

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ F- И G-КАРЛИКОВ С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕТАЛЛОВ

1. АНАЛИЗ СПЕКТРА ЖЕЛЕЗА

И. Ф. Бикмаев

Обсуждаются задачи и проблемы спектроскопического исследования F- и G-карликов с пониженным содержанием металлов. Рассмотрены методические вопросы определения содержания железа $[Fe/H]$ в атмосферах этих звезд. Показано, что погрешность определения составляет $\Delta [Fe/H] = \pm 0.2 \div 0.3$ и ограничена не качеством фотографических наблюдений, а неопределенностями в параметрах атмосфер. Содержание железа определено для девяти F- и G-карликов, для четырех из них впервые спектроскопически. Сравнение с результатами других авторов показывает хорошее согласие.

Tasks and problems of spectroscopic study of metal-poor F- and G-dwarfs are discussed. Methodical questions of determination of iron abundance $[Fe/H]$ in the atmospheres of these stars are considered. It is shown that an accuracy of determination is $\Delta [Fe/H] = \pm 0.2 \div 0.3$ and is limited not by quality of photographic observations but by uncertainties in the atmosphere parameters. Iron abundance has been determined for 9 F- and G-dwarfs, for the first time for 4 of them it was determined spectroscopically. A comparison with the results of other authors shows a good agreement.

Содержание химических элементов в атмосферах звезд является основным параметром при построении картины химической эволюции Галактики. Несмотря на прогресс в наблюдениях и теории, эта картина остается неполной и фрагментарной [1, 2]. Необходимы более систематические и однородные наблюдения для того, чтобы ответить на ряд важных вопросов эволюции гало и диска Галактики: как часто происходили вспышки звездообразования в гало и диске; однозначна ли связь между химическим составом, кинематикой и возрастом звезд и т. д.

F- и G-карлики с различным содержанием металлов являются удобными объектами при исследовании некоторых проблем эволюции Галактики. С одной стороны, в их спектрах представлены линии большого числа элементов, с другой — эти объекты попадают в широкий диапазон возрастов (1—10 млрд. лет).

Наиболее надежные определения содержания химических элементов дает спектроскопия высокого разрешения в сочетании с анализом спектра методом моделей атмосфер. (Под высоким спектральным разрешением в данном случае будем подразумевать такое, при котором возможно непосредственное измерение эквивалентных ширин и центральных глубин линий в спектрах, без привлечения метода синтетических спектров). Однако наблюдения F- и G-карликов с высоким спектральным разрешением ($\lambda/\Delta\lambda > 10^4$) требуют большого количества наблюдательного времени и способны охватить сравнительно небольшой объем пространства в окрестностях Солнца (с радиусом 100—120 пк). Исследование химического состава таких звезд в более далеких областях Галактики доступно лишь спектроскопии низкого разрешения и фотометрии.

Наиболее распространенной и подходящей при исследовании металличности F-карликов оказалась четырехцветная среднелосная фотометрическая система $uvby$ (система Стрёмгрена), часто дополняемая узкополосной фотометрией линии H_β Кроуфорда [3, 4]. Использование специализированных телескопов позволяет методом четырехцветной фотометрии охватить достаточно большое число звезд в окрестностях Солнца. В каталоге [5] собраны наблюдения примерно для 20 тыс. звезд в этой системе. Статистический анализ большого числа

фотометрических измерений металличности позволил выявить ряд тонких эффектов в эволюции диска Галактики [6, 7].

Калибровка индексов металличности низкодисперсионной спектроскопии и фотометрических систем основана на высокодисперсионных спектроскопических определениях содержания железа (величины $[Fe/H]$) в атмосферах звезд. По определению,

$$[Fe/H] = \log \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_* - \log \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{\odot}, \quad (1)$$

где N_{Fe}/N_H — отношение полного числа атомов железа к числу атомов водорода. Величина $[Fe/H]$ характеризует содержание железа в звезде относительно солнечного содержания железа $[Fe/H]_{\odot} = 0.0$.

