

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗВЕЗД ДИСКА И ГАЛО

В. Г. Ключкова

*Кратко перечислены основные результаты наблюдательных программ, выполненных автором на 6-м телескопе в 1978-1990 гг.*

*The main results of the observational programmes, that carried out by author with the 6-m telescope during 1978-1990, are reported briefly.*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В период 1978-1988 гг. на БТА был выполнен ряд программ спектроскопии с высоким спектральным разрешением обширных выборок звезд разных температур и светимостей. Основной целью исследования являлось определение количественных параметров, характеризующих особенности химического состава звездных атмосфер, проявляющиеся на различных эволюционных стадиях у звезд диска и гало Галактики. Ниже кратко представлены метод анализа и основные результаты.

Спектр каждой конкретной звезды содержит информацию как об ее физических параметрах, т. е. об условиях формирования спектральных линий, так и о предшествующей эволюции и принадлежности звезды к определенному типу населения. Отсюда следует, что, анализируя методом моделей атмосфер спектры звезд, принадлежащих разным населением Галактики, мы можем определить зависимость содержания химических элементов от атомного номера (т. н. кривую распространенности химических элементов). Привлекая обоснованные соображения о параметрах функции звездообразования и функции масс, можно восстановить химическую эволюцию Галактики. Для определения химического состава звезд, помимо наблюдательного материала, полученного в широком спектральном интервале со спектральным разрешением  $\delta\lambda$  и отношением  $S/N$ , позволяющими надежно измерять абсорбционные линии с эквивалентными ширинами до 10 мА, необходимы теоретические модели звездных атмосфер, адекватные реальным атмосферам, сведения об атомных константах и реалистическое описание процесса формирования спектральных линий.

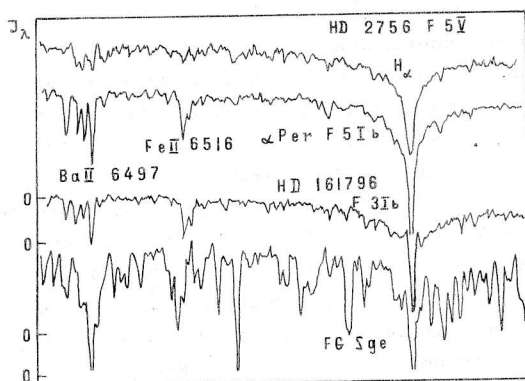
Подавляющая часть выводов работы сделана при изучении спектрограмм, полученных на Основном звездном спектрографе БТА. Была использована, главным образом, камера Шмидта N2 ОЗСП (F:2.5, фактор широкощельности 13). В зависимости от спектрального класса и металличности звезды использованы следующие два варианта наблюдений:

I. В области длин волн  $\lambda\lambda$  3700-4900А использовалась дифракционная решетка

600 штр/мм с углом блеска  $\phi=25^\circ$ , максимум концентрации света в третьем порядке, входная щель спектрографа имела ширину  $0.45''$ , обратная линейная дисперсия  $9 \text{ \AA/мм}$ , спектральное разрешение  $\delta\lambda=0.25 \text{ \AA}$  на фотопластинках Kodak 2a0, 103a0. Этот вариант применялся при наблюдениях горячих звезд спектральных классов В, Вр, А, Ар, а также в качестве вспомогательного, с целью изучения спектральных деталей, необходимых для определения параметров атмосфер F-звезд.

II. В области длин волн  $\lambda\lambda 5100-6800 \text{ \AA}$  использовалась дифракционная решетка 600 штр/мм с углом блеска  $\phi=17^\circ$ , максимум концентрации во втором порядке, входная щель  $0.45''$ , обратная линейная дисперсия  $14 \text{ \AA/мм}$ , спектральное разрешение  $\delta\lambda=0.35 \text{ \AA}$  на фотопластинках Kodak 103aF. Данный вариант выгоден для определения химического состава более холодных звезд спектрального класса F, т.к. наблюдения при этом выполняются в спектральном диапазоне, в котором осуществляется основное энерговыделение для F-звезд, кроме того, становятся доступными линии металлов, менее блендированные и слабые, по сравнению с линиями в голубой области спектра. Важным моментом является также возможность регистрировать при этом профиль водородной линии  $H_\alpha$ , который служит надежным индикатором эффективной температуры для F-карликов, практически неподверженным влиянию эффектов светимости и металличности. В результате развития динамических явлений в верхних слоях атмосфер F-звезд высокой светимости ядро линии  $H_\alpha$  искажено эмиссией, крылья профиля, используемые для определения параметров атмосферы, не искажаются. Фрагменты спектров, полученных в данном наблюдательном варианте, для четырех звезд разных типов, имеющих близкую эффективную температуру, приведены на рис. 1.

Рис. 1. Фрагменты спектров, регистрируемых на ОЗСП при помощи камеры F:2.5, для звезд близкой температуры на различных стадиях эволюции. HD161796 F3Ib - высокоширотный сверхгигант; переменная FG Sge с усиленными линиями редкоземельных элементов (интенсивности линий BaII  $\lambda 6497$  и  $H_\alpha$  сравнимы).



Сведения о проникающей способности ОЗСП для этих вариантов приведены в работе Бикмаева и др. (1986). Для увеличения фотометрической точности спектры в процессе наблюдений расширились до  $0.6 \text{ мкм}$ . Для достижения высокой степени однородности наблюдательных данных следует минимизировать ошибки, вносимые на этапе обработки спектрограмм. Поэтому плотность на спектрограммах поддерживалась в узком интервале около  $D=1.2$ . С этой же целью весь материал (свыше 900 спектров) был обработан автором единообразно по записям, полученным в прямых интенсивностях на микрофотометре SAO. Следует отметить, что полученный массив данных, однородных по эквивалентным ширинам и профилям линий в спектрах В, А, и F-звезд, стал основой спектрофотометрической системы ОЗСП БТА, послужившей фундаментом для создания ряда однородных каталогов эквивалентных ширин линий (Клочкова, 1991а; Клочкова, Панчук, 1987а; Клочкова и др., 1990). С применением сведений из указанных каталогов уже получены астрофизические результаты (Клочкова, Панчук, 1989а, б, 1990;

Клочкова, 1991б; Клочкова и др., 1991а).

Определение особенностей кривой распространенности химических элементов в работе выполнено с применением двух методических подходов.

Для объектов, атмосферы которых относительно надежно описываются современными моделями, был развит подход, элемент новизны которого состоит в сочетании преимуществ массовой прецизионной спектроскопии с достоинствами метода моделей атмосфер. До нас массовые спектроскопические наблюдения больших выборок звезд в однородной спектрофотометрической системе выполнялись только со средним и низким спектральным разрешением, хорошим примером является количественная классификация звездных спектров, выполненная Копыловым (1958а, 1960). Важной чертой нашего подхода считаем применение дифференциальной методики, распространенной нами на сравнение групп звезд, что снижает роль несовершенства современных моделей атмосфер, в частности, влияние отклонений от локального термодинамического равновесия (Густафссон, 1988). Для снижения значимости большинства методических эффектов в каждую из исследуемых групп были включены объекты, близкие по параметрам атмосфер, вследствие чего основной вклад в неопределенность среднего для данного типа звезд химического состава, как правило, вносят случайные ошибки наблюдений. При дифференциальном групповом методе определения химического состава ошибки определения параметров моделей из систематических становятся случайными и проявляются в виде дополнительной дисперсии среднего химического состава группы. Определение химического состава (металличность, содержание элементов  $\alpha$ -, s- и r-процессов) в атмосферах звезд спектральных классов А-Г в диске и гало выполнено с применением сетки бланкетированных моделей звездных атмосфер Куруча (1979). Основные параметры модели атмосферы - эффективная температура  $T_e$  и ускорение силы тяжести  $lgg$  - определялись путем сопоставления с теоретическими значениями наблюдаемых для данной звезды характеристик водородного спектра (профили и эквивалентные ширины линий нейтрального водорода  $H_\delta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\alpha$ , исправленные за межзвездное покраснение фотометрические индексы широкополосной UVV или узкополосной uvby,  $\beta$ -систем). Кроме того, использовались линии ионизационного равновесия для тех элементов группы железа, которые представлены в спектре звезды линиями с надежными силами осцилляторов как для ионов, так и для нейтральных атомов (Fe, Cr, Ti). Отметим, что в процедуре определения параметров модели спектральные критерии всегда предпочтительнее фотометрических, так как позволяют определять параметры атмосферы непосредственно для момента наблюдений спектра. Дополнительным недостатком фотометрических индексов является неопределенность, которая вносится на этапе исправления их за межзвездное поглощение, и систематические различия между наблюдаемыми и теоретическими показателями цвета.

Второй подход был развит для анализа спектров химически пекулярных звезд.

Уже на этапе построения системы двумерной спектральной классификации были выделены объекты с неклассифицируемыми спектрами, которые позднее были отнесены к так называемым химически пекулярным (CP) звездам. У этих звезд либо на этапе звездообразования, либо в ходе последующей эволюции вид кривой распространенности химических элементов в атмосфере искажался, по-видимому, за счет эффектов селективной сепарации атомов и ионов. Кроме того, чрезвычайно затрудняют анализ спектров CP-звезд сильные локальные и интегральные магнитные поля, наблюдаемые у подавляющей доли этих объектов. Магнитное поле может влиять на перенос излучения в линиях из-за эффекта Зеемана, может модифицировать (или полностью контролировать) механизм создания аномалий химического состава, а также может изменить

структуру атмосферы звезды за счет лоренцовых сил (Степень, 1978). Поскольку эти эффекты, несомненно, влияют на спектр звезды, а надежные модели атмосфер пекулярных звезд еще не построены, мы сочли конструктивным подход, развивающий идеи количественной спектральной классификации. Суть этого второго подхода состоит в том, что по спектральным деталям, нечувствительным к феномену пекулярности, определяются основные параметры атмосферы ( $T_e$ ,  $\lg g$ ), а для характеристики кривой распространенности вводятся количественные параметры (индексы пекулярности, см. Ключкова и др., 1981), развивающие феноменологические методы. Помимо спектральных деталей, мы использовали и фотометрические индексы, малочувствительные к проявлению пекулярности.

