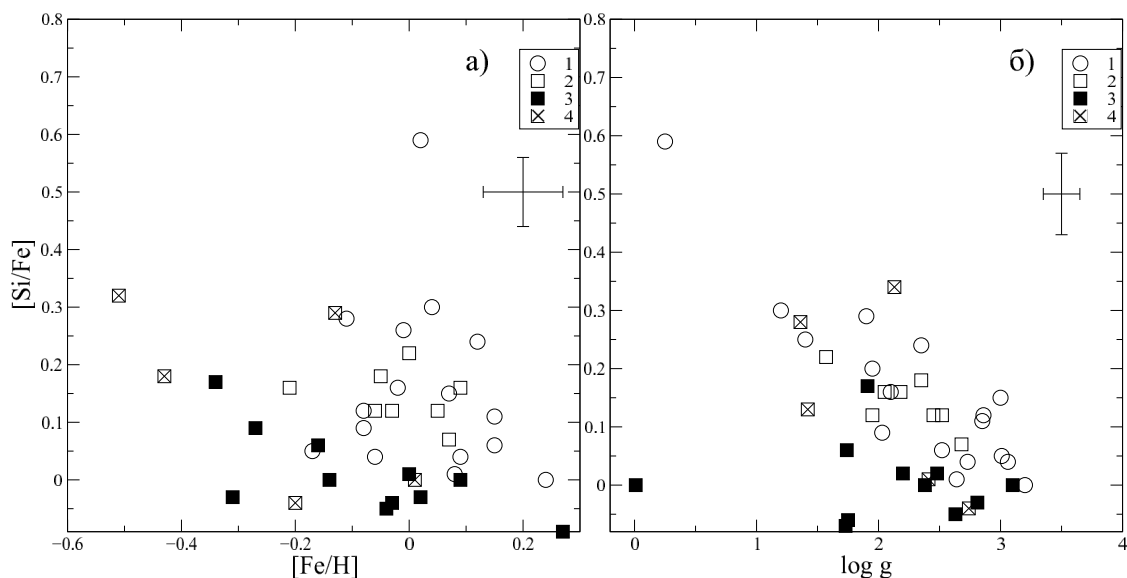


Рис. 4.5: Избыток величины отношения содержания кремния к содержанию железа в атмосферах красных гигантов по сравнению с аналогичной величиной для Солнца. Обозначения аналогичны рис. 4.3

что избытки $[Si/Fe]$ имеются в атмосферах красных гигантах [15], сверхгигантах [15] и также в умеренных бариевых звездах (см. раздел 3.2.3 Диссертации).

Отсюда, вероятно, можно заключить, что избытки содержания кремния связаны не с первоначальным химическим составом вещества, из которого образовались исследуемые звезды, а были произведены внутри них за время их эволюции.

На рис. 4.5а и 4.5б показаны зависимости избытков $[Si/Fe]$ от металличности и от ускорения силы тяжести соответственно, пополненные данными по изученным классическим бариевым звездам. Из рис. 4.5а следует, что с изменением металличности $[Fe/H]$ среднее значение $[Si/Fe]$ заметно не меняется, оставаясь примерно $+0.15$ dex выше соответствующего уровня содержаний $[Si/Fe]$ для карликов галактического диска [86]. Таким образом, как и в предыдущих случаях, можно сделать предположение о том, что избытки кремния были произведены в недрах звезды и вынесены наружу

конвективным перемешиванием. В пользу такого предположения свидетельствует зависимость $[\text{Si}/\text{Fe}]$ от ускорения силы тяжести $\lg g$ (рис. 4.5б), а именно: чем меньше $\lg g$ (т.е. больше светимость) звезды, тем более развита в ней конвекция и тем в более глубокие слои звезды она может проникнуть.

В работе [15] было предположено, что источником аномалий в содержании кремния могла бы быть реакция утечки из MgAl-цикла $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$. В свете выводов работ [88, 89] (о которых речь пойдет ниже в разделе 4.2.4), можно ожидать, что поскольку реакция утечки из NeNa-цикла $^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Mg}$ увеличивает число атомов, вовлеченных в MgAl-цикл, то и число атомов, покинувших этот последний цикл, при этом может стать больше, т.е. содержание Si может возрасти.

Необходимо отметить, что сделанные выше заключения справедливы для нормальных гигантов и сверхгигантов, а также для умеренных бариевых звезд и для звезд, которые классифицируются как классические бариевые, но у которых пока не обнаружены свидетельства их двойственности (рис. 4.5а и 4.5б). Классические же бариевые звезды с установленной двойственностью имеют более низкие избытки содержания Si и не подчиняются зависимости от $\lg g$. Причина этого непонятна и требует дальнейшего исследования. Пока же можно лишь сделать предположение о разной природе классических двойных бариевых звезд и звезд, для которых двойственность не установлена.

4.2.4. Магний

Анализ содержаний $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ в красных гигантах стимулировали теоретические работы [88, 89], целью которых является рас-

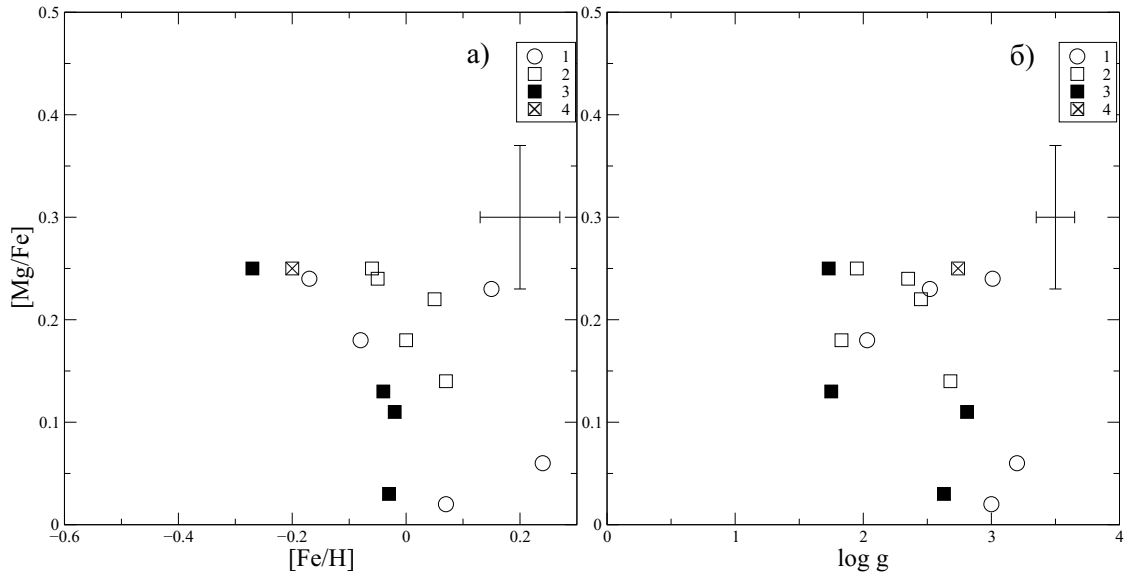


Рис. 4.6: Избыток величины отношения содержания магния к содержанию железа в атмосферах красных гигантов по сравнению с аналогичной величиной для Солнца. Обозначения аналогичны рис. 4.3

смотрение содержаний изотопов элементов от C до Al в области горения водорода для звезд на стадии красного гиганта (от прихода звезды на эту стадию до ее вершины, где загорается гелий). При этом использован большой набор ядерных реакций, включающих и захват протонов: CNO-, NeNa- и MgAl-циклы горения водорода (см. рис. 4.7). Вычисления содержаний изотопов выполнены для широкого ряда металличностей, а также с использованием современных данных о скоростях реакций. Было показано, в частности, что содержание Al сначала растет за счет реакций захвата протонов ядрами ^{25}Mg и ^{26}Mg , а затем ядрами ^{24}Mg в MgAl-цикле. Было также обращено внимание на то, что использование современного значения скорости реакции $^{23}Na(p, \gamma)^{24}Mg$ – реакции утечки из NeNa-цикла – приводит к приросту содержания Mg , который превосходит его убыль при превращении магния в ^{27}Al в MgAl-цикле.

Таким образом, в недрах гигантов может быть увеличение содержания магния, который благодаря конвекции выносится в атмо-

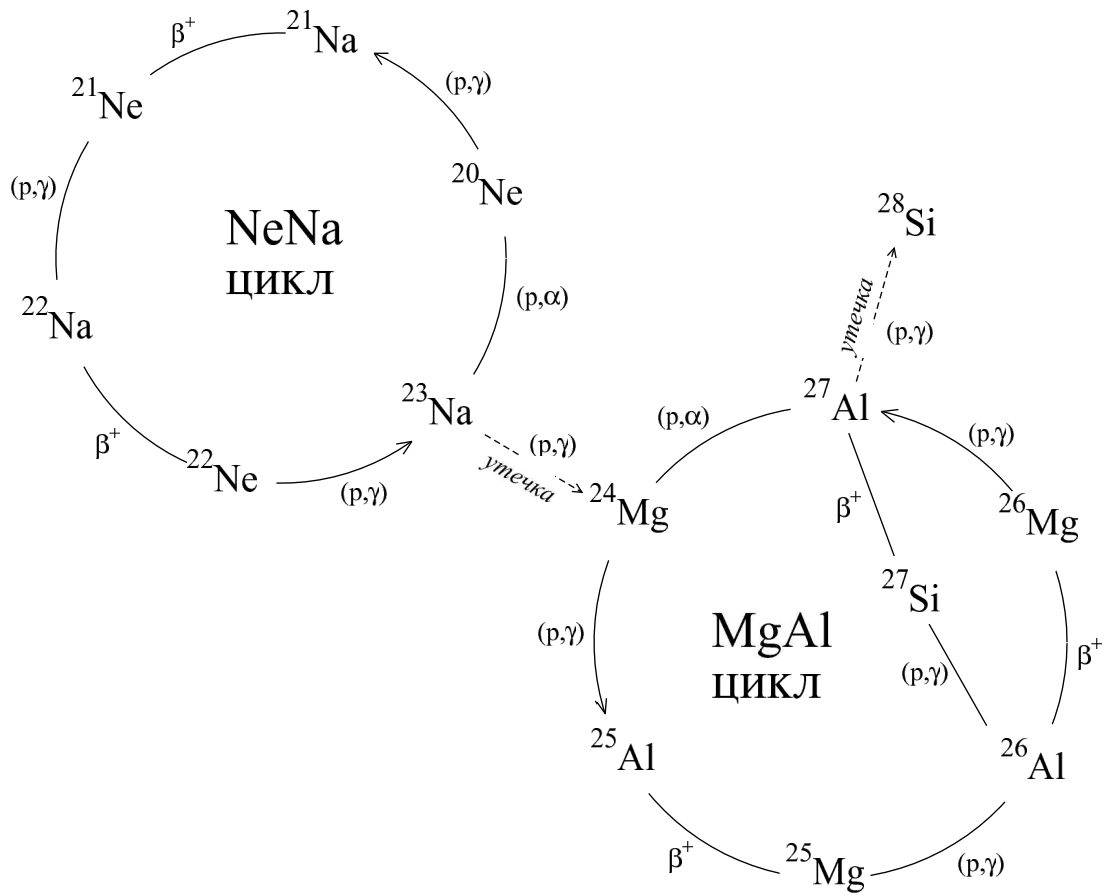


Рис. 4.7: Неон-натриевый и магний-алюминиевый циклы горения водорода и реакции утечки из них

сферу звезды. Поэтому анализ содержаний $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ представляет интерес для проверки теории.

Магний является четным элементом, который как, и кремний образуется, главным образом, при горении гелия при вспышках сверхновых II типа. И для старых звезд, то есть для звезд с низкой металличностью, должны быть избытки магния, обусловленные химической эволюцией Галактики. Из данных по магнию в карликах [86] среднее содержание $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ составляет $+0.06 \pm 0.05$ и не имеет заметного хода с металличностью в рассматриваемом диапазоне (от -0.5 до +0.2), поэтому нет необходимости учитывать химическую эволюцию Галактики.

К сожалению, из-за небольшого количества данных графики содержаний для Mg, аналогичные графикам выше рассмотренных элементов оказались не столь уверенными. Поэтому выводы о содержании Mg в атмосферах красных гигантов следует рассматривать как предварительные, требующие уточнения. А именно, похоже, что аналогично выше рассмотренным элементам зависимость величины избытков содержаний от ускорения силы тяжести (рис. 4.3б и 4.4б) существует и для Mg. Это указывает на то, что в недрах звезды существует некоторое количество Mg, избыточное по сравнению с его содержанием в веществе, из которого образовалась данная звезда. Причем величины этих избытков больше ошибок их определений.