Надежность калибровок зависит от точности и однородности спектроскопических определений $[Fe/H]$. В последнем издании каталога [8] содержится всего лишь около 100 звезд F0—G5, IV—V—VI классов светимости с дефицитом металлов ($[Fe/H] < 0.0$), для которых имеются спектроскопические определения $[Fe/H]$, выполненные по фотографическим спектрам с дисперсией лучше 20 Å/мм.

Неоднородность спектрофотометрических данных, использование различающихся шкал эффективных температур, сил осцилляторов спектральных линий, методов анализа (кривые роста, модели атмосфер) и т. д. приводит к тому, что для одних и тех же звезд даже спектроскопические определения содержания железа могут существенно различаться у разных авторов, особенно это проявляется для звезд с очень малым содержанием металлов ($[Fe/H] = -2$).

ТАБЛИЦА 1
Сводка определений $[Fe/H]$
из каталога [8] для трех F-звезд
с пониженным содержанием
металлов

HD 165908 B = 5.57	HD 106516 B = 6.58	HD 84937 B = 8.71
-0.51	-0.86	-2.21
-0.45	+0.05	-3.18
-0.39	-0.10	-1.84
-0.42	-0.65	-1.50
-0.53	-0.61	
	-0.91	

В табл. 1 в качестве примера приводятся определения величины $[Fe/H]$ для трех звезд с различным содержанием металлов, взятые из каталога [8].

Необходимо дальнейшее расширение выборки звезд со спектроскопическими определениями величины $[Fe/H]$, по возможности в однородной в наблюдательном отношении системе и с применением однородного метода анализа спектров.

Как отмечалось выше, получение спектров с высоким разрешением требует больших затрат наблюдательного времени, поэтому однородные выборки у различных авторов не превышают 20—25 звезд [9, 10].

Наблюдения и задачи исследования. Программа наблюдений F- и G-карликов с пониженным содержанием металлов составлена на основе каталога А. А. Барквичюса [11]. Она включает в себя около 50 звезд. Примерно для половины из них нет спектроскопических определений $[Fe/H]$.

В течение 1984—1985 гг. на 2-й камере Основного звездного спектрографа 6-м телескопа (БТА) получены около 80 спектров для 40 звезд программы в варианте наблюдений: обратная линейная дисперсия $D = 9$ Å/мм, спектральный диапазон $\lambda = 4000 \div 4900$ Å, спектральное разрешение $\Delta\lambda = 0.3$ Å ($\lambda/\Delta\lambda = 1.5 \cdot 10^4$). Предельная звездная величина выборки составляет $B = 8.5 \div 9$ и определяется возможностями указанного варианта наблюдений при наилучших погодных условиях (изображения 1—2", хорошая прозрачность) [12]. Спектральное разрешение $\Delta\lambda = 0.3$ Å, а также используемая при анализе спектров сетка моделей атмосфер Куруца [13] ограничивают выборку ранними G-карликами ($T_{эф} > 5500$ К).

В ходе спектроскопического исследования звезд программы предполагается решение следующих задач:

1) определение содержания железа в атмосферах исследуемых звезд для расширения и уточнения спектроскопических определений $[Fe/H]$, используемых при калибровке индексов металличности фотометрических систем и низкодисперсионной спектроскопии;

2) определение содержания ряда химических элементов (Ca, Cr, Ti и др.), линии которых присутствуют в спектрах исследуемых звезд;

3) уточнение и совершенствование методических сторон анализа спектров методом моделей атмосфер;

4) исследование некоторых звездно-астрономических проблем эволюции гало и диска Галактики.

Проблемы спектроскопического исследования F- и G-карликов с пониженным содержанием металлов. Прежде чем переходить к анализу спектра железа, остановимся на ряде основных моментов спектроскопического исследования F- и G-карликов с пониженным содержанием металлов, с которыми нам пришлось столкнуться.