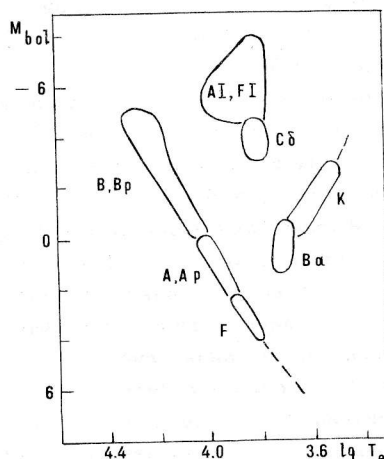
Основополагающим принципом обоих подходов является стремление, по возможности, исследовать звезды, входящие в состав генетически связанных галактических группировок: рассеянных и шаровых скоплений, а также динамических звездных потоков, что позволяет предполагать общность исходных условий формирования и последующей эволюции, а также относительно надежно фиксировать возраст, светимость, стадию эволюции исследуемых звезд. Наряду с этими преимуществами, наблюдения звезд в группировках заставляли преодолевать трудности работы на пределе проникающей способности использованных вариантов спектроскопических наблюдений на БТА. Поэтому выборка исследуемых звездных группировок была составлена так, чтобы в ночи с неудовлетворительными прозрачностью и качеством изображений время большого телескопа не терялось, а использовалось для наблюдений более ярких звезд программы.

## 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДИСКА ГАЛАКТИКИ

На рис. 2 указаны группы звезд, для которых с целью исследования спектроскопических проявлений эволюции атмосфер нами были выполнены наблюдения на ОЗСП БТА. Видим, что объем выполненных наблюдений позволяет анализировать не только спектральные характеристики каждого класса, но и рассматривать всю совокупность в эволюционной связи.

Рис. 2. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела для звезд диска Галактики. Отмечены группы звезд, химический состав которых исследован по наблюдениям автора на ОЗСП БТА:

- В - 73 нормальные В-звезды в скоплениях;
- Вр - 91 пекулярная Вр-звезда в скоплениях;
- А - 24 нормальные А-звезды в скоплениях и поле;
- Ар - 15 пекулярных Ар-звезд в скоплениях и поле;
- F - 18 F-карликов в скоплениях и поле;
- AI, FI - 6 А и F-сверхгигантов в скоплениях;
- Сδ - 25 классических цефеид в скоплениях и поле;
- Ва - 17 бариевых звезд, (Зач, 1989а, б, в, 1990);
- К - 10 К-гигантов в скоплениях, исследованы Мишениной (1985).



По современным представлениям (Марочник, Сучков, 1984) звезды галактического диска сформировались в процессе коллапса межзвездного газа, уже обогащенного тяжелыми элементами за счет первых поколений звезд в гало Галактики. Одним из

аргументов в пользу такой концепции является хорошая корреляция изменения металличности с кинематическими характеристиками звезд: звезды с  $[Fe/H] < -1$  принадлежат к практически невращающемуся гало, а более металличные - это объекты быстро вращающегося диска. Для уточнения истории диска прежде всего необходимо ответить на следующие вопросы:

- 1) существует ли радиальный градиент химического состава в диске;
- 2) согласуются ли значения радиального градиента, определенного по разным объектам (звезды-карлики, сверхгиганты, III-области);
- 3) каково соотношение возраст - химический состав;
- 4) как меняются относительные содержания элементов (типа  $[X/Fe]$ ) с изменением металличности (возраста);
- 5) однороден ли галактический диск, насколько эффективны процессы перемешивания межзвездного вещества;
- 6) насколько эффективны процессы обогащения межзвездного газа при переходе вещества из гало в диск;
- 7) каков возраст диска и его подсистем.

В нашей программе исследования химического состава диска получены результаты, позволяющие ответить на часть этих вопросов.

В программу были включены нормальные, т.е. не имеющие спектральных аномалий в системе МК-классификации звезды спектральных классов A и F в составе 8 звездных группировок диска в окрестностях Солнца (гелиоцентрические расстояния скоплений  $R \leq 1.5$  кпк), в диапазоне возраста  $t = 2 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^9$  лет (Клочкова, Панчук, 1985а, 1985б, 1986а, 1988а).

Ответ на вопрос об однородности диска должен быть дан на двух уровнях точности. Во-первых, необходимо получить представление о вариациях химического состава у исследуемых объектов для обоснования двух методов: метода моделей атмосфер и методов работы с эволюционными треками, поскольку как выбор моделей, так и выбор треков требуют априорной информации о содержании гелия  $Y$  и металличности  $Z$ . Во-вторых, используя полученную в первом приближении информацию, можно обратиться к исследованию более тонких эффектов химсостава (галактические градиенты, локальные неоднородности разных масштабов). Первый уровень был достигнут в работах Клочковой и Панчука (1985а, 1985б; 1986а, б; 1987б; 1988а). Итогом исследований является вывод о химической однородности галактического диска по металличности и содержанию гелия в изученной кольцевой зоне и вывод об отсутствии изменений металличности в течение последних  $\approx 4$  млрд. лет. Этот результат обосновывает: а) правомерность применения во всех исследованиях химического состава диска моделей атмосфер, рассчитанных для солнечной металличности; б) использование единой главной последовательности при определении расстояний до скоплений; в) использование одной и той же сетки изохрон для определения возрастов звездных группировок.

Вывод об однородности галактического диска был усилен за счет привлечения сведений о химическом составе звезд из каталога Клочковой и др. (1990). По данным этого каталога методом моделей атмосфер была определена металличность 115 A, F-звезд (Клочкова и др., 1991а) и оценена дисперсия содержания химических элементов (Клочкова, 1991б). Показано, что для большинства элементов группы железа и элементов, синтезируемых в  $\alpha$ - и s-процессах, вариации содержания в исследованной области галактического диска не превосходят  $\sigma^2 \lg \epsilon(X) = 0.1$ . Интересен факт повышенной дисперсии для некоторых тяжелых ионов:  $Sr^+$ ,  $Ba^+$ ,  $Sm^+$ ,  $Eu^+$ . Проще всего

этот разброс декларативно списать на методические ошибки (неучет сверхтонкой структуры линий, отклонения от условий локального термодинамического равновесия). Однако такое объяснение маловероятно, поскольку особенности предложенного ранее метода оценки среднего химического состава и его дисперсии для обширных выборок звезд (Клочкова и др., 1990) состоят в вычислении химического состава каждой звезды по эквивалентной ширине одной линии. При таком подходе средний химический состав выборки и его дисперсия оцениваются отдельно по каждой линии, таким образом, исключаются ошибки, возникающие из-за неточности сил осцилляторов, из-за блендирования и некорректного теоретического описания всей совокупности линий данного элемента. Возникновение повышенной дисперсии содержаний избранных тяжелых элементов может быть связано с различной степенью обогащения ими межзвездной среды вследствие различных условий синтеза, выноса на поверхность и потери вещества, весьма чувствительных к конкретным физическим параметрам звезды.

Из факта химической однородности молодого диска следует вывод о низкой эффективности процессов обогащения вещества диска в результате образования при эволюции звезд диска как элементов железного пика, так и элементов, синтезируемых в  $\alpha$ - и s-процессах. Однородность по железу и элементам  $\alpha$ -процесса свидетельствует о низком темпе образования массивных звезд в промежутке возрастов  $2 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^9$  лет. Однородность диска по элементам s-процесса может быть как результатом неэффективности обогащения межзвездной среды диска продуктами синтеза на стадии асимптотической ветви гигантов, так и отсутствием реакций нейтронизации вещества на этой стадии. По крайней мере, синтез элементов s-процесса в оболочках маломассивных звезд диска не может являться эффективным механизмом обогащения вещества диска из-за большого времени жизни маломассивных звезд. Теоретический анализ проблемы синтеза элементов s-процесса свидетельствует в пользу звезд промежуточных масс (Ибен и Рензини, 1983). В целом можно говорить об отсутствии на вышеуказанном интервале возрастов следов заметного обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами в результате эволюции звезд в широком интервале масс, что естественно объяснить подавлением звездообразования ранее, чем  $4-5 \cdot 10^9$  лет назад. Вся кривая распространенности химических элементов в молодом диске Галактики, совпадающая с солнечным химсоставом (возраст Солнца не менее 5 млрд. лет), отражает средний химический состав, сформированный в результате эволюции звезд гало.

Используя вывод об отсутствии значимых различий средних содержаний гелия в скоплениях, можем конкретизировать задачу о причинах наблюдаемой естественной ширины главной последовательности. На основании каталога эквивалентных ширин линий водорода и нейтрального гелия (Клочкова, Панчук, 1987а) мы определили абсолютные светимости 492-х звезд и рассмотрели возможные причины ширины ГП в координатах  $M_V, (U-B)_0$ . Показано, что разброс звезд на диаграмме нельзя объяснить различиями в скорости осевого вращения звезд, вариациями межзвездного поглощения, присутствием химически пекулярных и двойных звезд (Клочкова, Панчук, 1989б). Нельзя объяснить также ширину ГП ( $\approx 1^m$  в интервале светимости  $M_V$  от  $-5^m$  до  $+1^m$ ), различиями возрастов отдельных звезд, так как указанная ширина ГП дает различия в возрастах, превосходящие возрасты соответствующих скоплений. Накопленный наблюдательный материал позволяет изучить также связь между содержанием легких элементов и светимостью В-звезд, соответствующая программа выполняется (Пяткес, 1990).

Вторая ступень исследований химического состава диска основана на выводе о

химической однородности, полученном в первом приближении задачи. На этом этапе, привлекая сведения о кривой распространенности химических элементов, мы можем пытаться оценить величину и масштаб локальных неоднородностей в диске. На существование таких неоднородностей указывают сведения о сепарации химических элементов в межзвездной среде. Анализ спектроскопических ультрафиолетовых наблюдений межзвездного вещества в разных направлениях показывает, что степень разделения межзвездного вещества на газовую и пылевую компоненты, по-видимому, различна (Спитцер и Дженкинс, 1975). Не исключено, что дисперсия химического состава очень молодых звезд связана именно с этими неоднородностями. В работах по исследованию вариаций легких элементов (Браун и др., 1986) обнаружены вариации содержания азота от скопления к скоплению при постоянстве содержания углерода и кислорода. Установить природу локальных неоднородностей можно, сопоставляя вариации легких и тяжелых элементов. Так, если дисперсия содержания химических элементов в диске коррелирует с характеристиками, описывающими физику процесса разделения вещества атмосфер холодных звезд на газ и пыль (Филд, 1974), то основными механизмами создания неоднородностей могут оказаться механизмы сепарации вещества. Если будет обнаружена корреляция дисперсии химического состава с параметрами ионов, характеризующими разделение вещества в магнитном поле, то объектами, создающими неоднородности, могут оказаться магнитосферы более горячих звезд с поверхностными магнитными полями. Если же дисперсия химического состава изменяется в соответствии с ядерными характеристиками, например, увеличивается при переходе к очень тяжелым элементам, то ответственными за дисперсию химических элементов можно считать механизмы ядерного синтеза на реакциях нейтронизации. Дело в том, что цепочка реакций синтеза элементов s-процесса в зависимости от конкретных физических условий (плотность нейтронного потока, температура) в данной звезде может иметь различную эффективность синтеза более тяжелых элементов (ветвление s-процесса), что может приводить к повышенной дисперсии содержания тяжелых элементов в диске.