4.2.5. Некоторые итоги анализа содержаний Na, Al, Mg, Si

Были проанализированы полученные данные о содержании Na, Al, Mg и Si в атмосферах красных гигантов, принадлежащих диску Галактики и представляющих три группы объектов, характеризующихся различными химическими аномалиями: нормальные гиганты, умеренные бариевые и классические бариевые звезды. Из рис. 4.3, 4.4, 4.6, 4.5 можно сделать следующие выводы:

- В рассматриваемом диапазоне металличности не требуется введение поправки в содержания рассматриваемых элементов за счет химической эволюции Галактики.
- Отношение содержаний каждого из рассмотренных элементов к содержанию железа $[El/Fe]$ систематически выше, чем то же отношение для карликов, также принадлежащих диску Галактики [34]. Наблюдаемые избытки содержаний связаны с

производством их в недрах звезды в результате горения водорода в NeNa- и MgAl-циклах и последующим выносом их на поверхность звезды конвекцией на стадии красных гигантов.

- Величины аномалий всех рассмотренных элементов коррелируют со светимостью, причем для каждого элемента зависимость единая для всех рассмотренных групп звезд, что свидетельствует о том, что механизмы образования избытков содержаний Na, Al, Mg и Si в атмосферах одинаковы как для нормальных красных гигантов, так и для умеренных и классических бариевых звезд (за исключением Si для двойных классических бариевых звезд, поведение которых требует дальнейшего уточнения).

4.2.6. s-элементы

Величины аномалий содержаний элементов s-процесса (по отношению к содержанию железа) в атмосферах исследуемых классических бариевых звезд лежат в пределах от 0.5 до 1.5 dex (за исключением HD 196673 и HD 130386; возможные причины отклонения обсуждаются ниже), для умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов величины аномалий содержаний s-элементов не превышают 0.3 dex (кроме звезды HD 202109, которая также будет обсуждаться ниже). Прежде всего для сравнительного анализа был построен график зависимости отношения среднего относительного содержания s-элементов $[s\text{-el}/\text{Fe}]$ (усредненного по всем s-элементам, см. табл. 4.3) от металличности (рис. 4.8).

Из работы [86] следует, что в рассматриваемом диапазоне металличностей среднее относительное содержание s-элементов в карликах диска $[s\text{-el}/\text{Fe}] \approx 0.02 \pm 0.08$ и они не показывают зависимо-

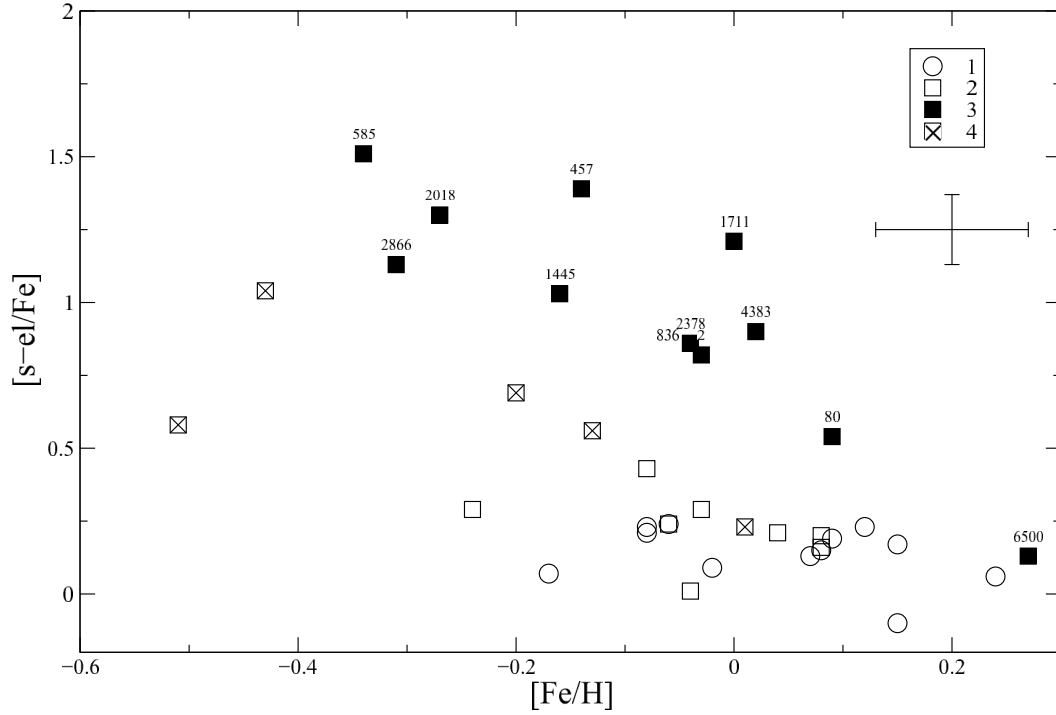


Рис. 4.8: Зависимость величины избытка s-элементов от металличности. Обозначения аналогичны рис. 4.3. Для каждой классической бариевой звезды с известным периодом указана его величина.

сти от $[\text{Fe}/\text{H}]$. Это означает, что в наблюдаемые величины содержания s-элементов в атмосферах исследуемых звезд не требуется вводить поправки за химическую эволюцию Галактики.

Из рис. 4.8 видно, что

1. нормальные красные гиганты и умеренные бариевые звезды располагаются несколько выше (в среднем на 0.2 dex) среднего значения $[\text{s-el}/\text{Fe}]$ в атмосферах карликов, занимают широкую полосу (около 0.3 dex) и также не показывают зависимости от $[\text{Fe}/\text{H}]$.
2. умеренные бариевые звезды в среднем располагаются выше нормальных красных гигантов, что, как и было отмечено в разделе 3.2.6, свидетельствует об их более высокой стадии эволюции.

3. классические бариевые звезды демонстрируют резкое увеличение содержаний s-элементов с уменьшением металличности. Причем разброс значений $[s\text{-el}/\text{Fe}]$ больше ошибок их определений.

Рассмотрим более подробно разные группы звезд на рис. 4.8.

Умеренные бариевые звезды и нормальные красные гиганты

Вернемся ещё раз к полученным результатам в рамках проводимого сравнительного анализа нормальных красных гигантов, умеренных и классических бариевых звезд. Из рис. 4.8 отчетливо видно, что умеренные бариевые звезды никоим образом не связаны с последовательностью классических бариевых звезд; область их расположения на графике полностью совпадает с областью расположения нормальных красных гигантов. Это свидетельствует о том, что двойственность этих звезд, если она и установлена, не является причиной возникновения избытков наблюдаемых содержаний s-элементов, как в случае классических бариевых звезд.

Заметим, что у половины из рассматриваемых умеренных бариевых звезд сведения о их двойственности все же имеются (табл. 4.3). Рассмотрим их несколько подробнее.

В случае HD 176411 удалось определить орбитальный период $P = 1270.6$ дня [90], который типичен для классических бариевых звезд; кроме того, в этой же работе сделана оценка массы спутника, которая составила $\approx 0.5M_{\odot}$, что тоже порядка массы спутника (белого карлика) классической бариевой звезды; однако, поскольку в настоящее время считается установленным, что величина избытка s-элементов зависит от орбитального периода системы, то

если бы спутник действительно являлся белым карликом, можно было бы ожидать, согласно [85] или рис. 4.8 данной работы, избытка содержаний s-элементов в атмосфере бариевой звезды порядка 1.0 dex, т.е. она должна быть классической; поскольку это не наблюдается, авторы работы [90] пришли к выводу, что спутником является обычная маломассивная звезда, которая эволюционирует медленнее, чем та, которую наблюдаем как умеренную бариевую.

Другая звезда - HD 74739 - согласно [66], является членом двойной системы, вторым, причем видимым членом которой является звезда класса A3V, которая не может "загрязнить" атмосферу соседа s-элементами.

Следующая звезда - HD 49293 - является спектрально-двойной с орбитальным периодом $P = 1760.9$ дня [90]. О ее спутнике, к сожалению, ничего не известно, однако, имея в виду величину орбитального периода, типичную для классических бариевых звезд, но отсутствие больших, на порядок превышающих нормальные, содержаний s-элементов, можно аналогично HD 176411 заключить, что и в данном случае спутником является не белый карлик, а маломассивная обычная звезда, которая не может привнести в атмосферу спутника s-элементы.

Еще для четырех звезд из группы умеренных бариевых звезд не удалось установить их двойственности, и, скорее всего, они являются одиночными. И лишь у одной умеренной бариевой, а именно у HD 202109, спутником является белый карлик [84]. Интересно отметить, что именно эта звезда из всех рассмотренных здесь умеренных бариевых звезд имеет наибольшее содержание s-элементов. Таким образом, только у этой звезды происхождение избытков s-элементов может быть связано с ее двойственностью, а

сравнительно небольшие их размеры сравнительно с аналогичными величинами для классических бариевых звезд, возможно, есть следствие большого орбитального периода, величину которого пока установить не удалось. Таким образом, можно сделать заключение, что происхождение аномалий содержаний s-элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд, за исключением HD 202109, не связано с их двойственностью.

К этой же группе звезд, вероятно, следует отнести и звезду HD 196673, которая в нашем исследовании была включена в группу классических бариевых звезд. Это – хорошо известная визуально двойная система (ADS 14078), состоящая из двух гигантов: бариевой звезды K0III (А-компонента) и спутника G5III (В-компонента), который слабее на одну звездную величину. Угловое расстояние между ними составляет около 3". Как бариевая, она была открыта в 1962 г. [91]: основой для такой классификации явились аномально интенсивные линии SrII, BaII и полосы CN; позднее спектроскопические исследования подтвердили наличие избытков тяжелых элементов [92]. В данное время она классифицируется как K0III Ba1 и включается в группу классических бариевых звезд. Поиски орбитального периода на основе анализа данных о величине разделения компонентов системы, собранные за сотню лет [93], не смогли дать уверенных доказательств, что компоненты являются физической парой. Анализ лучевых скоростей на основе десятилетнего мониторинга на Доминиканской астрофизической обсерватории совместно с соответствующими данными, полученными в результате мониторинга с помощью установки CORAVEL, позволил обнаружить период изменения лучевых скоростей, который оказался равен 6500 сут. [94], т.е. HD 196673 является одной из

самых широких двойных систем, содержащих бариевые звезды. Отметим, что в ней не найдено значительных аномалий в содержаниях s-элементов и признаков существования в системе белого карлика. На рис. 4.8 эта звезда лежит в области, занимаемой нормальными гигантами и умеренными бариевыми звездами. Таким образом, согласно имеющимся данным, она может быть отнесена к группе умеренных бариевых звезд.

Звезда HD 130386, которая классифицируется как K0IIIb1 и у которой отсутствуют данные о существовании орбитального периода, демонстрирует также небольшое содержание s-элементов и лежит на рис. 4.8 в области, занимаемой нормальными гигантами и умеренными бариевыми звездами. Вероятно и её также можно отнести к умеренным бариевым звездам.

Классические бариевые звезды

Согласно предположению о двойственной природе бариевых звезд, один из компонентов двойной системы в конце своей эволюции сбрасывают оболочку, обогащенную s-элементами, которые образовались на стадии АВГ; часть вещества этой оболочки попадает на звезду спутник и в дальнейшем частично или полностью перемешивается с её атмосферой, превращая её в наблюдаемую ныне бариевую звезду. Согласно теоретическим работам, посвященным анализу образования s-элементов на стадии асимптотической ветви гигантов, например [95], s-элементы легче образуются в звездах с пониженной металличностью. Именно это обстоятельство и находит свое отражение на рис. 4.8.

На рис. 4.8 для каждой звезды указано значение её орбитального периода (см. табл. 4.3). Видно, что для звезд с близкими

значениями металличности есть тенденция увеличения величины $[s-el/Fe]$ с уменьшением величины орбитального периода, что согласуется с гипотезой двойственности бариевых звезд.

Таким образом можно сделать заключение, что величину избытка s-элементов определяют как минимум два параметра: величина орбитального периода и металличность. Для некоторых звезд тот или иной параметр может оказаться определяющим. Возможным тому примером является звезда HD 77247, которая не подчиняется зависимости величины $[s-el/Fe]$ от величины орбитального периода (рис. 4.2), но хорошо лежит на зависимости $[s-el/Fe]$ от металличности (рис. 4.8). Ранее для объяснения факта её отклонения от зависимости $P_{orb}-[s-el/Fe]$ было высказано предположение, что эта звезда может быть одним из компонентов тройной системы [85].