1. Малочисленность исследуемых звезд в окрестностях Солнца.

Согласно [3], в окрестностях Солнца ближе 100 пк карлики с $[Fe/H] < -0.6$ составляют лишь 5—13 % от общего числа звезд поздних спектральных классов. Небольшое число звезд, доступных спектроскопии, ограничивает возможность исследования ряда закономерностей в эволюции диска и гало, которые из-за индивидуальных различий звездных атмосфер необходимо изучать на статистически значимом уровне.

2. Невозможность определения прямыми методами параметров атмосфер ($T_{эф}$, $\log g$, ξ_t) F- и G-карликов с пониженным содержанием металлов.

Эта проблема является одной из основных, поэтому рассмотрим ее подробнее. Для определения содержания химических элементов в атмосферах звезд необходимо знать ряд основных параметров атмосферы — эффективную температуру ($T_{эф}$), ускорение силы тяжести ($\log g$), микротурбулентную скорость (ξ_t). Неопределенности в этих параметрах влияют на точность определения содержания химических элементов.

а) Эффективная температура.

Как правило, на практике эффективная температура звезд определяется по показателям цвета какой-либо фотометрической системы ($B-V$, $R-I$, $b-y$ и др.). На эти показатели цвета в разной степени влияет содержание металлов [3], поэтому эффект химического состава приходится учитывать предварительно. Для F-звезд хорошим индикатором температуры является индекс β , получаемый из узкополосной фотометрии линии H_{β} . Как известно [4], этот индекс не зависит от межзвездного покраснения и содержания металлов, но, к сожалению, его чувствительность к температуре падает при температурах ниже 6000 К.

Обзор основных методов калибровок эффективной температуры для звезд различных спектральных классов и светимостей сделан в работе [14]. Калибровка температуры для F- и ранних G-карликов подробно обсуждается в работе [15]. Построение шкалы эффективных температур B—G-звезд — спектrophотометрических стандартов — рассмотрено в работе [16].

Проблема определения эффективной температуры F- и G-карликов является самостоятельной и достаточно сложной, поэтому здесь мы кратко отметим следующее.

1) Наиболее надежные значения эффективной температуры дают так называемые прямые методы [14]. Они основаны на определении $T_{эф}$:

$$F(R) = \sigma T_{эф}^4,$$

где $F(R)$ — поток от звезды с радиусом R ; σ — постоянная Стефана—Больцмана.

Чтобы получить значение $T_{эф}$, необходимо знать полный поток от звезды от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона и радиус звезды. К сожалению, среди F- и G-карликов прямое определение температуры сделано только для Проциона (α CMi) и Солнца. Это связано с наблюдательными ограничениями прямых методов определения радиусов звезд. Непосредственное измерение радиусов звезд-карликов возможно лишь при помощи интерферометров интенсивностей [15, 17], а также из наблюдений затменно-двойных систем [17]. Возможности интерферометра интенсивностей ограничены звездами третьей величины ранних спектральных классов (до F5—F6) [15], и ни один из F- и

G-карликов с дефицитом металлов не входит в известные затменно-двойные системы. Поэтому для этих звезд в настоящее время нет прямых определений температуры.

2) Следующими по точности определения $T_{эф}$ являются «полупрямые» или «непрямые» методы. В основе этих методов лежит сравнение наблюдаемых потоков и распределений энергий в звездах с вычисленными на основе моделей атмосфер. Калибровка «полупрямых» методов опирается на прямые определения эффективной температуры. На основе расчетов синтетических спектров вычисляются теоретические показатели цвета различных фотометрических систем и далее строятся зависимости цвет—температура, которые обычно и используются на практике при определении эффективных температур по наблюдаемым показателям цвета [15]. Несмотря на то что приводимая авторами [2, 15, 18] внутренняя точность определения $T_{эф}$ по различным показателям цвета

ТАБЛИЦА 2
Эффективные температуры F-карликов,
полученные прямыми и полупрямыми методами, К