Прежде всего необходимо научиться отделять реальные неоднородности от мнимых, вызванных неточностями описания формирования линий тех или иных элементов. Так, например, вышеупомянутый случай увеличения дисперсии при переходе к тяжелым элементам может отражать и то обстоятельство, что из-за низкой абсолютной концентрации тяжелые элементы представлены зачастую только резонансными линиями. Примененный к этим линиям метод вычисления дисперсии содержания данного элемента в диске Галактики (Клочкова, 1991б) дает более высокое значение дисперсии, чем оценка дисперсии этого же элемента, выполненная по линиям, возникающим с высоко-возбужденных уровней.

Мы наблюдаем значительную дисперсию химического состава у звезд гало, но при переходе от гало к диску общее содержание тяжелых элементов возрастает примерно на 1.5 dex, поэтому большая относительная дисперсия химсостава звезд гало затухает на порядок превосходящими (в абсолютной шкале) флуктуациями химического состава диска. Следовательно, вариации химического состава диска можно рассматривать как независимые от исходных неоднородностей, характеризующих этап формирования гало. Если мы наблюдаем в целом химически однородное вещество диска, это означает, что либо выход химических элементов в результате каждого элементарного акта обогащения межзвездной среды одинаков (для звезд разных масс это невозможно представить), либо после эпохи бурного синтеза тяжелых элементов в гало (взрывы сверхновых) вещество относительно хорошо перемешалось. Наблюдения

старых остатков сверхновых в диске свидетельствуют об их химической неоднородности. Следовательно, неоднородное в результате эволюции гало вещество должно перемешиваться в диске за время, превосходящее время жизни старых остатков сверхновых в диске. Оценка характерного времени перемешивания вещества в диске ( $3 \cdot 10^9$  лет, Шацман, 1987) превосходит продолжительность галактического года, причем характерный масштаб выравнивания пространственных неоднородностей химического состава посредством диффузии составляет 3 кпк. Эту оценку следует иметь в виду при интерпретации попыток определения радиального градиента химического состава.

### 2.1. О градиенте химического состава в диске Галактики

Сведения о градиентах содержаний химических элементов, синтезируемых за счет разных процессов звездного нуклеосинтеза, необходимы для восстановления истории процессов звездообразования, в том числе, и для оценки функции масс на разных фазах эволюции Галактики. Имеющиеся представления о градиентах ограничены данными о градиенте металличности, полученными в основном из анализа фотометрических наблюдений (Майар, 1976; Джейнс, 1979; Харрис, 1981), а также о градиентах легких элементов (He, C, N, Ne, S, Ar), вычисленных в результате анализа спектров представителей предельно молодого населения Галактики - III-областей (Шэвер и др., 1983). Следовательно, большинство принципиальных моментов истории нуклеосинтеза в диске остается неконтролируемым посредством наблюдений.

Для уточнения картины нуклеосинтеза в Галактике, кроме совершенствования теории эволюции звезд различных масс и определения функции масс на разных фазах эволюции Галактики, необходимы данные о наблюдаемых радиальных градиентах химического состава. Сгруппированные по легким элементам, элементам группы железа и элементам  $\alpha$ - и s-процессов, эти данные могут указать на роль тех или иных объектов в обогащении вещества диска. Часть информации можно собрать, изучая спектры III-областей. Сведения по тяжелым, легкоионизируемым элементам могут быть получены только по звездам поздних типов с их перегруженными линиями спектрами. Сложность наблюдательной задачи состоит в том, что из-за слабости искомого градиента необходимы наблюдения в большом интервале галактоцентрических расстояний  $R_G$ . Это означает необходимость наблюдений и анализа ярких, проэволюционировавших звезд (сверхгиганты, классические цефеиды), поскольку F и G-карлики доступны даже 6-м телескопу лишь в ближайших окрестностях Солнца.

Для выявления эволюции градиента химического состава необходимо сопоставление значений градиентов, полученных по звездам разного возраста. Следовательно, программа исследования цефеид в будущем должна быть дополнена программой исследования старых объектов диска, имеющих высокую светимость.

В нашей программе, как средство исследования градиентов содержания элементов в диске, мы использовали выборку из 17 классических цефеид в интервале  $R_G = 8.8 - 11.0$  кпк (Клочкова, Панчук, 1991а). Для задачи такого рода цефеиды - наиболее удобные объекты, благодаря их высокой и надежно определяемой из соотношения период-светимость абсолютной звездной величине, что позволяет зондировать фиксированные области диска. Фаза пульсационной нестабильности - сравнительно краткий промежуток процесса эволюции массивных звезд, т.е. возрасты классических цефеид заключены в узком интервале, поэтому, получив химический состав для вы-



борки цефеид, мы имеем практически "мгновенный снимок" картины распределения химического состава диска. Перечисленные преимущества цефеид для диагностики химического состава диска, естественно, использовались и до нас (Лак, Ламберт, 1981; Харрис, Пилачовски, 1984). Однако сложность анализа спектров цефеид, обусловленная высокой светимостью, значительными динамическими явлениями в их протяженных атмосферах, высокой частотой двойных и переменностью этих сверхгигантов, не позволяла получить однозначные выводы по проблеме градиентов. Мы несколько продвинулись в решении этой задачи, существенно расширив выборку объектов, кроме того, нами предпринята попытка оценить фазовые эффекты для части исследованных цефеид. Для тестирования методики анализа в качестве звезды сравнения использован F-сверхгигант  $\alpha$  Per, являющийся членом молодого рассеянного скопления и имеющий параметры атмосферы, близкие к средним для цефеид. Химический состав  $\alpha$  Per, определенный нами методикой, используемой и для цефеид, не отличается от среднего химического состава скопления  $\alpha$  Per (Клочкова, Панчук, 1985а, 1988б).

Стремясь расширить диапазон галактоцентрических расстояний, что принципиально для оценки градиента, мы привлекли и результаты работ Лака, Ламберта (1981) и Харриса, Пилачовски (1984). Предварительно мы учли различия в способе определения эффективных температур разными авторами. Такая процедура позволила нам повысить точность определения градиента. Для диапазона  $R_G = 8-14$  кпк величина градиента содержания железа составляет  $d \lg \varepsilon(\text{Fe})/dR = -0.058$  кпк<sup>-1</sup>. Для снижения разброса мы вычислили металличность каждой звезды, усреднив с этой целью содержания элементов железного пика, значение градиента металличности  $d \lg \varepsilon(\text{Met})/dR = -0.049$  кпк<sup>-1</sup>. Однако, из-за большого разброса статистическая значимость обеих величин невысока, коэффициент корреляции с  $R_G$   $\rho = -0.30$  для железа и  $\rho = -0.43$  для металличности. Важно, что подобный разброс, превышающий ошибки метода, на зависимостях  $\lg \varepsilon(O, N) - R_G$  получен и для В-звезд в интервале  $R_G = 8.6-16.9$  кпк (Ламберт, 1989). Исследования химического состава звезд, членов рассеянных скоплений (Клочкова, Панчук, 1985а, б; 1986а; 1987б; 1988а; Фитцсиммонс и др., 1990) приводят к выводу о наличии внутри скоплений дисперсии химического состава, величина которой совпадает с дисперсией между скоплениями, в то время как средний химический состав скоплений значимо не отличается.

Таким образом, совокупность данных о содержании химических элементов, полученных по спектрам с высоким разрешением для звезд на различных расстояниях в Галактике, скорее говорит в пользу гипотезы об отсутствии значительного радиального градиента. С целью дальнейшей проверки этой гипотезы мы поставили и к настоящему времени завершили программу спектроскопических наблюдений еще 14 цефеид в интервале  $R_G = 11-20$  кпк. Для того, чтобы сохранить спектральное разрешение и фотометрическую точность, реализуемые на ОЗСП, был разработан автоколлимационный эшелле-спектрометр ЭСПАК (Клочкова и др., 1991б).

Наличие существенного разброса химического состава от звезды к звезде для фиксированного галактоцентрического расстояния может указывать на то, что радиальный градиент является недостаточной характеристикой поведения металличности в диске. К примеру, получены указания на то, что внутри спирального рукава радиальный градиент для величин O/N и N/H в 2-3 раза глубже, чем общий по диску (Талент, Дуфор, 1979). Дисперсия химического состава для нормальных звезд может быть следствием ряда физических процессов, изменяющих поверхностный химический состав: неселективная аккреция межзвездного газа, селективная аккреция газа, контролируемая локальными магнитными полями звезд, слабые проявления селективных

диффузионных процессов, звездный ветер, процессы перемешивания, которые могут выносить на поверхность продукты горения водорода. Определенная доля дисперсии может быть объяснена и методическими причинами: несовершенство используемых теоретических моделей, возможные отклонения от локального термодинамического равновесия и т.д., что особенно тревожит при анализе звезд с протяженными нестабильными атмосферами.

## 2.2. Особенности кривой распространенности у звезд диска Галактики, находящихся на различных стадиях эволюции

Информация о распространенности химических элементов в атмосферах звезд, наблюдаемых нами на разных стадиях звездной эволюции и принадлежащих разным популяциям в Галактике - единственная возможность получить представления о процессах звездного нуклеосинтеза, определить параметры функции масс и уточнить детали процесса звездообразования на разных фазах химической и динамической эволюции Галактики. Наш вклад в решение проблемы состоит в получении новой наблюдательной информации, необходимой для определения средней кривой распространенности химических элементов у выборок звезд принципиально различающихся типов: нормальные А- и F-звезды диска, А и F-сверхгиганты в диске, химически пекулярные звезды верхней части главной последовательности, бариевые звезды, классические цефеиды, звезды гало в поле на стадии горения гелия в ядре (звезды горизонтальной ветви шаровых скоплений), F-сверхгиганты на высоких галактических широтах (неправильные переменные типа UU Her), цефеиды гало, красные гиганты гало. Подавляющее большинство перечисленных типов звезд исследованы нами при помощи метода моделей атмосфер. Для каждого типа звезд исследовалась репрезентативная выборка, что повышает статистическую значимость выводов. Звезды внутри каждой выборки несущественно отличаются по фундаментальным параметрам, это позволяло применять для анализа единый подход в определении параметров, использовать одну сетку теоретических моделей, стандартный набор спектральных линий, отобранный по принципу наличия надежных атомных констант. Таким образом, можно надеяться, что полученные результаты не отягощены серьезными систематическими ошибками.