*Классические бариевые звезды, для которых не
определены величины их орбитальных периодов*

Ранее (см. раздел 4.2) для сравнительного анализа химического состава звезды, классифицирующиеся как классические бариевые, были разделены на две группы: звезды с известным орбитальным периодом и звезды, для которых его величина не установлена. Заметим, что во вторую группу попали звезды с небольшой степенью бариевости, за исключением звезды HD 183915 (табл. 4.3).

Следует отдельно обсудить группу звезд, которые классифицируются как классические бариевые звезды, однако для них не найдены орбитальные периоды. На рис. 4.8 эти звезды лежат ниже классических бариевых звезд, однако повторяют их ход с металличностью (исключение составляет HD 139409; о ней см. ниже).

Поскольку, как было отмечено выше, разброс точек для них на рисунке определяется величиной орбитального периода, а избыток s-элементов уменьшается с его увеличением, то можно предположить, что эти звезды являются широкими парами, и определение их периода по этой причине затруднительно (как это было отмечено для звезды HD 196673, см. выше).

Не исключено, что к этой группе звезд относится и HD 202109, которая по классификации является умеренной бариевой звездой, и для которой наблюдения в ультрафиолетовом спектральном диапазоне дали указание на наличие белого карлика в качестве компонента. Хотя известно, что эта звезда является спектрально-двойной, величина периода у нее пока не определена. Таким образом, эта звезда вероятно также является широкой парой.

Упомянутая выше звезда HD 139409 имеет существенно более низкое содержание s-элементов и выпадает из общей зависимости для классических бариевых звезд, у которых отсутствуют данные об орбитальном периоде. Имея в виду, что эта звезда имеет самую низкую металличность среди рассматриваемых звезд, а производство s-элементов в недрах звезды, согласно теоретическому рассмотрению, протекает легче именно при малой металличности, можно предположить, что эта звезда может быть одиночной, находящейся в более продвинутой фазе эволюции, как это было в случае нормальных красных гигантов и умеренных бариевых звезд, а более высокое, по сравнению с этими звездами, содержание s-элементов может быть следствием ее возраста и малой металличности.

Таким образом, вероятно можно заключить, что звезды, классифицируемые как классические бариевые, у которых не найдены

орбитальные периоды, является неоднородной группой, содержащей широкие двойные системы, у которых спутником является белый карлик (т.е. действительно по своей природе являются классическими бариевыми звездами), а также некоторые одиночные звезды с низкой металличностью (т.е. фактически принадлежащие группе нормальных и умеренных бариевых звезд, у которых, как это было уже отмечено, избыток s-элементов определяется их фазой эволюции и металличностью).

Выводы из анализа содержаний s-элементов

Анализ содержаний s-элементов в классических бариевых звездах показал, что:

- в атмосферах этих звезд в двойных системах избытки s-элементов зависят от величины орбитального периода и от металличности, что подтверждает гипотезу о двойственности этих объектов;
- звезды без признаков двойственности могут быть как широкими парами, поэтому и показывают не такие большие аномалии s-элементов, так и одиночными красными гигантами, в этом случае избытки s-элементов вызваны низкой металличностью и фазой эволюции и, скорее всего, должны быть отнесены к умеренным бариевым звездам.

Стоит отметить, что сама по себе классификация бариевых звезд обладает большой неопределенностью. Оценки степени бариевости при классификации, как правило, были выполнены на основе глазомерных оценок звездных спектров на снимках звездного неба, сделанных с объективной призмой. И у разных авто-

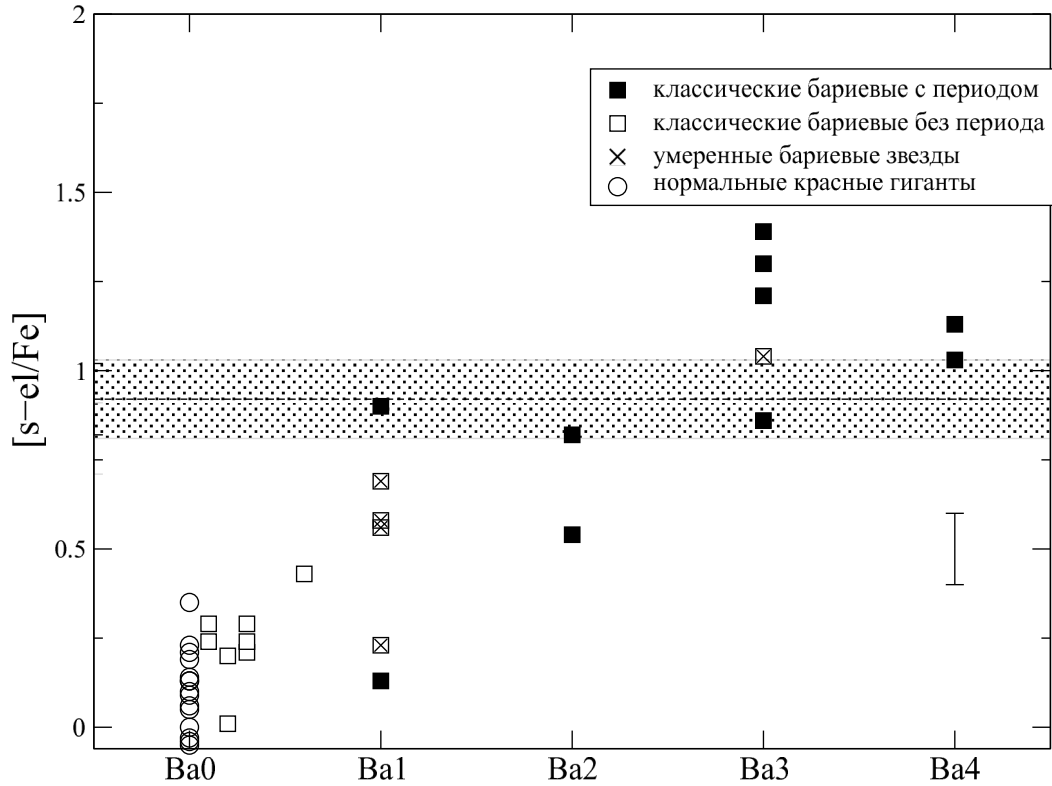


Рис. 4.9: Зависимость величины избытка s-элементов от индекса бариевости

ров могут быть разные оценки, различающиеся на несколько подклассов. На рис. 4.9 показана зависимость средних содержаний s-элементов от степени бариевости для всех звезд данной работы и звезд, исследованных таким же методом, описанным в Главе 2. Для примера на рисунке приведена область с близкими значениями избытков s-элементов ($[s\text{-el}/\text{Fe}] = 0.92 \pm 0.10$), в которую вошли звезды с индексом бариевости 1, 2, 3 и 4. Для нормальных красных гигантов (обозначены индексом бариевости Ba0) можно видеть избытки s-элементов, характерные для умеренных бариевых звезд, что свидетельствует о том, что их не классифицировали как бариевые. Поэтому такие оценки степени бариевости можно считать субъективными. Вследствие этого некоторые звезды могут классифицироваться ошибочно.

Таблица 4.4: Поправки за сверхтонкое расщепление в содержаниях элементов в атмосфере звезды HD 199939

Элемент	$\Delta[El] = \lg N(El) - \lg N(El)_{HFS}$
La II	0.25
Pr II	0.25
Eu II	0.05

4.3. Учет сверхтонкого расщепления

Оценить величину возможного эффекта HFS можно, сделав разбиение каждой исследуемой линии на соответствующие компоненты HFS и определить содержание каждой линии методом синтетического спектра. Сравнение результатов с результатами, полученными выше без учета HFS, даст оценки ошибок полученных в последнем случае.

В исследовании классических бариевых звезд эта проблема прежде всего касается PrII, LaII и EuII. Расчеты были выполнены для звезды HD 199939, как для звезды, для которой найдено наибольшее обилие s-элементов. Соответствующие коэффициенты, необходимые для расчета HFS-компонентов, взяты из работ [96–98]. В результате были найдены поправки, которые можно видеть в табл. 4.4.

Видно, что полученные величины (за исключением EuII, содержание которого определялось по одной слабой линии) превышают ошибки определения содержания. Поскольку данные оценки были сделаны для звезды с самым большим содержанием s-элементов, то ясно, что для других звезд, которые имеют меньшие избытки s-элементов, эти поправки должны быть меньше, и тем меньше, чем меньше величины этих избытков.

Заметим, что в данной работе для каждой звезды был опре-

делен средний уровень содержаний s-элементов в ее атмосфере как среднее из семи элементов (см. табл. 4.3). Эти данные затем были использованы для построения зависимостей величин содержаний s-элементов от величины орбитального периода (рис. 4.2) и от металличности звезды (рис. 4.8). Учет найденных поправок понизит средний уровень содержаний s-элементов на 0.08 dex (из семи элементов четыре являются нечетными элементами и не имеют сверхтонкого расщепления), что вообще говоря не превосходит точности определения химического состава (± 0.10 dex). Однако, имея в виду, что поправка носит систематический характер, а для звезд с меньшими избытками соответствующие поправки будут меньше, можно заключить, что введение этих поправок приведет к несколько меньшему наклону рассмотренных зависимостей, не отразится на выводах работы.

4.4. Выводы

Анализ содержаний химических элементов в атмосферах классических бариевых звезд, показал, что полученные выводы согласуются с гипотезой, согласно которой для возникновения феномена классической бариевой звезды необходимым условием является наличие двойной, достаточно широкой звездной системы с компонентами, значительно различающимися по массе, так, чтобы скорости эволюции компонентов системы существенно различны. Наиболее массивный из них быстро эволюционирует, достигает фазы АВГ и сбрасывает оболочку, загрязняя атмосферу спутника веществом с большим содержанием s-элементов, которую мы и наблюдаем как классическую бариевую звезду.

В пользу этой гипотезы говорят следующие данные:

1. Зависимость величины избытков s-элементов от величины орбитального периода - установленная ранее и подтвержденная в настоящем исследовании;
2. Анализ данных о содержаниях Na, Al, Mg и Si в атмосферах классических бариевых звезд показал наличие избытков всех рассмотренных элементов, которые коррелируют со светимостью, причем для каждого элемента зависимость совпадает с зависимостью, построенной для нормальных красных гигантов и умеренных бариевых звезд, что свидетельствует о едином механизме их происхождения; наблюдаемые избытки содержаний связаны с производством их в недрах звезды в результате реакций горения водорода в NeNa- и MgAl-циклах и последующим выносом их на поверхность звезды конвекцией на стадии красных гигантов.
3. Избытки Na, наблюдаемые у классических бариевых звезд, лежат в широких пределах, занимая весь диапазон наблюдаемых избытков (см. рис. 4.3), что, возможно, свидетельствует в пользу гипотезы о двойственности классических бариевых звезд.
4. Анализ содержаний s-элементов в атмосферах трех рассмотренных групп звезд показал (см. рис. 4.8), что в достаточно широком диапазоне металличностей избытки s-элементов ведут себя по-разному: при одном и том же значении металличности умеренные бариевые звезды имеют существенно меньшие избытки s-элементов, чем классические бариевые звезды, что свидетельствует о разных механизмах их происхождения. Зависимость избытков s-элементов от металличности в

классических бариевых звездах свидетельствует в пользу гипотезы происхождения бариевых звезд в двойных системах.

5. Из литературы известно [27, 78, 99–101], что в атмосферах классических бариевых звезд наблюдается избытки содержания углерода. Поскольку углерод является продуктом горения гелия, а рассматриваемые звезды еще не достигли этой фазы, то избытки углерода должны принадлежать веществу, которое является частью оболочки, сброшенной проэволюционировавшим спутником.
6. Доля двойных среди классических бариевых звезд выше [21], чем у нормальных красных гигантов и умеренных бариевых звезд [34].
7. В пользу гипотезы о двойственности классических бариевых звезд свидетельствует также их положение на диаграмме "температура - светимость" (см. рис. 5.7, где показано расположение этих звезд с учетом обилия s-элементов). В отличие от умеренных бариевых звезд, которые показывали тенденцию увеличения содержания s-элементов в более поздних стадиях эволюции (см. рис. 5.6), классические бариевые звезды на диаграмме расположены хаотически. Действительно, в рамках гипотезы двойственности загрязнение атмосферы бариевой звезды s-элементами зависит от большого числа параметров - массы проэволюционировавшего компонента, степени металличности, расстояния, разделяющего звезды в двойной системе, массы самой бариевой звезды, поэтому какую-либо тенденцию, связанную с эволюционными стадиями увидеть весьма трудно. См. также пункт 2 данного заключения.

Таким образом, можно заключить, что данные наблюдений классических бариевых звезд можно объяснить только в рамках гипотезы о двойственности этих звезд в отличие от умеренных бариевых звезд, которые, вероятно, являются одиночными красными гигантами, находящимися на более продвинутой фазе эволюции, чем нормальные красные гиганты.