BS 1543 π^3 Ori $V = 3.18$ F6 V	BS 2943 α CMi $V = 0.37$ F5 IV-V	BS 5447 σ Boo $V = 4.47$ F2 V	Ссылка
6470	6640	6750	[15]
6373	6600	6696	[15]
6600	6600	6935	[16]
6150	6278		[16]
	6500		[19]

($B-V$, $R-I$, $b-y$) достигает $\pm(75 \div 100)$ К, реальная неопределенность в эффективной температуре F- и G-карликов составляет $\Delta T = \pm 200$ К [14]. Для примера в табл. 2 приводим эффективные температуры трех F-карликов, полученные прямыми и полупрямыми методами, т. е. наиболее точные определения $T_{эф}$.

б) Ускорение силы тяжести $\log g$.

Наиболее точные определения ускорения силы тяжести получают из наблюдений двойных систем по массам и радиусам компонентов [17]. Как уже отмечалось, исследуемые F- и G-карлики с дефицитом металлов не входят в двойные системы. Поэтому приходится использовать косвенные методы определения $\log g$:

1) по индексу c_1 системы $uvby$, характеризующему величину бальмеровского скачка [4];

2) через соотношение

$$\log L/L_{\odot} = \log M/M_{\odot} - \log g/g_{\odot} + 4 \log T_{\odot}/T_{\odot} \quad (2)$$

связывающее основные физические параметры звезд [4];

3) из условия ионизационного равновесия для линий одного и того же элемента в соседних стадиях ионизации.

Крылья водородных линий нечувствительны к $\log g$ в интервале температур, соответствующем F- и G-карликам (7000—5600 К) [4, 13]. Неопределенность в $\log g$ при использовании методов 1—3, по нашим оценкам, составляет $\Delta \log g = \pm 0.2 \div 0.3$.

в) Микротурбулентная скорость ξ_t .

Прямой способ определения микротурбулентной скорости основан на фурье-анализе профилей линий в спектрах с разрешением лучше 0.1 \AA [17] что возможно лишь для самых ярких звезд.

Параметр микротурбулентная скорость ξ_t мы определяем общепринятым способом [20, 21] из условия независимости содержания какого-либо элемента от эквивалентной ширины линий. Чаще всего ввиду многочисленности в спектрах используются линии Fe I.

На рис. 1 приведены зависимости $\log \varepsilon(\text{Fe}) - W_\lambda$ ($\log \varepsilon(\text{Fe}) = \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})$ *) при трех значениях микротурбулентной скорости для звезды HD 106516. Микротурбулентная скорость ξ_t находится из условия равенства нулю коэффициента наклона s_W зависимости $\log \varepsilon(\text{Fe}) - W_\lambda$ (рис. 2). Расчеты показывают, что неопределенность в микротурбулентной скорости в среднем составляет $\Delta \xi_t = \pm 0.5$ км/с.