### 2.2.1. А- и F-карлики в составе скоплений и в поле Галактики

Кривая распространенности химических элементов  $\lg \epsilon(X)$  определена нами для 21 нормальной А-звезды в составе 7 звездных группировок (Клочкова, Панчук, 1985а), для 8 F-карликов из двух рассеянных скоплений и 5 F-карликов в поле (Клочкова, Панчук, 1988а). Это объекты наиболее низкой светимости, доступные нашим наблюдательным средствам с высоким спектральным разрешением. Низкая абсолютная светимость снимает часть трудностей анализа спектров методом моделей атмосфер. В качестве стандартов рассматривались звезды  $\theta$  Leo (Клочкова и др., 1985) и  $\alpha$  CMi (Клочкова, Панчук, 1988а). Сопоставление результатов для А- и F-звезд показывает, что систематические ошибки, вызванные переходом от температур  $\approx 10000$  К к температурам  $\approx 6000$  К, отсутствуют: обе выборки имеют кривую распространенности, в основном, совпадающую с таковой для Солнца. В то же время наблюдается существенное различие средних значений  $\lg \epsilon(X)$  и их дисперсий у А- и F-звезд для эле-

ментов Si, Ca, Ba. Мы считаем, что завышение этих средних значений и дисперсий для А-звезд реально и является отражением усиления линий перечисленных элементов в атмосферах этих звезд. Это следует из того, что содержания Si, Ca, Ba определены для А-звезд по слабым (до 100 mÅ) линиям, малочувствительным к неточностям моделей и теоретического описания линий. Кроме того, усиление вариаций химического состава у А-звезд не может быть объяснено и неоднородностью дозвездного вещества, из которого образовались звезды скопления, так как по элементам железного пика это вещество было достаточно однородно. В качестве возможной причины для усиления дисперсии химсостава и завышения средних его значений, по-видимому, следует считать проявления у части А-звезд феномена химически пекулярных звезд, не выраженного до той степени, чтобы его можно было выявить на уровне МК-классификации. Это тем более вероятно, что в программу исследования химического состава были включены медленно вращающиеся А-звезды, а замедленное вращение - неперменный атрибут СР-звезд.

#### 2.2.2. А и F-сверхгиганты, члены рассеянных скоплений

Проблемы количественной интерпретации спектров звезд высокой светимости сформулированы давно. Казалось бы, в задаче исследования химической эволюции Галактики следует избегать этих объектов, ограничиваясь звездами низкой светимости со "спокойными" атмосферами. Но интерес к химическому составу звезд на периферии Галактики и ярчайших звезд в ближайших галактиках заставляет обращаться к спектрам сверхгигантов. Проблема определения параметров атмосфер наиболее остро стоит для А-сверхгигантов, где наиболее вероятны различные эффекты отклонения от ЛТР. Наблюдая А-сверхгиганты в поле, мы лишены возможности независимой калибровки светимостей, т.е. лишены возможности определить, какие ошибки в определении  $\lg g$  допускаются при использовании тех или иных спектроскопических критериев. Поэтому мы выполнили спектроскопию 2-х А-сверхгигантов, принадлежащих рассеянному скоплению h и  $\chi$  Per, модуль расстояния которого надежно определен по спектрам В-звезд (Клочкова, Панчук, 1989б). Анализ спектров методом моделей атмосфер позволяет прийти к выводу о заметном отклонении от ионизационного равновесия для элементов железного пика.

Спектроскопическое исследование параметров атмосфер и химического состава 4-х F-сверхгигантов в составе рассеянных скоплений диска (их модули расстояния от  $6.17^m$  до  $14.84^m$ ) было промежуточным этапом в задаче определения эволюционного статуса переменных F-сверхгигантов типа UU Per (Клочкова, Панчук, 1988б). Несмотря на такой прикладной оттенок, спектроскопия F-сверхгигантов в скоплениях позволила получить ряд оригинальных астрофизических выводов. Во-первых, статистический анализ кривой распространенности химических элементов для F-карликов и F-сверхгигантов в скоплениях показал, что ни по одному из исследованных элементов не обнаружено значимых различий средних значений  $\lg \epsilon(X)$  для элементов группы железа, а также для элементов  $\alpha$ - и s-процессов. Это, прежде всего, подтверждает надежность методики анализа звезд с абсолютными величинами  $M_V < -3^m$ . Кроме того, получен дополнительный аргумент в пользу однородности диска и универсальности кривой распространенности в диске. Во-вторых, для F-сверхгигантов на основании их членства в скоплениях получена калибровочная зависимость  $M_V - \lg g$ .

### 2.2.3. Классические цефеиды

Параметры атмосфер и кривая распространенности химических элементов для выборки цефеид определялись, исходя из допущения, что в каждый момент наблюдений цефеиду можно рассматривать как неперемещенный объект со свойствами данной фазе параметрами:  $T_e$ ,  $\lg g$  и микротурбулентной скоростью  $\zeta_t$ , и применять к спектру стандартную методику анализа. Применимость стандартных ЛТР-моделей, построенных в приближении плоскопараллельных слоев в гидростатическом равновесии, к атмосферам пульсирующих сверхгигантов рассматривали Лак и Ламберт (1985), Лак и Бонд (1989), был сделан вывод о правомерности такого подхода, если избегать объектов с температурами  $T_e \leq 4000$  К и особо активных пульсационных фаз, связанных с прохождением ударных волн, что вызывает появление раздвоения и эмиссии в линиях металлов. Подчеркнем здесь, что в качестве температурного критерия для цефеид мы использовали неискаженные эмиссией детали профиля  $H_\alpha$ , поскольку применяемый для этих объектов метод определения  $T_e$  из условия больцмановского равновесия для атомов железа (Лак, Ламберт, 1981; Харрис, Пилачовски, 1984) вносит значительную систематическую ошибку в результаты: различие в содержании железа, которое, по видимому, объясняется проявлением не-ЛТР-эффектов для линий Fe с низкими потенциалами возбуждения нижнего уровня (Лак, Бонд, 1989), составляет около 0.25 dex (Клочкова, Панчук, 1991a). Что касается кривой распространенности для цефеид, то она, по сути дела, является кривой солнечного типа для элементов группы железа,  $\alpha$ - и s-процессов. Исключением для этого типа объектов являются элементы, участвующие в ядерных реакциях горения водорода в ядре звезды на стадии главной последовательности. Принято объяснять пониженное содержание углерода и кислорода выносом (first dredge-up) на поверхность цефеиды вещества с измененным в CN-цикле содержанием элементов C, N, O (Лак, Ламберт, 1985; Лак и Бонд, 1989).

### 2.2.4. Химически пекулярные звезды верхней части главной последовательности

В 1978-1985 гг. на ОЗСП БТА была выполнена спектроскопия 120 CP-звезд, входящих в состав 10 звездных группировок разного возраста (Клочкова, 1985). С целью выявления спектральной переменности для каждой звезды выполнено по 3-4 наблюдения (спектрограммы получены в разные ночи), для неперемещенных звезд это позволило увеличить спектрофотометрическую точность и исключить ошибки калибровки. Эта работа выполнялась с целью исследования закономерностей возникновения и последующей эволюции основных особенностей химически пекулярных звезд (аномалии химического состава, замедленное осевое вращение, поверхностные магнитные поля). Учитывая полученный по спектрам нормальных звезд вывод об однородности исследуемых скоплений по содержанию гелия и металлов, при определении светимости и возраста пекулярных звезд мы смогли использовать одну и ту же начальную главную последовательность и единую сетку изохрон. В интервале возрастов исследованных группировок ( $2 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^8$  лет) заметных эволюционных изменений перечисленных характеристик не обнаружено. Мы выдвинули предположение о том, что химические аномалии, замедленное вращение и магнитные поля возникают на стадии до главной последовательности (Клочкова, 1985).

Анализируя совокупность пекулярных и нормальных В-звезд в звездных группиров-

ках, мы обнаружили, что величина отношения эквивалентных ширин  $W(4387)/W(4471)$  снижается при переходе от нормальных В-звезд к звездам с ослабленными линиями гелия (He-weak) (Клочкова, Панчук, 1989а, б). Ввиду того, что используются самые сильные линии нейтрального гелия, этот новый критерий выделения He-weak-звезд может быть использован и для поиска пекулярных В-звезд в гало.

Среди химически пекулярных звезд верхней части главной последовательности выделен тип ртутно-марганцевых звезд. Пекулярность их спектров проявляется прежде всего в наличии абсорбционной линии ртути  $\lambda 3984 \text{ \AA}$ , что зачастую сопровождается и усилением линий ряда других элементов (Mn, P, Sr, Y, Zr). Среди других типов CP-звезд этот привлекателен для исследователей химического состава (Гутри, 1984; Адельман, 1989), так как Hg-Mn-звезды - непременные (это позволяет говорить о сравнительно однородном поверхностном химическом составе, без контрастных пятенных образований), предельно медленно вращающиеся звезды без заметных глобальных магнитных полей, что оправдывает применение стандартных моделей атмосфер.

В процессе выполнения нашей программы исследования CP-звезд в скоплениях образовалась коллекция спектров для 20 Hg-Mn-звезд. Кроме этого, в 1985 г. мы выполнили спектрофотометрию предельно молодых скоплений диска, где впоследствии также обнаружены пекулярные (в том числе и Hg-Mn) звезды (Пяткес, 1990). Для изучения эволюции параметров атмосфер Hg-Mn-звезд в настоящее время данный спектральный материал анализируется методом моделей атмосфер. Предварительно методика опробована на примере яркой Hg-Mn-звезды в галактическом поле HR4072, изученной по кудэ-спектрограммам 2-м телескопа НАО БАН (Добричев и др., 1989). Важным результатом данной работы мы считаем обоснование применимости для атмосфер Hg-Mn-звезд метода анализа атмосфер нормальных звезд.