Стоит еще раз отметить и тот факт, что звезды, которые классифицируются как классические бариевые, и для которых не доказана их двойственность, представляют собой неоднородную группу.

- Часть звезд, возможно, входят в широкие двойные системы или имеют перпендикулярное расположение плоскости орбиты к лучу зрения, и пока невозможно измерить изменения лучевых скоростей.
- Другая часть, возможно представляет собой одиночные красные гиганты с пониженной металличностью и более продвинутой стадией эволюции по сравнению с нормальными красными гигантами, то есть эта подгруппа может быть отнесена к умеренным бариевым звездам.

5. Анализ положений бариевых звезд на диаграмме "температура-светимость"

5.1. Определение параметров звездных атмосфер

В рамках данного исследования интересно было бы проанализировать эволюционный статус исследуемых звезд, то есть их положения на диаграмме "температура-светимость". Для этого необходимо знать значение эффективной температуры и светимости каждой звезды. Выше были приведены значения $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$ (см. табл. 3.1 и табл. 4.1), которые получены из анализа спектров звезд. Такие параметры подбираются так, чтобы наилучшим образом описать спектр звезды в рамках конкретной сетки моделей звездных атмосфер. Однако, как было отмечено в разделе 2.3.2, в разных сетках моделей определяемые значения температуры и ускорения силы тяжести получаются несколько разными. Даже для Солнца они заметно отличаются от его истинных параметров, которые хорошо известны (см. раздел 2.2, а также [41]). Это свидетельствует о том, что существующие в настоящее время модели звездных атмосфер не являются совершенными. Это также было подтверждено на Симпозиуме 210 МАС, проходившем в Упсале (Швеция) в 2002 году [102, 103]. Учитывая такое обстоятельство, представляется уместным для анализа положений звезд на диаграмме "температура-светимость" использовать эффективные температуры, определенные на основе неспектроскопических методов.

5.1.1. Определение эффективной температуры

Эффективную температуру $T_{\text{эфф}}$ для исследуемых звезд можно оценить несколькими способами. Наиболее точными являются методы на основании измерений:

- 1) угловых диаметров звезд
- 2) инфракрасных потоков (IRFM)

Однако, таких звезд, для которых может быть определена $T_{\text{эфф}}$ одним из этих методов, немного. Для остальных звезд $T_{\text{эфф}}$ определяют следующим образом. По звездам, у которых имеются точные определения $T_{\text{эфф}}$ и значения одного или нескольких показателей цвета c какой-либо фотометрической системы, строят калибровочные кривые $T_{\text{эфф}} = f(c)$. Далее по соответствующим показателям цвета для исследуемых звезд на основании такой калибровочной кривой определяют $T_{\text{эфф}}$. Если имеются несколько калибровочных кривых, то полученные значения $T_{\text{эфф}}$ усредняют.

Наиболее распространенной фотометрической системой является широкополосная система Джонсона UBVRIJKL [43]. Фотометрические измерения, выполненные в этой системе, достаточно многочисленные и включают десятки тысяч звезд. Большинство из таких измерений проводятся в полосах U , B и V , на которые приходится максимум распределения энергии в спектрах звезд спектральных классов от A до K . Поток в остальных полосах системы Джонсона измерен в основном только для ярких звезд. Поэтому для построения калибровочных зависимостей чаще всего используют соотношение " $(B - V) - T_{\text{эфф}}$ " по которому, зная показатель цвета $(B - V)$, можно оценить $T_{\text{эфф}}$. Если имеются по опорным и исследуемым звездам данные других фотометрических систем, то

можно построить и другие подобные калибровочные зависимости. Например, для многих звезд есть измерения в среднеполосной системе 13-цветной фотометрии [44].

Как показывает опыт такие калибровочные зависимости хорошо аппроксимируются полиномом второй или третьей степени. Тогда эффективную температуру звезды можно вычислить используя эти коэффициенты по формуле:

$$T_{\text{эфф}} = \sum_{k=0}^n A_k c^k,$$

где c - значение какого-либо показателя цвета, а A_k - коэффициенты полинома аппроксимации.

Рассмотрим подробнее способы определения эффективной температуры для исследуемых звезд.

1) Определение $T_{\text{эфф}}$ на основании измерений угловых диаметров звезд

Одним из самых точных среди прочих является метод определения $T_{\text{эфф}}$ из измерений угловых диаметров звезд, которые получают из анализа наблюдений покрытия звезд Луной или из интерферометрических наблюдений. Эффективная температура определяется из формулы:

$$T_{\text{эфф}} = 2341 \frac{(\mathcal{F}_{\text{bol}})^{1/4}}{\phi^{1/2}},$$

где \mathcal{F} - болометрический поток, ϕ - угловой диаметр звезды. Из формулы следует, что относительная точность определения $T_{\text{эфф}}$ в 4 раза меньше относительной ошибки в потоке и в 2 раза меньше ошибки измерения диаметра.

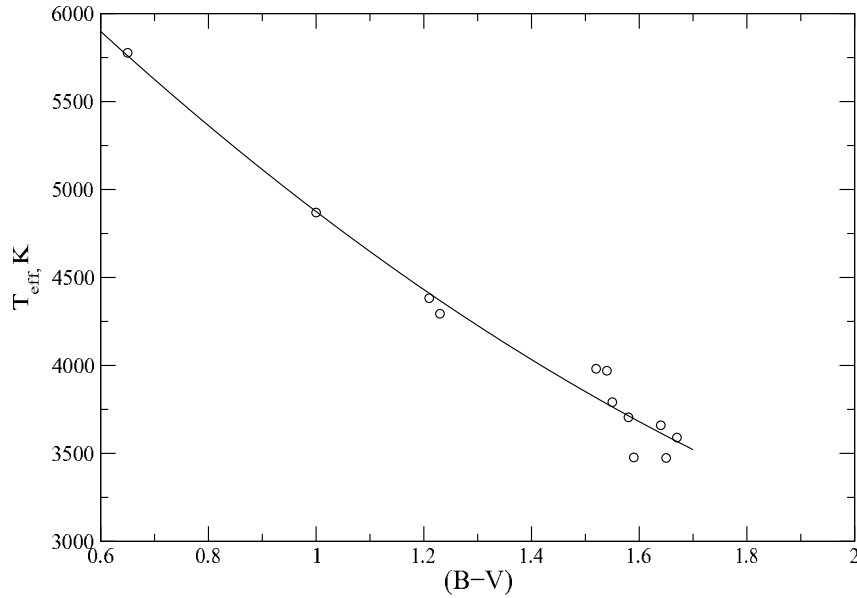


Рис. 5.1: Калибровочная зависимость для показателя цвета $(B - V)$ на основе измерений угловых диаметров звезд

Таблица 5.1: Коэффициенты аппроксимации зависимости " $(B - V)$ -температура" на основе измерении угловых диаметров звезд [104]

A_0	A_1	A_2
7774.3	-3467.6	568.12

На графике 5.1 приведена калибровка по показателю цвета $(B - V)$, которая построена по температурам, определенным на основе измерения угловых диаметров звезд [104]. Из этой работы выбрано 12 звезд красных гигантов. Зависимость аппроксимировалась полиномом второй степени. Коэффициенты аппроксимации приведены в таблице 5.1.

2) Определение $T_{\text{эфф}}$ методом инфракрасных потоков (IRFM)

Этот метод, относящийся к числу болометрических, описан Блэквелом и Шалисом [105]. Метод основывается на измерениях

интегрального потока \mathcal{F} и монохроматического F_ν в инфракрасной области. Оба потока зависят от эффективной температуры $T_{\text{эфф}}$ и углового диаметра звезды θ :

$$\begin{cases} \mathcal{F} = \frac{\theta^2}{4} \sigma T_{\text{эфф}}^4 \\ F_\nu = \frac{\theta^2}{4} \phi(T_{\text{эфф}}, g, \lambda), \end{cases}$$

где g - ускорение силы тяжести, а функция $\phi(T_{\text{эфф}}, g, \lambda)$ в приближении абсолютно черного тела определяется законом Планка или в инфракрасном приближении - законом Рэлея-Джинса $\frac{2c}{\lambda^4} k T_{\text{эфф}}$.

Решением каждого из уравнений является кривая. Пересечение кривых даст решение этой системы уравнений.

Исключая угловой диаметр из уравнений 5.1.1 получим отношение потоков:

$$\frac{\mathcal{F}}{F_\nu} = \frac{\sigma T_{\text{эфф}}^4}{\phi(T_{\text{эфф}}, g, \lambda)} = \frac{\lambda^4 \sigma T_{\text{эфф}}^3}{2ck},$$

В инфракрасном диапазоне отношение потоков есть однозначная функция $T_{\text{эфф}}$. Причем зависимость от $T_{\text{эфф}}$ кубическая (так как в инфракрасной области $F_\nu \sim T_{\text{эфф}}^3$), что позволяет получить относительную точность в 3 раза лучше, чем относительные ошибки определения отношения потоков. В этом заключается одно из преимуществ этого метода. И в добавление, зная $T_{\text{эфф}}$, можно определить угловой диаметр звезды θ , а из него при известном параллаксе и линейный диаметр. Для близких звезд, для которых из интерферометрии известны угловые диаметры, можно решить выше приведенную систему уравнений и определить $T_{\text{эфф}}$. Для многих ярких звезд температуры, определенные этим методом, содержатся в работе [106].

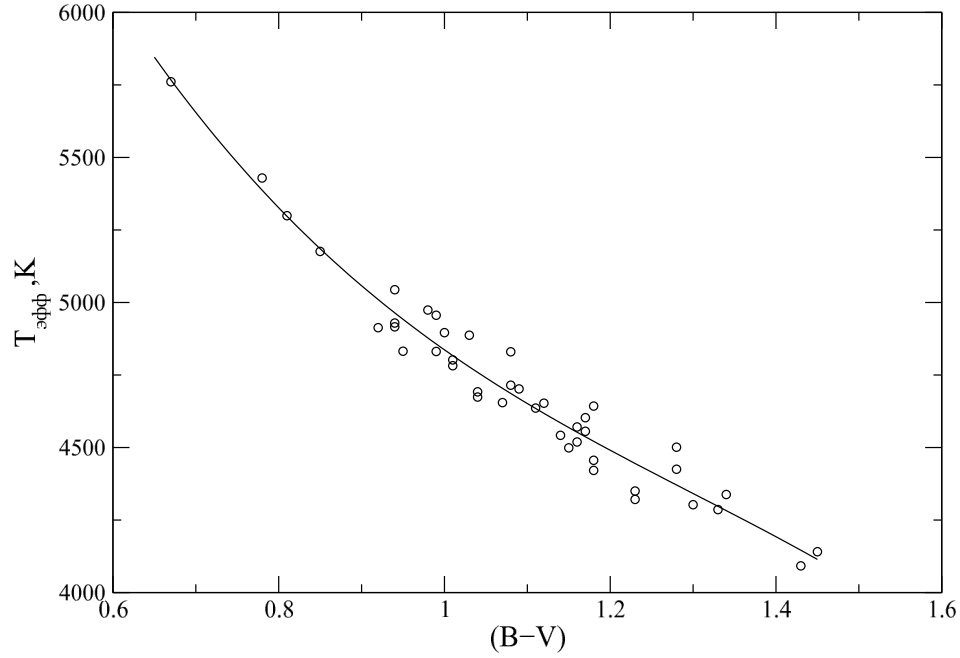


Рис. 5.2: Калибровочная зависимость для показателя цвета ($B - V$) на основе IRFM данных

Использование калибровочных зависимостей на основе IRFM данных

Таблица 5.2: Коэффициенты аппроксимации зависимости " $(B - V)$ -температура" на основе IRFM данных [106]

A_0	A_1	A_2	A_3
10633	-11573	7767.5	-1990.7

Для построения калибровочной зависимости необходимо иметь ряд опорных звезд, эффективные температуры которых определены IRFM-методом, и знать их фотометрические данные. Каталог звезд с IRFM-температурами содержится в [106], где также приведены их характеристики: ускорение силы тяжести и металличность. Кроме того, стоит учесть тот факт, что при одной и той же эффективной температуре показатели цвета различны для звезд разных светимостей и металличностей. Поэтому из каталога [106] были выбраны 42 звезды, близкие по харак-

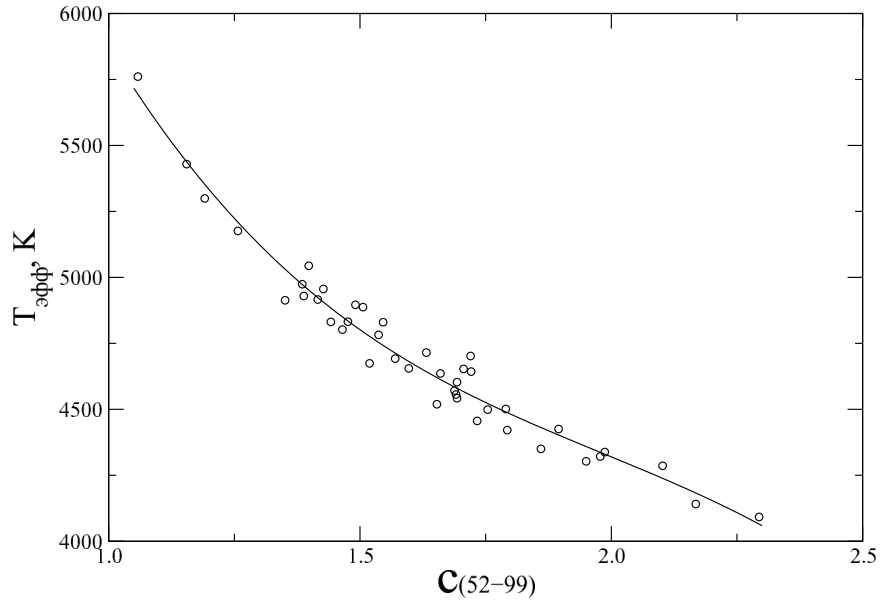


Рис. 5.3: Калибровочная зависимость для показателя цвета $c(52 - 99)$

теристикам к нашим исследуемым звездам ($4000 < T_{\text{эфф}} < 6000$, $1.5 < \lg g < 3.0$, среднее значение металличности по этим выбранным звездам $[M] = -0.07 \pm 0.17$).