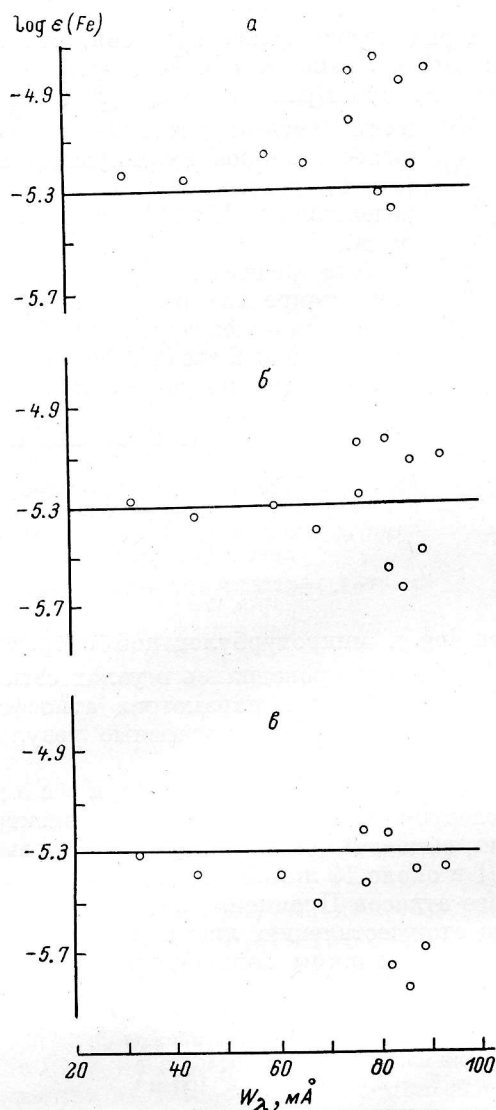


Рис. 1. Зависимость $\log \varepsilon(\text{Fe}) - W_\lambda$ при трех значениях микротурбулентной скорости ξ_t (по FeI) для звезды HD 106516.

a — $\xi_t = 1.5$, *б* — 2.0, *в* — 2.5 км/с.

3. Ограниченность модельных описаний звездных атмосфер.

Любая модель является лишь некоторым приближением реальной атмосферы звезды. Так, например, существующие модели описывают атмосферы F- и G-звезд одной эффективной температурой. Однако результаты ряда исследований указывают на присутствие сильной температурной неоднородности по поверхности F-звезд. Так, в работе [22] обнаружено аномальное усиление линий металлов с эквивалентной шириной $W_\lambda > 150$ мÅ в F-карликах Гиад, что невозможно описать моделью с фиксированным набором $T_{\text{эф}}$, $\log g$, ξ_t . В работе [19] показано, что непрерывный и линейчатый спектры Проциона описываются

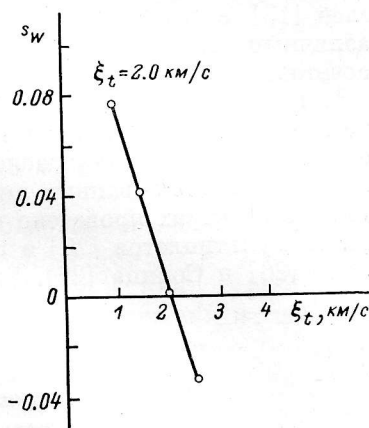


Рис. 2. Определение параметра микротурбулентная скорость ξ_t из условия равенства нулю коэффициента наклона (s_W) зависимости $\log \varepsilon(\text{Fe}) - W_\lambda$.

моделями с различной эффективной температурой. Температурные неоднородности в фотосфере Солнца (G2 V) наблюдаются непосредственно. По-видимому, эффект температурной неоднородности можно ожидать и при анализе атмосфер F- и G-карликов с дефицитом металлов.

Как будет показано ниже, перечисленные моменты существенно определяют точность результатов при анализе спектров.

Анализ спектра железа. Величина $[\text{Fe}/\text{H}]$ является «опорной» при исследовании различных процессов нуклеосинтеза в Галактике [1, 2, 10] и, как указывалось выше, служит основой калибровки индексов металличности фотометриче-

ских систем. Поэтому исследование F- и G-карликов пониженной металличности мы начнем с анализа спектра железа.

Расчет содержания железа $\log \epsilon$ (Fe) мы проводим по линиям Fe I и Fe II при помощи сетки моделей атмосфер [13] с использованием программы WIDTH 6.

В данной работе рассматривается ряд методических вопросов, связанных с определением содержания железа: выбор линий Fe I и Fe II для расчетов $\log \epsilon$ (Fe), влияние неопределенностей в параметрах атмосфер ($T_{\text{эф}}$, $\log g$, ξ_t)

на точность определения содержания железа, вопрос нуля шкалы [Fe/H], результаты сравнения с определениями [Fe/H] другими авторами.

Для решения данных методических вопросов выполнены расчеты содержания железа на основе измерений спектров 9 звезд программы, различающихся по эффективной температуре.