Основные выводы по химическому составу HR4072:

а) звезда имеет солнечную металличность  $[Fe/H]=0.05$  по линиям FeI и  $[Fe/H]=-0.10$  по линиям FeII;

б) группа легких элементов (Mg, Si, Ca, Sc) слегка ослаблена ( $-0.24 \text{ dex}$ ) по отношению к Солнцу;

в) получен существенный ( $+1.3 \text{ dex}$ ) избыток марганца, как по линиям нейтрального атома, так и по линиям иона, причем для марганца наблюдается ионизационное равновесие. Линии марганца очень слабы, поэтому влиянием сверхтонкой структуры для них можно пренебрегать;

г) для группы s-процесса (Sr, Zr, Y, Ba) наблюдается избыток в среднем на  $1.2 \text{ dex}$ ;

д) для тяжелых металлов (Sm, Gd, Hg) получены избытки на 3 порядка;

е) на кривой распространенности есть отклонения от закона четности. Например, содержания нечетных элементов Mn и Y превышают содержания соседних четных Sr и Zr, соответственно. Это свидетельствует о влиянии процессов неядерного характера на содержания, в частности, марганца и стронция. Известно, что для CP-звезд весьма эффективны процессы диффузионной сепарации металлов. На примере марганца, основного "пекулярного" элемента для Hg-Mn-звезд, методом статистических подсчетов линий мы показали, что для ионизованного (основного при данных физических условиях) состояния марганца выполняются оба условия действительности диффузионного механизма, а именно: богатство абсорбционного спектра и низкая концентрация ионов марганца в атмосфере, по сравнению с FeII. В то же время, электронная конфигурация основного при данной температуре состояния атомов самых тяжелых элементов не способствует диффузии, а избытки их в атмосфере превышают один поря-

док;

ж) из факта отсутствия магнитного усиления линий для  $TiIII$ ,  $FeI$ ,  $FeII$  сделан вывод об отсутствии локальных поверхностных магнитных полей.

#### 2.2.5. Пекулярность и двойственность. Бариевые и металлические звезды

С целью выделения "методической" компоненты дисперсии химического состава следует анализировать данную проблему по группам звезд из достаточно широкого интервала температур. Кроме того, следует распространить анализ на группы звезд, относительно которых заведомо известно о пекулярном поведении линий избранных элементов. Как уже упоминалось, далеко не все типы  $Bp$  и  $Ap$ -звезд пригодны для анализа их спектров посредством однородных моделей. Следует использовать более холодные пекулярные звезды, атмосферы которых должны быть однородными вследствие конвекции в подстилающих слоях. Одним из наиболее удобных типов холодных пекулярных звезд являются бариевые звезды. Оценки массы и светимости этих звезд указывают тип объектов на главной последовательности, относительно которых желательно выполнить сравнение кривой распространенности, - это  $A$  и  $F$ -звезды. В этой же области ГП заселена пекулярными звездами  $A_{sh}$  и  $F_{sh}$  с усиленными линиями редкоземельных элементов. Кроме того, бариевые звезды следует анализировать дифференциально относительно нормальных  $K$ -гигантов. Именно из этих соображений сформировался круг объектов, особенности химического состава которых совокупно анализируются в работе Заца и др. (1991). Разумеется, предварительно были выполнены соответствующие наблюдения на БТА. Нашу коллекцию спектров  $A_{sh}$ -звезд в рассеянных скоплениях мы пока не стали подвергать анализу методом моделей атмосфер, так как одновременно аналогичные исследования наиболее ярких  $A_{sh}$ -звезд, доступных 2.6-м телескопу ЗТШ, выполнил Саванов (1986). Коллекцию спектров бариевых звезд исследовал Зац (1989а, б, в; 1990). Кратко суммируем итоги работы Заца и др. (1991).

Детальное исследование кривой распространенности элементов в атмосферах бариевых звезд подтверждает гипотезу об эволюционном статусе этих объектов, основанную на обнаружении периодических вариаций лучевых скоростей, интерпретируемых как проявление двойственности. Относительно низкая светимость объектов и отчетливо выделяемый избыток элементов  $s$ -процесса противоречат схеме эволюции одиночной звезды на стадии асимптотической ветви гигантов (AGB). Поэтому основу гипотезы об эволюционном статусе бариевых звезд составляет предположение о перемене ролей на стадии эволюции тесной двойной системы. Звезда-гигант, находящаяся на стадии AGB, может выработать дополнительное количество элементов  $s$ -процесса. В случае эволюции одиночной звезды это не обязательно приводит к изменению вида спектра - обогащенное тяжелыми элементами вещество может и не выноситься в атмосферу (Ибен, Рензини, 1983). Если стадия AGB достигается в тесной двойной системе, то не исключен перенос оболочки на вторичный компонент. Ультрафиолетовые наблюдения некоторых бариевых звезд свидетельствуют о наличии горячего спутника низкой светимости; возможно, что это объект, оставшийся после потери массы главным компонентом. При такой схеме легко избавиться и от затруднения, связанного с наличием в атмосферах бариевых звезд достаточно заметного количества лития (Зац и др., 1991). Если существует интенсивное перемешивание оболочки одиночной звезды, необходимое, чтобы экспонировать избыток тяжелых элементов, то

атмосферный литий должен разрушаться, попадая в те высокотемпературные области оболочки, где идут ядерные реакции. Если же мы наблюдаем вещество, выпавшее на поверхность вторичного компонента - субгиганта, то наблюдаемый литий может принадлежать атмосфере и оболочке вторичного компонента.

Для элементов, производство или разрушение которых на стадии AGB не ожидается, дисперсия содержания элемента для группы исследованных бариевых звезд минимальна; отсюда следует вывод об однородности вещества, из которого возникли системы, проэволюционировавшие к феномену бариевых звезд. В то же время средние кривые распространенности химических элементов в атмосферах бариевых и металлических звезд существенно различаются по содержанию Na, Si, Ca, Sc. Для тяжелых элементов наиболее принципиальным является различие в средних содержаниях европия, именно из этого различия следует вывод о различной природе избытков тяжелых элементов у обеих групп звезд. По Cr и Fe обе группы в среднем неотличимы от солнечного химического состава, различия в содержаниях V, Mn и Co значимы. Одинаковый знак этих различий и повышенная дисперсия содержания этих элементов в атмосферах Am-звезд также свидетельствуют в пользу диффузионной природы особенностей химического состава Am-звезд.

Результаты исследования кинематики Am и Ba-звезд (Хаккила, 1989) и вывод о совпадении средних масс этих объектов (Зач и др., 1991) позволили высказать гипотезу о том, что эти феномены соответствуют соседним эволюционным стадиям. В этом случае результаты детального сравнения кривых распространенности химических элементов приводят нас к выводу, что все отклонения содержаний элементов в атмосферах Ba-звезд обязаны нуклеосинтезу на поздних стадиях эволюции звезды средней массы, а все аномалии химического состава атмосфер Am-звезд произошли вследствие сепарации вещества.

Что касается оценки методического вклада в дисперсию химического состава вещества диска Галактики, то в работе Зача и др. (1991) такая методическая компонента выделена. Оказалось, что дополнительный вклад в естественную, космическую дисперсию химического состава зависит от температуры исследуемой группы звезд (см. также работу Ключковой и др., 1989).

### 3. ЗВЕЗДЫ НА ВЫСОКИХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ШИРОТАХ. ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС ЗВЕЗД ТИПА UU HER

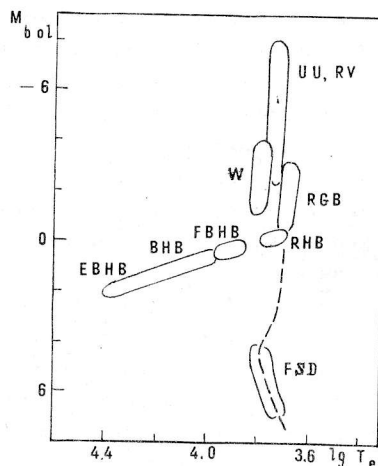
На рис. 3 отмечены все типы звезд гало, для которых мы выполнили наблюдения на ОЗСП БТА. Указаны также субкарлики, исследуемые И.Ф. Бикмаевым. Кроме того, отмечены две завершённые наблюдательные программы, выполненные с применением двумерного счетчика фотонов: на эшелле-спектрометре Зебра исследовано 27 звезд горизонтальной ветви в шаровых скоплениях, на эшелле-спектрометре ЭСПАК исследованы цефеиды старого населения (7 звезд типа W Vir). Видим, что как и в случае звезд диска, наблюдениями охвачена совокупность звезд, достаточная для комплексного анализа спектроскопических проявлений эволюции атмосфер звезд гало. Рассмотрим вначале результаты наблюдений звезд, занимающих, по-видимому, промежуточное положение между двумя типами населения Галактики.

Надежность применяемой методики, проверенная на опыте анализа F-сверхгигантов в скоплениях и цефеид, позволила обратиться к решению нетрадиционных задач - исследованию химического состава звезд на продвинутых стадиях эволюции. Одна из

подобных задач - изучение звезд типа UU Her (Клочкова, Панчук, 1988б, в, 1989в).

Рис.3. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела для звезд гало. Отмечены группы звезд, химический состав которых исследован по наблюдениям автора на БТА.

- UU - 8 F-сверхгигантов на высоких галактических широтах;
- FBHB - 11 звезд голубой части горизонтальной ветви в поле;
- RHB - 2 звезды красной части горизонтальной ветви в поле;
- RGB - 11 звезд ветви красных гигантов в поле, анализ химического состава выполнен Таутвайшене и Страйжисом (1989);
- EBHB, BHB - 27 звезд горизонтальной ветви в шаровых скоплениях;
- W - 7 звезд типа W Vir;
- RV - 1 переменный сверхгигант типа RV Tau, анализ химического состава выполнен Борисовым и Панчуком (1986);
- FSD - программа исследования F-субкарликов в поле, выполняемая Бикмаевым (1987).



Популяция этих неправильных переменных, наблюдаемых на высоких широтах Галактики, выделена сравнительно недавно по двум противоречивым признакам: это звезды спектрального класса F с высокой абсолютной светимостью, что обычно ассоциируется с принадлежностью к молодому населению диска, находящиеся, если их светимость определена верно, на больших расстояниях от плоскости Галактики ( $z > 1 \text{ кпк}$ ). Впервые Сэсселов (1984) систематизировал сведения, касающиеся этих объектов и выделил их в особый тип UU Her. В нашу программу вошли 8 сверхгигантов на высоких галактических широтах (FHGL) из списка Сэсселова, в том числе и звезда UU Her - прототип данного класса объектов. Из дальнейшего анализа мы были вынуждены исключить звезды HD51832, 73759, 85039, поскольку на основании наших спектрограмм они оказались быстро вращающимися объектами с широкими линиями металлов, что не позволяет выделять неблендированные линии металлов.

Определение стадии эволюции столь нестандартных объектов весьма интересно. Если они являются молодыми массивными сверхгигантами, это свидетельствует об их малом возрасте, а следовательно, о недавнем звездообразовании в гало. Отметим, кстати, что в гало Галактики изучена выборка горячих O, B-звезд с нормальным солнечным химическим составом (Кинан и др., 1986). Вероятна и другая гипотеза, вытекающая из факта экстремально высокой абсолютной светимости, - звезды типа UU Her проходят стадию эволюции после асимптотической ветви гигантов. Для выяснения эволюционного статуса звезд типа UU Her ключевым фактором представляются сведения о металличности, относительных содержаниях химических элементов, абсолютной светимости и кинематике.