Для всех выбранных опорных звезд нам доступны значения $(B - V)$ стандартной системе Джонсона и все показатели цвета 13-цветной фотометрии. Поэтому были построены соответствующие калибровочные зависимости.

На рис. 5.2 показана калибровочная зависимость от показателя цвета $(B - V)$, построенная по выбранным данным для 42 звезд-гигантов [106]. Зависимость аппроксимировалась полиномом третьей степени, коэффициенты аппроксимации приведены в табл. 5.2.

На рис. 5.3, в качестве примера показана калибровочная зависимость " $c(52-99)-T_{\text{эфф}}$ " для 13-цветной фотометрии. Показатель цвета $c(52-99)$ обозначает разность звездных величин двух спектральных полос с центрами около 5200\AA и 9900\AA . Подобная калиб-

Таблица 5.3: Коэффициенты аппроксимации зависимостей "показатель цвета-температура" по данным 13-цветной звездной фотометрии [44]

Color	A_0	A_1	A_2	A_3
33-52	7005.9	-2369.4	810.59	-113.84
35-52	6752.9	-2368.9	922.06	-152.58
37-52	6997.1	-2550.4	965.23	-154.24
40-52	9198.8	-6404.2	3081.1	-561.11
45-52	19832	-76291	130760	-77990
52-58	12461	-34928	53440	-29022
52-63	12615	-21427	19698	-6531.8
52-72	13685	-19217	13948	-3588.9
52-80	13921	-15798	9135.5	-1872.5
52-86	13180	-13215	6950.9	-1305.7
52-99	12169	-10293	4798.5	-807.07
52-110	11310	-7835.3	3124.5	-457.97

ровка проводилась для всех 12 показателей цвета, коэффициенты аппроксимации полиномов третьей степени приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.4: Результаты определения температуры для исследуемых звезд на основе калибровок по показателям цвета из 13-цветной фотометрии [44]

HD	49293	83618	133208	158899	176411	113226	153210	46407	204075
показатель цвета									
33 - 52	4611	4338	4897	4139	4631	4944	4550	4856	5002
35 - 52	4607	4353	4894	4141	4627	4930	4527	4794	5005
37 - 52	4630	4342	4950	4140	4648	4948	4539	4758	4947
40 - 52	4596	4321	4919	4147	4670	4968	4551	4623	4796
45 - 52	4555	4330	4849	4220	4747	4975	4644	4510	4573
52 - 58	4679	4374	5000	4208	4691	4966	4553	4802	4844
52 - 63	4690	4298	4977	4167	4656	5007	4558	4815	5110
52 - 72	4673	4342	4990	4197	4726	4972	4550	4812	5057
52 - 80	4675	4333	4960	4208	4773	4991	4571	4842	5135
52 - 86	4685	4324	4956	4200	4750	5007	4567	4861	5158
52 - 99	4674	4325	4968	4193	4744	5026	4585	4878	5149
52 - 110	4634	4288	5036	4188	4743	5024	4616	4794	5105
T , K	4642	4331	4950	4179	4700	4980	4567	4823	5074
σT , K	41	21	49	29	50	30	31	37	71

Для звезд, исследуемых в данной работе, данные 13-цветной фотометрии были найдены для всех умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов и для двух классических бариевых звезд. Определение эффективных температур было выполнено по всем двенадцати калибровочным кривым для умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов. Для двух классических бариевых звезд для определения средних значений температур не принимались во внимание результаты, полученные по показателям цвета $c(40 - 52)$, $c(45 - 52)$, $c(52 - 58)$, так как они искажены усиленными линиями (эти звезды классические бариевые) BaII, SrII, а также молекулярными полосами CH, CN и C₂. Полученные оценки $T_{\text{эфф}}$, соответствующие данному показателю цвета, а также среднее их значения с ошибками для каждой из исследуемых звезд приведены в табл. 5.4.

Эффективные температуры исследуемых звезд, полученные различными методами

В табл. 5.5 собраны значения температур, определенные описанными выше методами, для всех исследуемых звезд. Необходимые значения показателей цвета $(B - V)$ для них взяты из работ [43, 107–113], а значения показателей цвета 13-цветной фотометрии из [44]. В колонке 2 табл. 5.5 приведены значения температур, полученные из калибровки по $(B - V)$ и по температурам, определенным из измерений диаметров звезд; в колонке 3 - по данным 13-цветной фотометрии и IRFM температур; в колонке 4 - по $(B - V)$ и IRFM температурам. Для сравнения приведены, так называемые, спектроскопические эффективные температуры, полученные в Диссертации (колонка 5).

Таблица 5.5: Определение эффективной температуры исследуемых звезд различными методами

метод	T_D кал. $(B - V)$	T_{IRFM} кал. 13цв	T_{IRFM} кал. $(B - V)$	$T_{н.р.}$ спектр
HD				
1	2	3	4	5
16458	4403	-	4311	4560
46407	5021	4823	5077	4916
65854	4993	-	5048	4958
77247	5014	-	5069	4978
88562	4309	-	4183	4274
101013	4955	-	5007	5080
130386	4713	-	4725	4720
139409	4803	-	4835	4731
175190	4275	-	4138	4188
178717	4114	-	3940	4073
183915	4648	-	4642	4616
196673	4722	-	4736	4905
199394	5072	-	5128	5080
199939	4681	-	4685	4600
204075	5137	5074	5192	5300
205011	4873	-	4916	4880
49293	4625	4642	4634	4717
83618	4186	4331	4312	4355
113226	5016	4980	4964	5187
133208	4945	4950	4898	5075
153210	4516	4567	4552	4593
158899	3959	4179	4130	4180
176411	4691	4700	4686	4691

Определение температуры исследуемых звезд из измерений их диаметров невозможно в виду отсутствия таковых. Калибровка по температурам, полученным из измерений диаметров звезд, несмотря на точность метода, имеет меньшую точность результата, так как построена по малому количеству данных. Точные прямые IRFM температуры получить весьма затруднительно, а использование измерений широкополосной фотометрии вместо инфракрасных потоков заметно снижает точность, к тому же не всегда мы

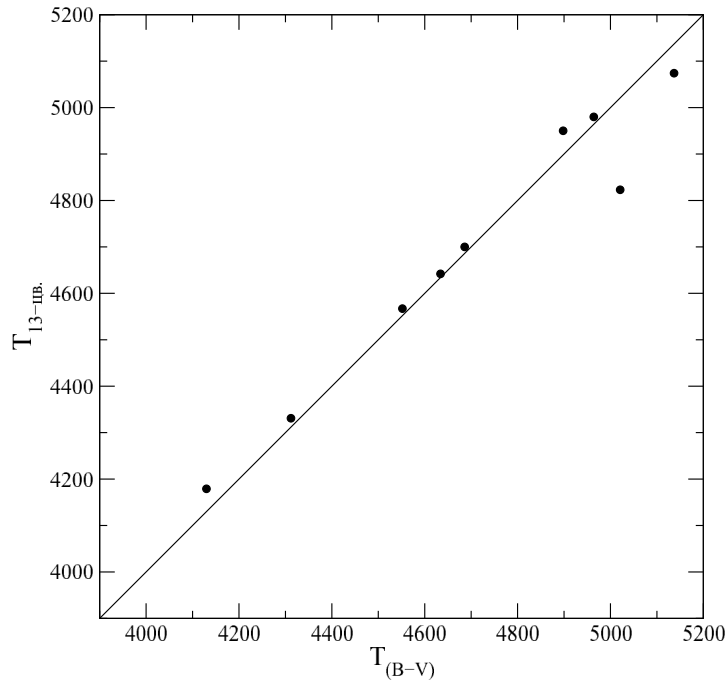


Рис. 5.4: Сравнение IRFM температур для исследуемых звезд, полученных из калибровок по 13-цветной фотометрии и по показателю цвета ($B - V$)

имеем какие-либо фотометрические измерения в инфракрасной области.

Поэтому будем рассматривать определения эффективных температур двумя калибровочными методами: 1) по показателям цвета 13-цветной фотометрии и 2) по показателю цвета ($B - V$).

На рис. 5.4 показано сравнение температур наших звезд, полученные из калибровок 13-цветной фотометрии и ($B - V$) для 14 из 23 звезд, для которых нашлись фотометрические данные. Соответствие температур находится в пределах 30 K, только для двух точек наблюдаются сильные отклонения - это классические бариевые звезды, и как отмечалось выше, для них калибровки, построенные по среднеполосным системам и нормальным звездам, могут давать отклонения. Таким образом можно считать, что эти две калибровки находятся в хорошем согласии, и для дальнейше-

го анализа будем использовать калибровку по показателю цвета $(B - V)$, так как такие фотометрические данные есть для всех исследуемых в Диссертации звезд.

5.1.2. Определение светимости исследуемых звезд

Для дальнейшего анализа положений исследуемых звезд на диаграмме "температура-светимость" необходимо оценить их светимость. Она определялась из видимых звездных величин и расстояний до исследуемых звезд. Необходимые для этого данные помещены в табл. 5.6. В колонках 2, 5 и 3 приведены соответственно видимые звездные величины, показатели цвета $B - V$ и параллаксы (из каталога HIPPARCOS [114]).

Для оценки светимости исследуемых звезд необходимо учесть межзвездное поглощение. Его оценка была сделана на основе анализа положений исследуемых звезд на двухцветной диаграмме $(B - V, U - B)$. Значения показателей цвета взяты из работ [109, 111–113, 115].