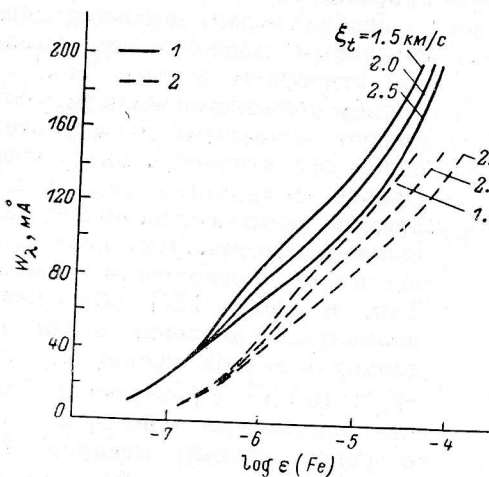


Рис. 3. Чувствительность линий Fe I и Fe II с различными эквивалентными ширинами к неопределенности в микротурбулентной скорости ξ_t .

1 — Fe I, $\lambda=4222.22 \text{ \AA}$; 2 — Fe II, $\lambda=4515.34 \text{ \AA}$.

ратуре $T_{\text{эф}}$, ускорению силы тяжести $\log g$, микротурбулентной скорости ξ_t , содержанию железа [Fe/H] (табл. 6). Расчеты проводились в узлах сетки моделей [13] с различными комбинациями основных параметров атмосферы и различным набором линий Fe I и Fe II. Ниже приводим основные результаты расчетов.

1. Выбор линий Fe I и Fe II для определения содержания железа. В спектрах исследуемых звезд при указанных спектральном разрешении и диапазоне можно выделить около 50 неблендированных или слабо блендированных линий Fe I и около 10 линий Fe II. Отождествление линий в спектрах проведено на основе атласов Проциона [23] и Солнца [24], таблиц мультиплетов [25] и работ по отождествлению линий в спектре Проциона [26] и Солнца [27]. Эквивалентные ширины большинства выделенных

ТАБЛИЦА 3

Пример расчета содержания железа \log (Fe) для звезды HD 106516 в узлах сетки моделей атмосфер [13]. Микротурбулентная скорость $\xi_t = 2.0 \text{ км/с}$; $W_\lambda < 100 \text{ м\AA}$

$\log A$	Fe I (12 линий)		Fe II (7 линий)	
	$\log g = 4.0$	$\log g = 4.5$	$\log g = 4.0$	$\log g = 4.5$
$T_{\text{эф}} = 6000 \text{ K}$				
0.0	-5.34	-5.34	-5.27	-5.06
	± 0.18	± 0.19	± 0.17	± 0.17
-1.0	-5.31	-5.31	-5.39	-5.20
	± 0.19	± 0.19	± 0.18	± 0.17
-2.0	-5.32	-5.32	-5.42	-5.24
	± 0.18	± 0.19	± 0.17	± 0.18
$T_{\text{эф}} = 6500 \text{ K}$				
0.0	-4.95	-4.96	-5.27	-5.08
	± 0.20	± 0.20	± 0.18	± 0.18
-1.0	-4.95	-4.96	-5.32	-5.14
	± 0.20	± 0.20	± 0.18	± 0.18

ТАБЛИЦА 4

Результаты расчетов $\log \varepsilon (\text{Fe})$ с различными микротурбулентными скоростями ξ_t для звезды HD 106516. Модель: $T_{\text{эф}} = 6000 \text{ K}$; $\log g = 4.0$; $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{м}} = -1.0$; $W_{\lambda} < 100 \text{ m\AA}$

ξ_t	Fe I (12 линий)		Fe II (7 линий)	
	$\log \varepsilon (\text{Fe}) \pm \sigma$	s_W	$\log \varepsilon (\text{Fe}) \pm \sigma$	s_W
1.0	-4.87 ± 0.23	+0.078	-5.04 ± 0.23	+0.088
1.5	-5.11 ± 0.20	+0.042	-5.24 ± 0.18	+0.049
2.0	-5.31 ± 0.19	-0.00005	-5.39 ± 0.18	+0.014
2.5	-5.46 ± 0.20	-0.034	-5.49 ± 0.17	-0.014