Основная трудность при анализе сверхгигантов - определение абсолютной светимости этих звезд. Формальное использование фотометрических индексов не может привести к однозначному результату из-за неопределенности их эволюционной стадии, в результате чего необоснован выбор линии истинных цветов.

Для определения светимости звезд типа UU Her нами были получены спектрограммы для нормальных F-сверхгигантов в составе рассеянных скоплений диска. Членство в



скоплениях давало возможность использовать, во-первых, средний модуль расстояния для скопления, во-вторых, - средние значения избытков цвета  $E(B-V)$ , определенные по звездам главной последовательности в этих скоплениях. Вследствие такого подхода была получена статистическая зависимость между абсолютной величиной  $M_V$  и ускорением силы тяжести  $\lg g$ , определяемым по спектрам методом моделей атмосфер. Для увеличения числа точек при построении калибровочной зависимости мы привлекли сведения о величине  $\lg g$  для нескольких цефеид диска, абсолютная звездная величина которых определялась из соотношения период-светимость (Фист, Уокер, 1987). Коэффициент корреляции полученной зависимости  $\rho=0.96$ , что позволяет считать ее вполне надежной. Абсолютные звездные величины для FHGL, полученные с этой калибровкой, свидетельствуют о том, что эти звезды - абсолютно самые яркие объекты Галактики, среди них встречаются объекты с  $M_V < -8^m$ . Для звезды UU Her  $M_V = -8.2^m$ . Эта же звезда является рекордсменом по расстоянию от плоскости Галактики:  $z=16.5$  кпк. По содержанию железа  $[Fe/H]=-1.2$  dex и по лучевой скорости (Сэсселов, 1984) это типичная звезда гало.

В спектрах звезд типа UU Her линия  $H_\alpha$ , наш стандартный критерий эффективной температуры для F-звезд, зачастую искажена эмиссией, переменной во времени, поэтому для определения  $T_e$  были использованы контуры  $H_\delta$ ,  $H_\gamma$ , для их построения снимались спектрограммы в синей области длин волн. Из-за переменности объектов, проявляющейся и в фотометрии, определение параметров модели и кривой распространности химических элементов выполнялось отдельно для каждой спектрограммы, после выяснения отсутствия в результатах различий, превышающих уровень методических ошибок, последующий сравнительный анализ выполнялся по характеристикам, усредненным для каждого сверхгиганта. Контролем методики анализа FHGL являются результаты исследования непременных F-сверхгигантов в скоплениях (Клочкова, Панчук, 1988б, в). Было проведено сравнение кривой распространности химических элементов для этих сверхгигантов с аналогичными результатами, полученными нами ранее для F-карликов в скоплениях. Статистический анализ показал, что ни по одному из химических элементов нет значимых различий величин  $\lg \epsilon(X)$  между F-карликами и F-сверхгигантами в рассеянных скоплениях.

Выборку объектов FHGL мы расширили, добавив звезды с аналогичными свойствами: HD105262 (Клочкова, Панчук, 1987в), HD46703 (Лак, Бонд, 1984), HD29574, 37828 и BD+18°271 (Лак, Бонд, 1985). Выводы об основных особенностях химического состава, приведенные ниже, получены нами именно для этой расширенной выборки объектов типа FHGL. Содержание железа в среднем понижено на  $-0.90$  dex по сравнению с F-звездами диска, причем имеется хорошая корреляция ( $\rho=0.92$ ) содержания железа и расстояния звезды от плоскости Галактики, что позволяет определить градиент металличности по координате  $z$ :  $d[Fe/H]/dz = -0.18$  dex/кпк. Эта оценка впервые получена по данным спектроскопии и неплохо согласуется с градиентом металличности, полученным по результатам DDO-фотометрии G- и K-гигантов (Йосс и др., 1987).

Уже из двух выводов о дефиците железа и о высокой абсолютной светимости можно предполагать, что FHGL находятся на продвинутой стадии эволюции после асимптотической ветви гигантов и не принадлежат молодому населению диска. Гипотеза о стадии после-AGB была выдвинута Бондом и Лаком (1987), однако пока нет полного набора доказательств для ее обоснования. На стадии асимптотической ветви гигантов (AGB) в недрах звезд идут ядерные реакции горения углерода или неона, которые являются поставщиками свободных нейтронов. Согласно расчетам Ибена и Рензини (1983) плотность нейтронного потока и продолжительность нейтронной экспозиции

достаточно для синтеза тяжелых элементов (Sr, Y, Zr, Ba). На стадии эволюции с двумя слоевыми источниками за счет неустойчивости горения водорода и гелия в тонких слоях и возникновения конвекции возможен вынос на поверхность синтезированных элементов s-процесса (dredge up). Причем тепловые пульсации, связанные с гелиевым слоем, обеспечивают экспоненциальное распределение нейтронных экспозиций, что необходимо для воспроизведения кривой распространенности тяжелых элементов. Однако для FHGL не обнаружен избыток элементов s-процесса:  $[Y/Fe] = -0.63 \text{ dex}$ ,  $[Ba/Fe] = -0.46 \text{ dex}$  по отношению к F-сверхгигантам диска. Имеется ряд предположений для объяснения наблюдаемого сверхдефицита элементов s-процесса у FHGL. Одной из гипотез была гипотеза о дефиците водорода в атмосферах FHGL (Ибен, Рензини, 1983; Бонд, Лак, 1987; Лак, Бонд, 1989), что приемлемо для объектов на столь продвинутой стадии эволюции, после гелиевой вспышки, потери большей части оболочки, перемешивания вещества. Но такое предположение может объяснить аномалии кривой распространенности для экстремально малометаллических FHGL наподобие HD46703 ( $[Fe/H] = -2.5$ ) или UU Her, но не проходит для основной части FHGL. Вероятным представляется объяснение сверхдефицита элементов s-процесса за счет повышенной по сравнению с условиями JTP ионизации ионов этих элементов, имеющих низкий потенциал второй ионизации. Такое объяснение было предложено Уоллерстейном для W Vir (Бэркер и др., 1971) и достаточно подробно анализируется Лаком и Бондом (1989). В пользу такого объяснения говорит существенное занижение содержания и легкого элемента с низким потенциалом второй ионизации Sc, содержание которого определяется также по ионам и не изменяется за счет ядерных процессов на данной стадии эволюции. Но в то же время нет сверхдефицита для титана, его содержание по линиям ионов и линиям нейтрального элемента согласуется. Сомнение в отношении сверхионизации вызывает также отсутствие явления сверхдефицита  $[s/Fe]$  у нормальных F-сверхгигантов и у цефеид, в атмосферах которых физические условия близки к атмосферам FHGL. Можно считать, что наблюдаемый сверхдефицит реален и означает либо отсутствие условий для s-процесса, либо неэффективность перемешивания и выноса вещества на поверхность (Клочкова, Панчук, 1989б; Лак, Ламберт, 1989). Предположению есть теоретические подтверждения (Буссо и др., 1988). В этом случае на поверхности FHGL мы наблюдаем первоначальный химический состав межзвездной среды, из которой они образовались.

Из предложенных объяснений наиболее приемлемым, по нашему мнению, может быть неэффективность выноса продуктов ядерных реакций в поверхностные слои или же недостаток времени для развития этого процесса. Возможно, что одним из необходимых условий эффективности выноса является эволюция звезд в составе тесной двойной системы, при этом продукты нуклеосинтеза на поверхность звезды могут быть перенесены в процессе обмена веществом с более продвинувшегося в эволюции спутника. Подобная схема возникновения значительных избытков тяжелых элементов является основной, например, для пекулярных красных гигантов с усиленными линиями бария (Ba-звезды) (МакКлюр, 1983; МакКлюр и др., 1980). Для ряда Ba-звезд определена функция масс, свидетельствующая о присутствии в паре маломассивного компонента, возможно, белого карлика.

#### 4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗВЕЗД НА СТАДИИ ГОРЕНИЯ ГЕЛИЯ В ЯДРЕ

Результаты исследования методом моделей атмосфер нескольких групп звезд в

диске позволили нам распространить метод дифференциальной групповой спектроскопии и на звезды гало, выбирая для сравнения в диске соответствующую по температуре и светимости группу звезд.

Химическая история старых звезд Галактики традиционно исследуется по относительно ярким К-гигантам с дефицитом металлов. Что касается этих объектов, то здесь мы ограничились разработкой методики спектральных наблюдений на мелкозернистых эмульсиях Kodak IIIaJ, а также выполнили наблюдения для выборки из 11 К-гигантов гало. Анализ этих спектров выполнен литовскими коллегами (Таутвайшене, Страйжис, 1989). Аналогичная работа по спектрам звезд красной части горизонтальной ветви (Клочкова, Таутвайшене, 1989) показала полное соответствие методов анализа, используемых в Институте физики АН ЛитССР и САО АН СССР и опирающихся на опыт САО.

В отличие от К-гигантов, прошедших стадию первого или второго dredge-up, вследствие чего их атмосферы могут демонстрировать изменение химического состава в процессе ядерной эволюции на стадии главной последовательности и после гелиевой вспышки, химический состав F и G-субкарликов, по-видимому, отражает химический состав дозвездного вещества. На ОЗСП БТА в 1984-1988 гг. выполнены наблюдения 50 звезд данного типа, получены первые результаты (Бикмаев, Панчук, 1986; Бикмаев, 1987).

Кроме этих двух наиболее часто встречающихся представителей населения гало, существуют немногочисленные группы объектов на относительно кратковременных стадиях эволюции. Вероятность обнаружения короткоживущей стадии в окрестностях Солнца низка, поэтому счет объектов, доступных спектроскопии высокого разрешения, идет на единицы. В частности, значительный интерес представляют наблюдения звезд на эволюционной стадии горизонтальной ветви шаровых скоплений, аналоги этой стадии выделены и в поле Галактики. Принципиальными вопросами теории звездной эволюции являются вопросы о массах оболочки и гелиевого ядра, светимости, скорости вращения, относительных содержаниях химических элементов  $[X/Fe]$  в атмосфере после гелиевой вспышки, возможного выноса на поверхность вещества из внутренних слоев, участвующих в ядерных реакциях.

#### 4.1. Звезды горизонтальной ветви в окрестностях Солнца

В нашу программу изучения звезд на стадии HB вошли 13 объектов на голубой части горизонтальной ветви (ВНВ-звезды) (Клочкова, Панчук, 1985в, 1987в, 1988г, 1988д) и 2 звезды красной части горизонтальной ветви (Клочкова, Таутвайшене, 1989).

Методика анализа химического состава для HB-звезд в принципе не отличается от анализа звезд диска. Естественно, что использовались малометаллические модели атмосфер Куруча (1979). Кроме того, был применен более рафинированный способ определения микротурбулентной скорости (Клочкова, Панчук, 1985в).