Положение звезды на этой диаграмме, не искаженное межзвездным покраснением, зависит от нескольких параметров: эффективной температуры, ускорения силы тяжести, металличности. Для каждой звезды анализ проводился отдельно. Из набора кривых нормальных показателей цвета по данным работы [116] выбирались те, параметры которых меньше всего отличаются от определенных нами ускорения силы тяжести и металличности для каждой конкретной звезды. Наблюдаемое положение каждой звезды $(B - V, U - B)$ приводилось к ее нормальному положению $((B - V)_0, (U - B)_0)$ на кривую нормальных показателей цвета по линии покраснения. По величине разности $((B - V)_0, (U - B)_0)$

Таблица 5.6: Светимости исследуемых звезд

HD	m_v	π , мсек (Hip)	r , пк (Hip)	$(B - V)A_v$		M	L/L_\odot	$\lg g$	$\frac{M_*}{M_\odot}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Классические бариевые звезды									
16458	5.790	6.54	152	1.332	0.24	-1.01	2.278	1.95	1.9
46407	6.266	8.25	121	1.123	0.67	-0.07	1.904	2.78	2.9
65854	8.41	6.34	157	0.976	0.16	2.00	1.077	3.32	1.6
77247	6.860	2.86	349	1.001	0.27	-1.36	2.420	2.39	3.8
88562	8.52	3.13	319	1.451	0.41	-0.21	1.960	1.91	1.0
101013	6.124	7.07	141	1.071	0.41	-0.30	1.995	2.69	3.1
130386	7.80	3.42	292	1.105	0.13	0.01	1.874	2.65	2.5
139409	7.15	5.51	181	1.078	0.20	0.33	1.746	2.66	1.9
175190	4.99	12.07	82	1.345	0.00	-0.36	2.018	1.96	1.2
178717	7.14	2.90	344	1.918	1.50	-2.85	3.016	1.41	3.5
183915	7.29	3.48	287	1.363	0.84	-1.22	2.363	2.25	3.2
196673	6.97	2.76	362	1.143	0.27	-1.42	2.443	2.28	3.9
199394	6.999	6.33	157	1.022	0.41	0.36	1.733	2.93	2.7
199939	7.424	3.16	316	1.293	0.67	-1.12	2.323	2.27	3.1
204075	3.754	8.19	122	0.986	0.38	-2.27	2.784	2.14	4.6
205011	6.426	6.31	158	1.079	0.31	-0.16	1.939	2.70	2.9
Умеренные бариевые звезды									
49293	4.480	8.74	114	1.114	0.00	-1.23	2.368	2.21	3.3
83618	3.909	11.83	84	1.319	0.00	-1.42	2.444	1.89	2.5
133208	3.488	14.91	67	0.958	0.00	-0.92	2.244	2.47	3.5
158899	4.402	8.88	112	1.42	0.00	-1.76	2.580	1.70	2.5
176411	4.025	21.22	47	1.08	0.00	0.27	1.768	2.66	2.2
Нормальные красные гиганты									
113226	2.83	31.90	31	0.94	0.00	0.09	1.840	2.77	2.7
153210	3.20	37.99	26	1.160	0.00	0.60	1.636	2.60	1.6

определялось поглощение в полосе V (колонка 6 в табл. 5.6):
 $A_V = 3.2((B - V) - (B - V)_o)$.

Значения величин поглощения A_V приведены для классических бариевых звезд, которые расположены значительно дальше умеренных бариевых звезд. Из табл. 5.6 видно, что умеренные бариевые звезды находятся на расстоянии в среднем меньше 100пс,

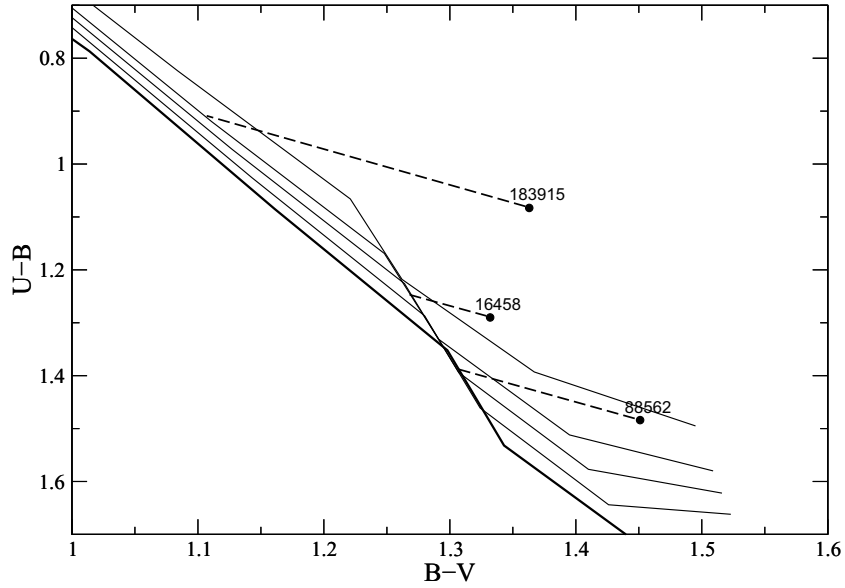


Рис. 5.5: Определение непокрашенных показателей цвета для некоторых исследуемых звезд по данным работы [116] для $\lg g=1.5$ и значениях металличности от 0.0(жирная линия), -0.1, -0.2, -0.3, -0.5

а классические бариевые звезды - до 362 пс. Анализ положений исследуемых умеренных бариевых звезд на двухцветной диаграмме показывает, что в пределах ошибок значений $(B-V)$ ($\approx 0.01^m$) межзвездное поглощение отсутствует. Действительно, на расстояниях до 100 пс межзвездное поглощение крайне мало, за исключением некоторых направлений, и его не учитывают.

По данным работы [116] определялась величина болометрической поправки BC_V с учетом определенных нами ускорения силы тяжести и металличности. Из полученных результатов находим величину светимости звезды:

$$\lg \left(\frac{L_*}{L_\odot} \right) = 0.4(4.69 - (m_* + 5 + 5\lg\pi_* + A_V + BC_V)).$$

Полученные оценки эффективной температуры и светимости дают возможность отобразить положения исследуемых звезд на диаграмме "температура-светимость"(рис. 5.6 и 5.7) и проанализи-

ровать их.

5.1.3. Определение масс и ускорения силы тяжести исследуемых звезд

Для определения звездных масс использовались две сетки эволюционных треков из работ [45, 46] для $Z=0.02$ и $Z=0.008$. Для каждой звезды определялась масса из обеих сеток и затем, согласно определенной металличности (табл. 4.3), путем интерполяции получаем окончательный результат, приведенный в колонке 10 табл. 5.6.

Значение ускорения силы тяжести (колонка 9 табл. 5.6) вычислено по формуле:

$$\lg g = -10.607 + \lg \left(\frac{M_*}{M_{\odot}} \right) + 4 * \lg T_{\text{эфф}} - \lg \left(\frac{L_*}{L_{\odot}} \right).$$

5.2. Положение умеренных бариевых звезд на диаграмме "температура-светимость"

На рис. 5.6 показаны положения умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов на диаграмме "температура-светимость" с нанесенными эволюционными треками для $Z=0.02$ (солнечная металличность) [45]. Значения температуры взяты из табл. 5.5 (колонка 4), а светимости из табл. 5.6. Определение этих величин было описано ранее. Размер кружков отражает избыток в содержании s-элементов относительно железа. Все звезды разделены на три группы: 1) $[\text{s-эл}/\text{Fe}] < 0.12$, 2) $0.12 < [\text{s-эл}/\text{Fe}] < 0.23$ и 3) $[\text{s-эл}/\text{Fe}] > 0.23$. Звездочками обозначены те звезды, которые классифицируются как умеренные бариевые.

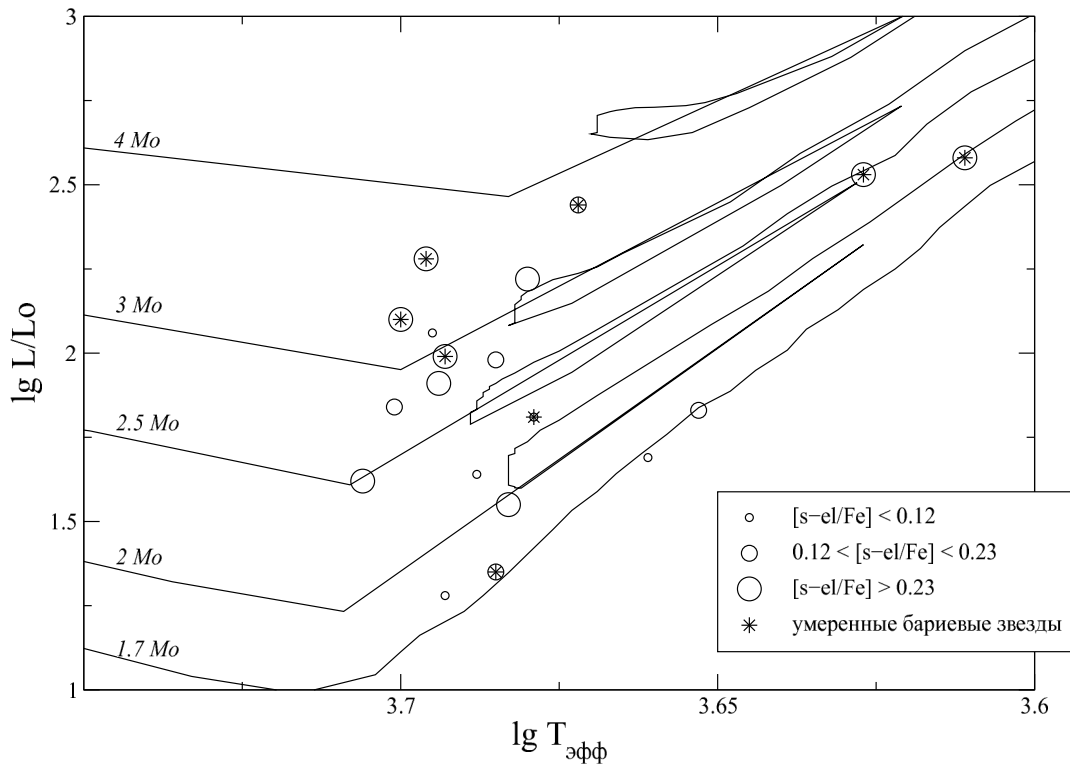


Рис. 5.6: Положение умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов на диаграмме "температура-светимость"

Из рис. 5.6 видно, что нормальные красные гиганты и умеренные бариевые звезды занимают одну и ту же область на диаграмме, однако звезды с большими избытками s-элементов имеют тенденцию располагаться в областях треков с большими массами, а также дальше по ветви красных гигантов. Это подтверждает вывод работы [117], в которой показана зависимость избытка s-элементов от массы звезды у нормальных красных гигантов, что еще раз свидетельствует об эволюционном статусе происхождения аномалий s-элементов. Действительно, чем больше масса звезды, тем больше температура в ее недрах, и тем больше будет γ -квантов, способных участвовать в фотонейтронной реакции, что в свою очередь приводит к большим потокам нейтронов и большим избыткам s-элементов. Для звезд, находящихся на более продвинутой фазе

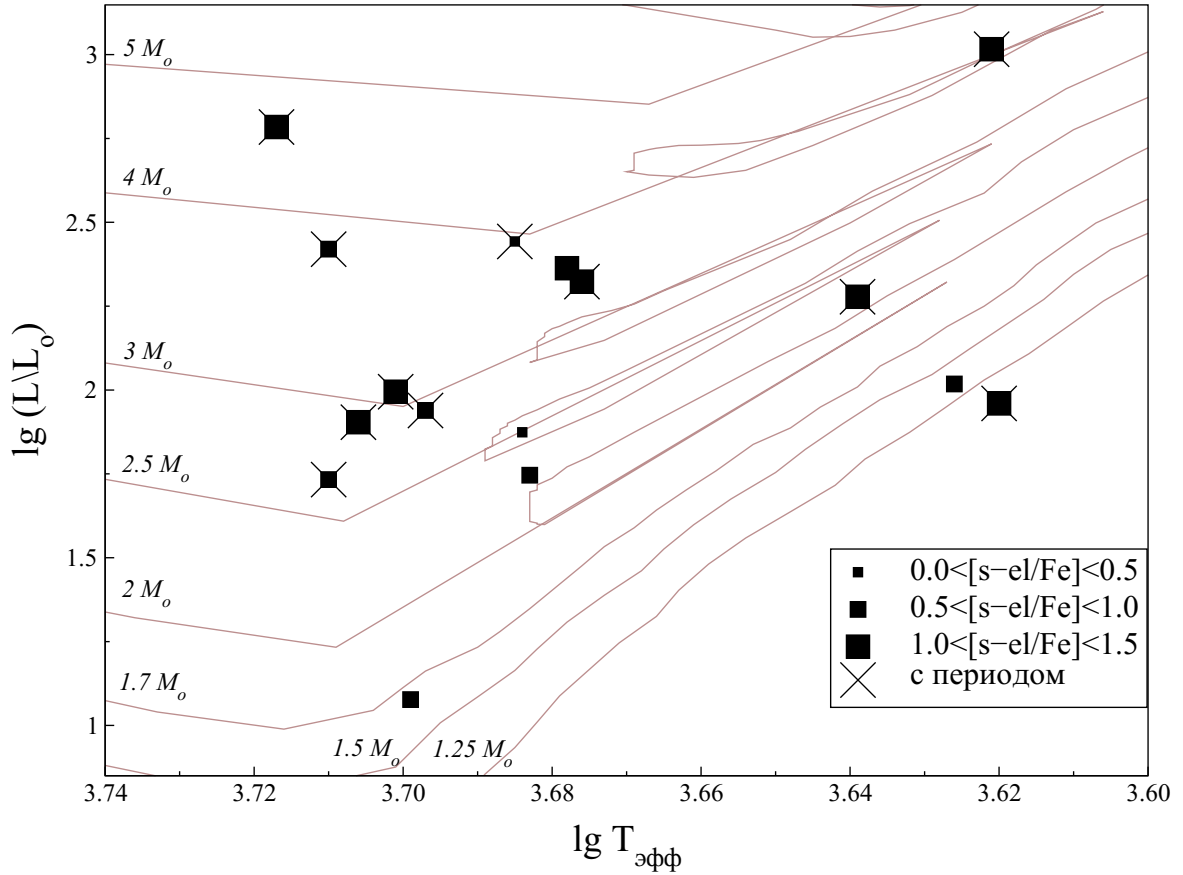


Рис. 5.7: Положение классических бариевых звезд на диаграмме "температура-светимость"

эволюции, характерно более глубокое проникновение зоны конвекции, которая выносит всё больше продуктов ядерных реакций.