ТАБЛИЦА 5

Влияние неопределенностей в параметрах атмосфер на точность определения содержания железа $\log \varepsilon (\text{Fe})$

Параметр и его неопределенность	$\Delta_i \log \varepsilon (\text{Fe})$	
	Fe I	Fe II
Эффективная температура $\Delta T_{\text{эф}} = \pm 200 \text{ K}$	$\pm 0.13 \pm 0.17$	$\pm 0.0 \pm 0.02$
Ускорение силы тяжести $\Delta \log g = \pm 0.3$	$\pm 0.00 \pm 0.05$	$\pm 0.10 \pm 0.12$
Микротурбулентная скорость $\Delta \xi_t = \pm 0.5 \text{ км/с}$	$\pm 0.10 \pm 0.20$	$\pm 0.10 \pm 0.20$
Химический состав модели $\Delta [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{м}} = \pm 1.0$	$\pm 0.01 \pm 0.02$	$\pm 0.03 \pm 0.05$
«Фотометрическая» ошибка (ошибка среднего σ/\sqrt{n})	$\pm 0.03 \pm 0.06$	$\pm 0.03 \pm 0.07$
Точность определения содержания железа $\Delta \log \varepsilon (\text{Fe})$	$\pm 0.17 \pm 0.27$	$\pm 0.15 \pm 0.25$

линий Fe I лежат в диапазоне $W_{\lambda} = 20 \div 200 \text{ m\AA}$, линий Fe II — $W_{\lambda} = 20 \div 150 \text{ m\AA}$. Силы осцилляторов для линий Fe I взяты из работы [28], для линий Fe II — из работы [29].

Расчеты показывают, что для определения содержания железа лучше использовать линии Fe I и Fe II с эквивалентными ширинами $W_{\lambda} < 100 \text{ m\AA}$, так как они менее чувствительны к неопределенностям в микротурбулентной скорости ξ_t (рис. 3). В зависимости от температуры и содержания железа в атмосфере звезды в диапазон $W_{\lambda} = 20 \div 100 \text{ m\AA}$ попадает, как правило, 10—30 линий Fe I и 5—8 линий Fe II. Уменьшение количества используемых линий не сказывается на точности определения содержания железа. Как будет показано ниже, «фотометрическая» погрешность в 2—3 раза меньше, чем погрешность, вносимая неопределенностью в температуре (для линий Fe I).

2. Влияние неопределенностей в параметрах атмосфер на точность определения содержания железа $\log \varepsilon (\text{Fe})$. В табл. 3 приведен пример расчета $\log \varepsilon (\text{Fe})$ в узлах сетки моделей [13] для звезды HD 106516. Параметры моделей атмосфер и число используемых линий Fe I и Fe II указаны в таблице. $\log A$ обозначает величину общего дефицита металлов, принятую в [13] при расчете сетки моделей. Под значением $\log \varepsilon (\text{Fe})$ приводится среднеквадратичное отклонение (σ) по одной линии Fe I или Fe II. «Фотометрическая» погрешность определения $\log \varepsilon (\text{Fe})$ характеризуется ошибкой среднего σ/\sqrt{n} , которая зависит от числа линий в интервале $W_{\lambda} = 20 \div 100 \text{ m\AA}$ и точности определения эквивалентных ширин. Вопросы фотометрической точности определения эквивалентных ширин линий будут отдельно рассмотрены в дальнейшем.