Исследованная выборка звезд оказалась неоднородной - по совокупности сведений: абсолютным величинам, скоростям вращения, относительным обилиям элементов - мы не подтвердили принадлежность трех объектов к стадии горизонтальной ветви. Ниже приводятся результаты, усредненные по выборке из 10 ВНВ-звезд.

Анализ данных Куруча (1979) показал, что в исследуемом интервале температур практически все параметры водородных линий сохраняются при переходе от моделей с

солнечным химическим составом к моделям с  $[Fe/H] = -1.5$ . Это позволило применить для определения абсолютных величин калибровку эквивалентных ширин линии  $H_\gamma$  по светимости, полученную по звездам диска с использованием данных Копылова (19586). Среднее значение абсолютной величины ВНВ-звезд  $M_V = 0.08^m \pm 0.13^m$ . Среднее значение скорости вращения  $v \sin i = 21 \pm 5$  км/с, оценка этой величины важна для проблемы потери углового момента в процессе гелиевой вспышки. Среднее значение металличности относительно А-звезд диска  $[Fe/H] = -1.34 \pm 0.10$ . Сравнение кривой распространности химических элементов для ВНВ-звезд интересно выполнить с группой А-звезд диска из-за близости физических условий в атмосферах и с группой малометаллических К-гигантов гало из-за эволюционной связи их со звездами на стадии горизонтальной ветви. В результате такого сопоставления были получены следующие выводы. Во-первых, среди ВНВ-звезд отсутствуют экстремально малометаллические объекты, с  $[Fe/H] < -2$  dex. Это может быть вызвано малой встречаемостью таких предельно старых звезд на столь короткой стадии эволюции. Но можно предложить и другую причину: Фузи-Печчи и Рензини (1975) показали, что при большом дефиците металлов из-за высокого темпа потери массы на стадии красного гиганта масса гелиевого ядра может оказаться меньше минимально необходимой для гелиевой вспышки, т.е. стадия горизонтальной ветви может не реализоваться. Кроме того, есть и третье объяснение отсутствия ВНВ-звезд с экстремально низкой металличностью: после гелиевой вспышки в ядре и сброса оболочки наблюдаемые поверхностные слои звезды могут быть обеднены водородом, в результате получаемые величины  $[Fe/H]$  искусственно завышены. Во-вторых, для ВНВ-звезд мы получили статистически значимый избыток легких элементов, синтезируемых в  $\alpha$ -процессе ( $[Mg/Fe] = +0.47$ ), и статистически значимый сверхдефицит тяжелых элементов s-процесса ( $[Sr/Fe] = -0.56$ ,  $[Ba/Fe] = -0.75$ ). Причем получено хорошее совпадение аномалий на кривой распространности для ВНВ-звезд и для К-гигантов гало, исследованных Лаком и Бондом (19856) с применением иного спектрального диапазона и иной сетки теоретических моделей. В-третьих, среди выборки ВНВ-звезд мы выделили звезду HD161817, которая по признаку аномального усиления содержания стронция и хрома является аналогом химически пекулярных звезд диска. Мишо и др. (1983) показали, что за счет процесса диффузионного разделения атомов и ионов в стабильных атмосферах звезд на стадии горизонтальной ветви для избранных элементов могут образоваться существенные избытки содержания тяжелых элементов.

Помимо звезд на голубой части горизонтальной ветви, были исследованы две звезды (Клочкова, Таутвайшене, 1989), отнесенные на основании критериев Вильнюсской фотометрической системы (Страйжис и др., 1981) к стадии красной части горизонтальной ветви (RHB). Для анализа этих сравнительно холодных гигантов ( $T_{\text{eff}} \approx 5500$  K) использованы теоретические модели атмосфер Белла и др. (1976). На основании полученных параметров атмосфер, металличности, кривой распространности химических элементов и сведений о лучевых скоростях обе исследованные звезды были отнесены нами к старой подсистеме диска Галактики, называемой иногда толстым диском (Норрис, Грин, 1989). Типичными представителями толстого диска являются старые рассеянные скопления M67, NGC188. Из принадлежности к этой популяции можно считать, что возраст исследованных звезд до 10 млрд. лет (Сэндидж, 1988). Отметим, что RHB-звезды - самые старые объекты диска в нашей программе. Их средняя металличность  $[Fe/H] = -0.4$  dex по отношению к солнечной. Интересно, что для гиганта BD +12° 1919 из M67 (возраст скопления  $5 \cdot 10^9$  лет по данным Тварога и Энтони-Тварога (1989)) металличность составляет  $[Fe/H] = -0.18$  dex (Мишенина, 1985). Что

касается кривой распространенности, то для RHB-звезд, как и в случае VHB-звезд, получен избыток легких элементов (O, Na, Si), что является следствием нуклеосинтеза на предыдущих фазах эволюции, но не обнаружен сверхдефицит элементов s-процесса (Y, Ba). Европий у RHB-звезд ведет себя, как типичный первичный (по отношению к s-процессу) элемент, его содержание пропорционально содержанию железа.

#### 4.2. Звезды горизонтальной ветви в шаровом скоплении M4

Особый интерес в задаче исследования химического состава старых населений Галактики представляют звезды в шаровых скоплениях, где четко фиксируется стадия эволюции звезды. Во-первых, членство в скоплении позволяет сравнить последовательные фазы эволюции: горизонтальную ветвь, ветвь красных гигантов, асимптотическую ветвь гигантов, на каждой из которых можно пытаться изучать результаты нуклеосинтеза и выноса вещества в поверхностные слои на предшествующих стадиях. Во-вторых, важно понять, являются ли звезды в поле Галактики полными аналогами своих прототипов в шаровых скоплениях. Для VHB-звезд мы получили такую возможность, используя наблюдения двух VHB-звезд в скоплении M4 и общих с нашим списком звезд в поле из работы Кодайры и Филипа (1984а, 1984б). Выполнив редукцию эквивалентных ширин в нашу систему, мы применили к материалу нашу стандартную методику анализа. Проведенное затем сравнение средних  $\lg \epsilon(X)$  по двум звездам из M4 и по нашей выборке VHB-звезд в поле говорит о совпадении химического состава этих двух групп звезд. Следующий важный момент: полученная нами оценка металличности шарового скопления M4 по звездам горизонтальной ветви совпала с оценкой металличности по индексу  $\Delta S$  звезд типа RR Lyr из этого скопления. В результате снято противоречие между оценками металличности звезд разных типов в одном скоплении, которое отмечено Кодайрой и Филипом (1984а). Металличность и другие параметры атмосфер для HB-звезд из M4 оказались близкими к таковым у исследованных нами HB-звезд в поле Галактики, что говорит в пользу их принадлежности к одной стадии эволюции.

#### 4.3. Голубые звезды на горизонтальной ветви шаровых скоплений

При исследовании звезд горизонтальной ветви в галактическом поле затруднительно ответить на центральный вопрос эволюции старых маломассивных звезд: почему, при фиксированной для данного химического состава массе красного гиганта, претерпевающего гелиевую вспышку, звезды попадают не в одну точку горизонтальной ветви нулевого возраста, а располагаются вдоль всей горизонтальной ветви? Принято считать, что положение звезды на горизонтальной ветви определяется ее массой, следовательно, в процессе гелиевой вспышки красный гигант может потерять различную долю вещества. Массы звезд самого голубого конца горизонтальной ветви приближаются к массе гелиевого ядра. Металличность красного гиганта определяет его светимость и, следовательно, темп потери массы на стадии, непосредственно предшествующей гелиевой вспышке. Наблюдая горячие субкарлики в галактическом поле, мы лишены возможности оценить светимость и химический состав предшествующей эво-

люционной стадии - красного гиганта. Поэтому ключевой задачей данной проблемы является задача детальной спектроскопии ВНВ-звезд в составе шаровых скоплений.

Эта задача является предельно достижимой для современных крупных телескопов. Действительно, анализируя рис. 2 из работы Калои и др. (1986), где приведены спектры ВНВ-звезд, зарегистрированные на телескопах 4-м класса со счетчиком фотонов, приходим к выводу, что надежным измерениям поддаются только линии водорода и ни о каком исследовании химического состава по этим спектрам не может быть и речи. В 1987 г. на БТА введен в эксплуатацию эшелле-спектрометр Зебра со счетчиком фотонов (Гажур и др., 1990). Тогда же нами была начата и в настоящее время завершена программа исследования предельно слабых ВНВ-звезд в составе избранных шаровых скоплений. Спектральное разрешение  $\delta\lambda \approx 1.5\text{ \AA}$  достаточно для поставленной задачи определения содержания легких элементов. С целью стандартизации нового варианта наблюдений мы выполнили также спектрофотометрию 20 относительно ярких (8-9 зв. вел.) В-звезд в рассеянных скоплениях, исследованных нами ранее на ОЗСП фотографическим методом. В шаровых скоплениях М13, М15, М71, М92 получены спектры 27 звезд на голубой части горизонтальной ветви. Для некоторых скоплений нам удалось выполнить спектрофотометрию как самых холодных, так и самых горячих представителей голубой части горизонтальной ветви. Это дает возможность изучить свойства атмосфер ВНВ-звезд в зависимости от доли массы, потерянной на этапе гелиевой вспышки. Из сравнения эшелле-спектров звезд на продленной (extended) части горизонтальной ветви с эшелле-спектрами молодых звезд спектрального класса В0 следует, что для анализа спектров горячих ВНВ-звезд, по-видимому, необходимо рассчитать модели атмосфер звезд с кривой распространенности химических элементов, заметно отличающейся от солнечной.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше были изложены основные результаты, полученные нами на 6-м телескопе по программам исследования параметров атмосфер и химического состава для выборок звезд, которые мы наблюдаем на принципиально различающихся стадиях звездной и галактической эволюции: нормальные и пекулярные карлики вблизи главной последовательности и сверхгиганты в звездных группировках разного возраста "тонкого" диска Галактики; классические цефеиды в диске; F-сверхгиганты на высоких галактических широтах, принадлежащие промежуточному типу населения - "толстому" диску; звезды гало в поле на стадии горизонтальной ветви шаровых скоплений. Кроме того, завершены наблюдательные программы ВНВ-звезд в шаровых скоплениях и звезд типа W Vir в поле.