Таким образом, эти выводы из рассмотрения положений умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов на диаграмме "температура-светимость" соответствуют выводам раздела 3.3 о природе умеренных бариевых звезд.

5.3. Положение классических бариевых звезд на диаграмме "температура-светимость"

На рис. 5.7 показаны положения классических бариевых звезд на диаграмме "температура-светимость" с нанесенными эволюци-

онными треками для $Z=0.02$ (солнечная металличность) [45]. Значения температуры взяты из табл. 5.5 (колонка 4), а светимости из табл. 5.6. Размер значков отражает избыток в содержании s-элементов относительно железа. Все звезды разделены на три группы: 1) $[s\text{-эл}/Fe] < 0.5$, 2) $0.5 < [s\text{-эл}/Fe] < 1.0$ и 3) $[s\text{-эл}/Fe] > 1.0$. Крестиками обозначены те звезды, у которых найдено изменение лучевых скоростей.

Из рис. 5.7 не видно зависимости расположения звезд с большими избытками s-элементов к трекам больших масс или к областям меньших температур, как это есть в случае умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов (см. раздел 5.2).

Наоборот, отсутствия таких тенденций в случае классических бариевых звезд следовало ожидать. Действительно, в рамках гипотезы о двойственности s-элементы вырабатываются в недрах звезды-спутника, которая, пройдя путь эволюции, сбрасывает оболочку, и часть её оседает в атмосферу звезды, наблюдаемую сейчас как классическая бариевая. Кроме того, вещество сброшенной оболочки смешивается с веществом бариевой звезды вследствие конвекции. В таком случае избытки s-элементов характеризуют исчезнувшую звезду, и ожидать зависимости их от массы исследуемой звезды не приходится.

Таким образом, хаотическое расположения классических бариевых звезд с различными степенями бариевости на диаграмме можно рассматривать в пользу гипотезы о двойственности этих объектов, что также подтверждает выводы, сделанные при анализе их химического состава (см. раздел 4.4).

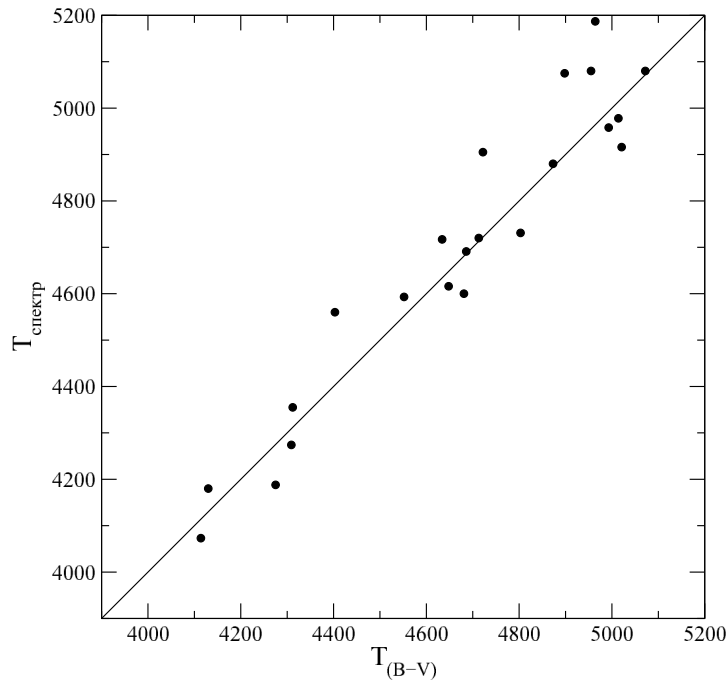


Рис. 5.8: Сравнение температур для исследуемых звезд, полученных в Диссертации и из IRFM-калибровки по показателю цвета $(B - V)$

5.4. Сравнение параметров звездных атмосфер

Имея данные о параметрах атмосфер исследуемых звезд, полученные фотометрическим и спектроскопическим методами, интересно их сравнить.

На рис. 5.8 приведено сравнение температур для исследуемых звезд, полученных в Диссертации (спектроскопический параметр модели звездных атмосфер) и из IRFM-калибровки по показателю цвета $(B - V)$. Заметно, что имеются небольшие отклонения в значениях температур (в среднем около 100K) и небольшой систематический сдвиг в сторону завышения спектроскопической температуры.

Сравнение полученных из анализа положений звезд на диаграмме ускорений сил тяжести и выведенных в данной работе приведены на рис. 5.9. Заметно, что разброс значений в среднем около

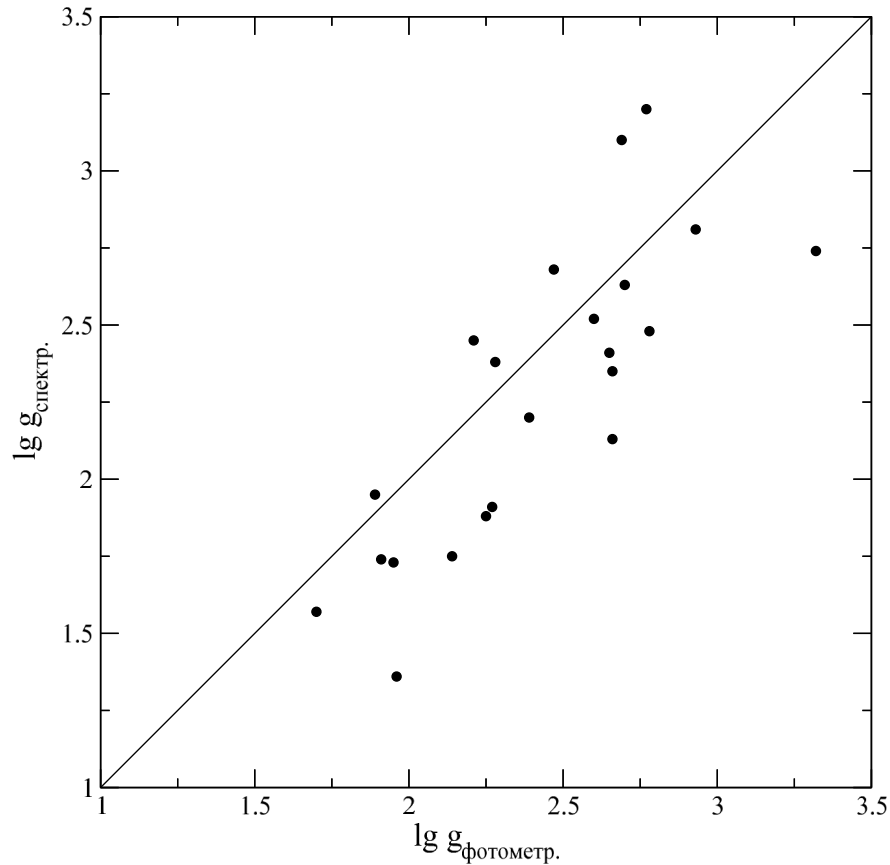


Рис. 5.9: Сравнение ускорений сил тяжести исследуемых звезд, полученных из в Диссертации (спектральные) и из анализа положений на диаграмме "температура-светимость"(фотометрические)

0.25 dex ($\approx 10\%$), что больше, чем при сравнении температур. Этот разброс является следствием ошибок в параллаксах, учете межзвездного поглощения, расчетах эволюционных треков. Ускорения сил тяжести, выведенные из анализа спектров, имеют систематически меньшие значения, примерно на 0.2 dex.

Итак, сравнение параметров звездных атмосфер $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$, выведенных из анализа спектров и полученных по фотометрическим и астрометрическим данным, показало их соответствие. Небольшие отличия спектральных параметров от фотометрических отражают несовершенство моделей звездных атмосфер, о чем было подробно описано в разделах 2.2, 2.4.2 и 5.1. Это не скажется

на результатах и выводах работы, так как применение в Диссертации дифференциального анализа в рамках единой сетки моделей позволило определить относительные содержания химических элементов с высокой точностью.

5.5. Выводы

Итак, сравнительный анализ положений бариевых звезд и нормальных красных гигантов на диаграмме "температура-светимость" показал, что:

- существует тенденция расположения умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов с большими избытками s-элементов на эволюционных треках больших масс и к области меньших температур (т.е. на более продвинутой стадии эволюции); это свидетельствует о том, что наблюдаемые избытки элементов s-процесса связаны с эволюционным статусом звезды и происхождением обязаны процессу конвективного перемешивания;
- классические бариевые звезды не имеют заметного выделенного расположения с избытком s-элементов в их атмосферах, что может свидетельствовать в пользу гипотезы их двойственности, так как эти избытки связаны со звездой-спутником, которая проэволюционировав, сбросила свою оболочку на ныне наблюдаемую бариевую звезду.

Заключение

Во Введении было отмечено, что красные гиганты являются неоднородной группой звезд, и имеют в своих спектрах аномалии в содержании тех или иных химических элементов, что связано с конвекцией, выносящей в атмосферу звезды продукты ядерных реакций, которые шли в недрах звезды на стадии главной последовательности. Так называемые бариевые звезды являются одной из наиболее интересных подгрупп красных гигантов.

Ранние исследования привели к выводу, что эта подгруппа не является однородной, и ни одна выдвинутая гипотеза происхождения бариевых звезд не является универсальной для всех звезд этой подгруппы. Поэтому актуальной является задача исследования с максимально возможной точностью содержаний химических элементов в атмосферах бариевых звезд с различной степенью "бариевости" (содержаний элементов s-процесса) и сравнительный анализ полученных результатов, а также с соответствующими данными для нормальных красных гигантов.

Для этой цели для 23 звезд был получен спектральный материал с высоким разрешением ($R \approx 50000 - 60000$) и отношением сигнала к шуму $S/N \approx 100 - 300$.

С целью определений содержаний элементов с максимально возможной точностью были выполнены

- тщательный отбор "чистых" (неблендированных) линий, имеющих надежные значения $\lg gf$,

- исключение из дальнейшего рассмотрения линий с нулевых уровней или близких с ним, а также достаточно сильных линий (с $W_\lambda > 100 \text{ mÅ}$), чтобы избежать возможных ошибок из-за неЛТР-эффектов и неточностей в постоянных затухания,
- исследование звезд программы и Солнца (звезды сравнения) в рамках одной сетки моделей атмосфер,
- определение параметров атмосфер звезд и Солнца по одной методике.

В результате были определены содержания 27 элементов в атмосферах 23 звезд - классических бариевых звезд, умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов.

Сравнительный анализ полученных данных показал, что

- в атмосферах всех трех группах звезд имеются избытки содержаний Na, Al, Mg и Si, вовлеченных в NeNa- и MgAl-циклы горения водорода в недрах звезд; величины этих избытков зависят от светимости, причем для каждого элемента зависимость является единой для всех трех групп звезд; сделан вывод о едином механизме происхождения этих аномалий для всех трех групп звезд, а именно, вынос продуктов ядерных реакций в недрах звезд на поверхность конвекцией, развивающейся при достижении звезды эволюционной фазы красных гигантов;
- умеренные и классические бариевые звезды являются разными по природе объектами:
 - а) умеренные бариевые звезды и нормальные красные гиганты составляют по сути одну группу объектов - это

одиноким красным гигантам, в которой умеренные бариевые звезды выделяются среди других некоторым изменением химического состава за счет более продвинутой фазы эволюции; привлечение гипотезы двойственности не требуется;

б) для объяснения комплекса наблюдательных данных для классических бариевых звезд необходимо условие двойственности звезды

- величины избытков содержаний s-элементов в атмосферах классических бариевых звезд являются функцией, по крайней мере, двух параметров - величины орбитального периода и степенью металличности, причем для отдельных объектов тот или иной параметр может быть определяющим.