К числу наиболее важных результатов мы относим также вывод о достаточности накопленного однородного спектрального материала для постановки ряда задач теории звездных спектров. В числе основных задач назовем: описание спектра нейтрального гелия как для нормальных, так и для химически пекулярных В-звезд, описание спектров А-сверхгигантов, описание спектров горячих субкарликов на горизонтальной ветви, описание спектров большинства типов химически пекулярных Ар-звезд, описание спектров пульсирующих звезд диска и гало. С этой целью необходимо развивать теорию моделей атмосфер звезд с протяженными нестабильными атмосферами, теорию формирования линий в условиях отклонения от ЛТР, при наличии магнитных полей и неоднородностей химического состава, накапливать сведения об

атомных константах, создавать и уточнять списки спектральных линий.

Основной нашей наблюдательной программой на БТА в ближайшие годы мы считаем наблюдения с высоким спектральным разрешением ( $\lambda/\delta\lambda \approx 3 \cdot 10^4$  и  $S/N > 50$ ) звезд в составе избранных шаровых скоплений на последовательных фазах эволюции: красные гиганты до и после гелиевой вспышки в ядре, звезды разной массы на горизонтальной ветви, звезды на асимптотической ветви гигантов и звезды, эволюционирующие к стадии планетарной туманности. Мы считаем, что анализ параметров атмосфер, сопоставление относительных содержаний химических элементов для звезд указанных типов даст определенные ответы на вопросы, связанные с нуклеосинтезом, перемешиванием, выносом вещества в процессе эволюции звезды. Кроме того, появится возможность независимой оценки вклада не-ЛТР-эффектов в перекося кривой распространности элементов у звезд гало. Действительно, определяя химический состав шарового скопления по спектрам звезд ветви гигантов и существенно более горячих А-звезд горизонтальной ветви, мы сможем однозначно эмпирически оценить роль не-ЛТР-эффектов в создании сверхдефицита тяжелых элементов и избытка элементов  $\alpha$ -процесса. Естественно, что такая наблюдательная задача потребует, прежде всего, создания на БТА соответствующей спектральной аппаратуры (Клочкова и Панчук, 1991б).

В заключение выражаю признательность своим коллегам Копылову И.М., Панчуку В.Е., Мишениной Т.В., Цымбалу В.В., Зачу Л.А., Галазутдинову Г.А. за помощь на отдельных этапах данного исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Адельман (Adelman S. J.): 1989, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **239**, 487.  
Белл и др. (Bell R. A., Eriksson K., Gustafsson B., Nordlund A.): 1976, *Astron. & Astrophys.*, **23**, 37.  
Бикмаев И. Ф.: 1987, *Астрофиз.исслед.* (Изв. САО), **25**, 3.  
Бикмаев И. Ф., Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1986, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **23**, 118.  
Бикмаев И. Ф., Панчук В. Е.: 1986, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.*, **49**, 40.  
Бонд, Лак (Bond H. E., Luck R. E.): 1987, *Space Telescope Sci. Inst., Prepr. Ser.*, No. **182**, 9.  
Борисов Ю. В., Панчук В. Е.: 1986, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **22**, 17.  
Браун и др. (Brown P. J. F., Dufton P. L., Lennon D. J., Keenan F. P., Kilkenny D.): 1986, *Astron. & Astrophys.*, **155**, 113.  
Буссо и др. (Busso M., Piccio G., Gallino R., Cheffi A.): 1988, *Astrophys. J.*, **326**, 196.  
Бэркер и др. (Barker T., Baumgart L. D., Butler D., Cudworth K.M., Kemper E., Kraft R. P., Lorre J., Rao N. K., Reagan G. H., Soderblom D. R.): 1971, *Astrophys. J.*, **165**, 67.  
Гагур Э. Б., Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1990, *Письма в астроном. ж.*, **16**, 473.  
Густафссон (Gustafsson B.): 1988, *The Impact of Very High S/N Spectroscopy on*

- Stellar Physics. Eds. Cayrel de Strobel and M. Spite, 333.
- Гутри (Guthrie B. N. G.): 1984, Mon. Not. R. Astron. Soc., 206, 85.
- Джейнс (Janes K. A.): 1979, Astrophys. J. Suppl. Ser., 39, 135.
- Добричев В. М., Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Райкова Д. М.: 1989, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 27, 3.
- Зач Л. А.: 1989а, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв., 60, 57.
- Зач Л. А.: 1989б, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв., 60, 70.
- Зач Л. А.: 1989в, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв., 63, 160.
- Зач Л. А.: 1990, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв., 65, 45.
- Зач Л. А., Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1991, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 33, 29.
- Ибен, Рензини (Iben I., Renzini A.): 1983, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 21, 271.
- Йосс и др. (Yoss K. M., Neese C. L., Hartkopf W. J.): 1987, Astron. J., 94, 1600.
- Калои и др. (Caloi V., Castellani V., Danziger J., Gilmozzi R., Cannon R. D., Hill P. W., Boksenberg A.): 1986, Mon. Not. R. Astron. Soc., 222, 55.
- Кинан и др. (Keenan F. P., Brown P. J. F., Lennon D. J.): 1986, Astron. & Astrophys., 155, 333.
- Клочкова В. Г.: 1985, Кандидатская диссертация. Тарту.
- Клочкова В. Г.: 1991а, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв., 66, 5.
- Клочкова В. Г.: 1991б, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 34, 31.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1985а, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 20, 16.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1985б, Письма в астрон. ж., 11, 692.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1985в, Астрон. ж., 62, 552.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1986а, Письма в астрон. ж., 12, 446.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1986б, Письма в астрон. ж., 12, 928.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1987а, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв., 54, 5.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., 1987б, Письма в астрон. ж., 13, 56.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1987в, Астрон. ж., 64, 74.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988а, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 26, 14.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988б, Письма в астрон. ж., 14, 77.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988в, Письма в астрон. ж., 14, 933.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988г, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 26, 27.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., 1989а, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 27, 103.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., 1989б, Препринт Спец. астрофиз. обсерв., № 31, 2.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1989в, Письма в астрон. ж., 15, 617.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., 1990, Письма в астрон. ж., 16, 619.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., 1991а, Письма в астрон. ж., 17, 536.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., 1991б, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 33, 3.
- Клочкова В. Г., Таутвайшене Г. Ю.: 1989, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 28, 103.
- Клочкова В. Г., Копылов И. М., Кумайгородская Р. Н.: 1981, Письма в астрон. ж., 7, 366.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Цымбал В. В.: 1985, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 19, 22.
- Клочкова В. Г., Мишенина Т. В., Панчук В. Е.: 1989, Письма в астрон. ж., 15, 315.



- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Федорова О. В.: 1990, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 29, 84.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Цымбал В. Е.: 1991а, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 33, 41.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Рядченко В. П.: 1991б, *Письма в астроном. ж.*, 17, 644.
- Кодайра, Филип (Kodaira K., Philip A. G. D.): 1984а, *Astrophys. J.*, 278, 201.
- Кодайра, Филип (Kodaira K., Philip A. G. D.): 1984б, *Astrophys. J.*, 278, 208.
- Копылов И. М.: 1958а, *Известия Крымск. астрофиз. обсерв.*, 20, 123.
- Копылов И. М.: 1958б, *Известия Крымск. астрофиз. обсерв.*, 20, 156.
- Копылов И. М.: 1960, *Известия Крымск. астрофиз. обсерв.*, 22, 189.
- Куруч (Kurucz R. L.): 1979, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 40, 1.
- Лак, Бонд (Luck R. E., Bond H. E.): 1984, *Astrophys. J.*, 279, 729.
- Лак, Бонд (Luck R. E., Bond H. E.): 1985, *Astrophys. J.*, 292, 559.
- Лак, Бонд (Luck R. E., Bond H. E.): 1989, *Astrophys. J.*, 342, 476.
- Лак, Ламберт (Luck R. E., Lambert D. L.): 1981, *Astrophys. J.*, 245, 1018.
- Лак, Ламберт (Luck R. E., Lambert D. L.): 1981, *Astrophys. J.*, 298, 782.
- Ламберт (Lambert D. L.): 1989, In: *Cosmic abundance of matter*. Ed. C.J. Waddington, New York.
- Майар (Mayor M.): 1976, *Astron. & Astrophys.*, 48, 301.
- МакКлюр (McClure R. D.): 1983, *Astrophys. J.*, 268, 264.
- МакКлюр и др. (McClure R. D., Fletcher J. M., Nemes J. M.): 1980, *Astrophys. J., Letters*, 238, L35.
- Марочник Л. С., Сучков А. А.: 1984, *Галактика*. М.: Наука.
- Мишенина Т. В.: 1985, *Кандидатская диссертация*, Одесса.
- Мишо и др. (Michaud G., Vauclair G., Vauclair S.): 1983, *Astrophys. J.*, 267, 256.
- Норрис, Грин (Norris J. E., Green E. M.): 1989, *Astrophys. J.*, 337, 272.
- Пяткес С. А.: 1990, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 32, 106.
- Саванов И. С.: 1986, *Кандидатская диссертация*, Ленинград.
- Спитцер и Дженкинс (Spitzer L. Jr., Jenkins E. B.): 1975, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 13, 133.
- Степень (Stepien K.): 1978, *Astron. & Astrophys.*, 70, 509.
- Страйжис В., Баркявичюс А., Спераускас Ю.: 1981, *Астроном. цирк.*, No. 1161, 1.
- Сэндидж (Sandage A.): 1988, *Space Telescope Sci. Inst., Prepr. Ser.*, No. 288, 1.
- Сасселов (Sasselov D.): 1984, *Astrophys Space Sci.*, 102, 161.
- Талент, Дуфор (Talent D. L., Dufour R. J.): 1979, *Astrophys. J.*, 233, 888.
- Таутвайшене Г. Ю., Страйжис В. Л.: 1989, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 27, 88.
- Тварог, Энтони-Тварог (Twarog V. A., Anthony-Twarog V. J.): 1989, *Astron. J.*, 97, 759.
- Филд (Field G. B.): 1974, *Astrophys. J.*, 187, 453.
- Фист, Уокер (Feast M. W., Walker A. R.): 1987, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 25, 345.
- Фитцсиммонс и др. (Fitzsimmons A., Brown P. J. E., Dufton P. L., Lennon D. J.): 1990, *Astron. & Astrophys.*, 232, 437.
- Фузи-Печчи, Рензини (Fusi-Peccini F., Renzini A.): 1975, *Astron. & Astrophys.*, 39, 413.

- Харрис (Harris H. C.): 1981, *Astron. J.*, **86**, 707.
- Харрис, Пилачовски (Harris H. C., Pilachowski C. A.): 1984, *Astrophys. J.*, **282**, 655.
- Шацман (Schatzman E.): 1987, *Astron. & Astrophys.*, **172**, 1.
- Шэвер и др. (Shaver P. A., McGee R. X., Danks A. C., Pottasch S. R.): 1983, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **204**, 53.

Поступила в редакцию  
25 декабря 1990 г.