Благодарности автора

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю Боярчуку Александру Алексеевичу и научному консультанту Антиповой Людмиле Ивановне за постоянную поддержку и помощь в работе. Автор глубоко признателен ведущему научному сотруднику САО Панчуку Владимиру Евгеньевичу за помощь в работе над материалами наблюдений, доценту Симферопольского университета Цымбалу Вадиму Вячеславовичу за помощь в поддержке программного обеспечения по расчету моделей звездных атмосфер. Автор благодарит администрации КрАО и САО за предоставленное наблюдательное время и их инженерно-технический персонал за сопровождение наблюдений.

Литература

1. I. Iben. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 76, 55 (1991)
2. F. D'Antona. *The problem of Lithium*. Mem. Soc. Astron. Italiana (1991)
3. A. M. Boesgaard, K. G. Budge. *Astrophys. J.* 338, 875 (1989)
4. K. K. Gilroy. *Astrophys. J.* 347, 835 (1989)
5. R. E. Lack, D. L. Lambert. *Astrophys. J.* 256, 189 (1982)
6. D. L. Lambert, L. M. Ries. *Astrophys. J.* 248, 228 (1981)
7. С. В. Бердюгина. *Письма в Астрон. журн.* 19, 933 (1993)
8. J. A. Brown. *Astrophys. J.* 317, 701 (1987)
9. R. W. Day, D. L. Lambert, C. Sneden. *Astrophys. J.* 185, 213 (1973)
10. М. Е. Боярчук, Я. В. Павленко, А. В. Шаврина. *Астрон. журн.* 68, 291 (1991)
11. M. J. Harris, D. L. Lambert, V. V. Smith. *Astrophys. J.* 292, 620 (1985)
12. А. А. Боярчук, М. Е. Боярчук. *Изв. КрАО* 63, 66 (1981)
13. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков. *Изв. КрАО* 64, 3 (1981)
14. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков. *Изв. КрАО* 66, 130 (1983)
15. А. А. Боярчук, Л. И. Антипова, М. Е. Боярчук, И. С. Саванов. *Астрон. журн.* 78, 349 (2001)
16. П. А. Денисенков, В. В. Иванов. *Письма в Астрон. журн.* 13, 520 (1987)
17. П. А. Денисенков, В. В. Иванов. *Письма в Астрон. журн.* 14, 1023 (1988)
18. W. P. Bidelman, P. C. Keenan. *Astrophys. J.* 114, 473 (1951)
19. R. H. Garstang. *Publ. Astron. Soc. Pac* 64, 227 (1952)
20. E. M. Buridge, G. R. Burbidge. *Astrophys. J.* 126, 357 (1957)

21. B. Warner. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 129, 263 (1965)
22. W. W. Morgan, P. C. Keenan. *Annual Rev. Astron. Astrophys.* 11, 29 (1973)
23. P. C. Keenan, R. E. Pitts. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 42, 541 (1980)
24. P. K. Lu. *Astron. J.* 101, 2229 (1991)
25. Bidelman W. P. *Cool stars with excesses of heavy elements*, 43. Dordrecht: Reidel (1985)
26. V. V. Smith, D. L. Lambert. *Astrophys. J.* 294, 326 (1985)
27. C. Sneden, C. A. Pilachowski, D. L. Lambert. *Astrophys. J.* 247, 1052 (1981)
28. R. D. McClure. *Astrophys. J.* 268, 264 (1983)
29. J. F. Dominy, D. L. Lambert. *Astrophys. J.* 270, 264 (1983)
30. E. Bohm-Vitense, J. Nemec, C. Proffitt. *Astrophys. J.* 278, 726 (1984)
31. E. Böhm-Vitense, K. Carpenter, R. Robinson, T. Ake, J. Brown. *Astrophys. J.* 533, 969 (2000)
32. C. A. Pilachowski. *Astron. and Astrophys.* 54, 465 (1977)
33. J. Tomkin, D. L. Lambert. *Astrophys. J.* 311, 819 (1986)
34. McClure R. D. *Cool stars with excesses of heavy elements*, 315. Dordrecht: Reidel (1985)
35. M. H. Pinsonneault, C. Sneden, V. V. Smith. *Publ. Astron. Soc. Pac* 96, 239 (1984)
36. R. F. Griffin. *The Observatory* 102, 82 (1982)
37. J. H. Elias, B. Gregory, M. M. Phillips, R. E. Williams, J. R. Graham, W. P. S. Meikle, R. D. Schwartz, B. Wilking. *Astrophys. J. Letters* 331, 9 (1988)
38. R. A. Malaney. *Astrophys. J.* 321, 832 (1987)
39. Л. Зач. *Сообщения САО* 63, 160 (1990)
40. А. А. Боярчук, Л. И. Антипова, М. Е. Боярчук, И. С. Саванов. *Астрон. журн.* 73, 862 (1996)
41. А. А. Боярчук, Л. И. Антипова, М. Е. Боярчук, И. С. Саванов. *Астрон. журн.* 75, 586 (1998)

42. V. M. Canuto, I. Mazzitelli. *Astrophys. J.* 370, 295 (1991)
43. H. L. Johnson, B. Iriarte, R. I. Mitchell, W. Z. Wisniewskj. *Communications of the Lunar and Planetary Laboratory* 4, 99 (1966)
44. H. L. Johnson, R. I. Mitchell. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* 1, 299 (1975)
45. G. Schaller, D. Schaerer, G. Meynet, A. Maeder. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 96, 269 (1992)
46. D. Schaerer, G. Meynet, A. Maeder, G. Schaller. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 98, 523 (1993)
47. А. С. Васильев. *Известия КрАО* 55, 224 (1976)
48. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, И. Д. Найденов. *Препринт САО* 135 (1999)
49. R. L. Kurucz. *SAO Special Report* 309 (1970)
50. Э. А. Гуртовенко, Р. И. Костык. *Фраунговеров спектр и система солнечных сил осцилляторов*. Наукова Думка, Киев (1989)
51. H. Holweger, E. A. Mueller. *Solar Physics* 39, 19 (1974)
52. O. Gingerich, R. W. Noyes, W. Kalkofen, Y. Cuny. *Solar Physics* 18, 347 (1971)
53. J. E. Vernazz, E. H. Avrett, L. R. *Prepr. Ser. of Harvard-Smithsonian center astrophysics* 1308 (1980)
54. E. A. Gurtovenko, R. I. Kostik. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 46, 239 (1981)
55. R. J. Rutten, R. I. Kostik. *Astron. and Astrophys.* 115, 104 (1982)
56. N. Grevesse. *Physica Scripta Volume T* 8, 49 (1984)
57. N. Grevesse, A. Noels, A. J. Sauval. *в ASP Conf. Ser. 99: Cosmic Abundances*, 117–+ (1996)
58. R. A. Bell, K. Eriksson, B. Gustafsson, A. Nordlund. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 23, 37 (1976)
59. R. L. Kurucz. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, vol. 23 23, 181 (1992)
60. H. R. Johnson, A. P. Bernat, B. M. Krupp. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 42, 501 (1980)

61. E. Vitense. *Publ. Astron. Soc. Pac* 65, 206 (1953)
62. V. M. Canuto. *Astrophys. J.* 416, 331 (1993)
63. C. van't Veer-Menneret, C. Megessier. *Astron. and Astrophys.* 309, 879 (1996)
64. C. van't Veer-Menneret, C. Bentolila, D. Katz. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* 27, 223 (1998)
65. K. Fuhrmann, M. Axer, T. Gehren. *Astron. and Astrophys.* 271, 451 (1993)
66. D. Hoffleit. *The Bright Star Catalogue* (1964)
67. P. R. Warren. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 161, 427 (1973)
68. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков, Н. А. Сахибуллин. *Астрофизика* 22, 339 (1985)
69. А. А. Боярчук, И. Губены, И. Кубат, Л. С. Любимков, Н. А. Сахибуллин. *Астрофизика* 28, 343 (1988)
70. Л. И. Машонкина, Н. А. Сахибуллин, В. В. Шиманский. *Астрон. журн.* 70, 372 (1993)
71. С. А. Коротин, Т. В. Мишенина. *Астрон. журн.* 76, 611 (1999)
72. D. Baumuelier, T. Gehren. *Astron. and Astrophys.* 325, 1088 (1997)
73. R. G. Gratton. *Astron. and Astrophys.* 148, 105 (1985)
74. Ч. Барнс, Д. Клейтон, Д. М. Шрамм, ред.. *Ядерная астрофизика*. Мир (1986)
75. T. G. Harrison, T. W. Edwards. *Astrophys. J.* 187, 303 (1974)
76. J. Tomkin, D. L. Lambert. *Astrophys. J.* 193, 631 (1974)
77. J. Tomkin, D. L. Lambert, R. E. Luck. *Astrophys. J.* 199, 436 (1975)
78. P. Kjaergaard, B. Gustafsson, G. A. H. Walker, L. Hultqvist. *Astron. and Astrophys.* 115, 145 (1982)
79. V. V. Smith, N. B. Suntzeff. *Astron. J.* 97, 1699 (1989)
80. D. L. Lambert, J. F. Dominy, S. Sivertsen. *Astrophys. J.* 235, 114 (1980)
81. J. Bonnell, R. A. Bell. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 201, 253 (1982)

82. A. V. Sweigart, L. Greggio, A. Renzini. *Astrophys. J.* 364, 527 (1990)
83. R. B. Culver, P. A. Ianna. *Publ. Astron. Soc. Pac* 88, 41 (1976)
84. E. Boehm-Vitense. *Astrophys. J. Lettres* 239, 79 (1980)
85. L. Zacs. *Astron. and Astrophys.* 283, 937 (1994)
86. B. E. Reddy, J. Tomkin, D. L. Lambert, C. Allende Prieto. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 340, 304 (2003)
87. D. D. Saselov. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 98, 561 (1986)
88. R. M. Cavallo, A. V. Sweigart, R. A. Bell. *Astrophys. J. Letters* 464, 79 (1996)
89. R. M. Cavallo, A. V. Sweigart, R. A. Bell. *Astrophys. J.* 492, 575 (1998)
90. H. M. J. Boffin, N. Cerf, G. Paulus. *Astron. and Astrophys.* 271, 125 (1993)
91. A. P. Cowley, C. R. Cowley. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 74, 79 (1962)
92. A. M. Boesgaard. *Astrophys. J.* 161, 163 (1970)
93. R. D. McClure, A. W. Woodsworth. *Astrophys. J.* 352, 709 (1990)
94. S. Udry, A. Jorissen, M. Mayor, S. Van Eck. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 131, 25 (1998)
95. M. Busso, R. Gallino, D. L. Lambert, C. Travaglio, V. V. Smith. *Astrophys. J.* 557, 802 (2001)
96. J. E. Lawler, G. Bonvallet, C. Sneden. *Astrophys. J.* 556, 452 (2001)
97. S. Ivarsson, U. Litzén, G. M. Wahlgren. *Physica Scripta* 64, 455 (2001)
98. J. E. Lawler, M. E. Wickliffe, E. A. den Hartog, C. Sneden. *Astrophys. J.* 563, 1075 (2001)
99. J. Tomkin, D. L. Lambert. *Astrophys. J.* 227, 209 (1979)
100. V. V. Smith. *Astron. and Astrophys.* 132, 326 (1984)
101. N. Kovacs. *Astron. and Astrophys.* 150, 232 (1985)
102. Gustafsson, B. *Modelling of stellar atmospheres*, 3. IAU (2003)
103. Kurucz, R. L. *Modelling of stellar atmospheres*, 45. IAU (2003)

104. G. P. di Benedetto, Y. Rabbia. *Astron. and Astrophys.* 188, 114 (1987)
105. D. E. Blackwell, M. J. Shallis. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 180, 177 (1977)
106. M. L. Houdashelt, R. A. Bell, A. V. Sweigart. *Astron. J.* 119, 1448 (2000)
107. A. W. J. Cousins. *South African Astronomical Observatory Circular* 8, 59 (1984)
108. J. D. Fernie. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 52, 7 (1983)
109. J.-C. Mermilliod. *Catalogue of Eggen's UBV data.* (1986) (1986)
110. L. Haggkvist, T. Oja. *Arkiv for Astronomi* 4, 137 (1966)
111. P. A. Jennens, H. L. Helfer. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 172, 667 (1975)
112. E. Watanabe, M. Yutani, Y. Yamashita. *Publications of the National Astronomical Observatory of Japan* 3, 1 (1993)
113. E. J. Mannery, G. Wallerstein. *Astron. J.* 75, 169 (1970)
114. The Hipparcos and Tycho Catalogues. ESA SP-1200 (1997)
115. T. Lanz. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 65, 195 (1986)
116. T. Lejeune, F. Cuisinier, R. Buser. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 125, 229 (1997)
117. Л. И. Антипова, А. А. Боярчук. *Астрон. журн.* 78, 807 (2001)