В табл. 4 приводится расчет содержания железа для звезды HD 106516 при различных значениях микротурбулентной скорости ξ_t . Величина s_W — коэффициент наклона в зависимости $\log \epsilon(\text{Fe}) - W_\lambda$ (рис. 1, 2). Расчеты $\log \epsilon(\text{Fe})$, аналогичные приведенным в табл. 3 и 4, сделаны также и для остальных 8 исследуемых в данной работе звезд. Анализ этих расчетов позволяет оценить влияние неопределенностей в параметрах атмосфер на ошибки определения содержания железа, соответствующие оценки приведены в табл. 5. Точность определения $\log \epsilon(\text{Fe})$ составляет в среднем $\Delta \log \epsilon(\text{Fe}) = \pm 0.2 \div 0.3$ и ограничена не качеством фотографического материала, а неопределенностями в параметрах атмосфер. Для линий Fe I, наиболее часто используемых при определении $[\text{Fe}/\text{H}]$ [8], точность ограничена главным образом неопределенностью в эффективной температуре (± 200 K).

3. Нуль-пункт шкалы $[\text{Fe}/\text{H}]$. Как правило [8], в качестве звезды сравнения при определении содержания химических элементов, и в частности железа, используется Солнце. Определение солнечного содержания железа — самостоятельная проблема, и ей посвящены специальные исследования [28, 30—32]. Расчеты $\log \epsilon(\text{Fe})_\odot$, выполненные на основе современных солнечных моделей атмосфер, дают значения $\log \epsilon(\text{Fe})_\odot = -4.35 \div -4.60$ [28]. Для наших исследований важно не абсолютное значение содержания железа в атмосфере Солнца, а значение, получаемое в рамках используемых моделей атмосфер [13].

Для расчета $\log \epsilon(\text{Fe})_\odot$ получены три спектрограммы неба (солнечного света, рассеянного в земной атмосфере) с дисперсией $D = 9 \text{ \AA}/\text{мм}$, в интервале $\lambda = 4000 \div 4900 \text{ \AA}$, со спектральным разрешением $\Delta \lambda = 0.2 \div 0.25 \text{ \AA}$ для уменьшения блендированности линий в спектре. Использована солнечная модель атмосферы из [13] с параметрами $T_{\text{эф}} = 5770 \text{ K}$, $\log g = 4.44$. Микротурбулентная скорость ξ_t принята равной 1.0 км/с , использованы линии с $W_\lambda < 100 \text{ м\AA}$. Расчеты дают следующие значения:

$$\begin{aligned} \log \epsilon(\text{Fe})_\odot &= -4.50 \pm 0.24 && \text{по 8 линиям Fe I;} \\ \log \epsilon(\text{Fe})_\odot &= -4.64 \pm 0.25 && \text{по 7 линиям Fe II.} \end{aligned}$$

В качестве солнечного содержания железа в дальнейшем мы приняли значение $\log \epsilon(\text{Fe})_\odot = -4.50$, которое практически совпадает с результатами других авторов [9, 18, 33], использующих модели атмосфер [13].

ТАБЛИЦА 6
Результаты определения величины $[\text{Fe}/\text{H}]$ для 9 звезд программы

№	HD	Имя	B	$T_{\text{эф}}, \text{ K}$	$\log g$	$\xi_t, \text{ км/с}$	$[\text{Fe}/\text{H}]$ по Fe I	$[\text{Fe}/\text{H}]$ по Fe II	$[\text{Fe}/\text{H}]$ среднее по Fe I, II
1	51590	39 Gem	6.65	5950	3.9	2.0	-0.28	-0.16	-0.22
2	59374		9.02	5800	4.5	2.0	-1.01	-1.13	-1.07
3	84123		7.15	6930	3.6	5.0	-1.05	-1.16	-1.10
4	84937		8.74	6400	4.5	1.5	-2.14	-1.80	-1.97
5	106516	α Boo	6.58	6100	4.6	2.0	-0.74	-0.66	-0.70
6	128167		4.82	6750	4.3	2.5	-0.44	-0.48	-0.46
7	150177		6.92	6050	4.1	2.5	-0.73	-0.83	-0.78
8	165908	99 Her	5.57	6070	4.5	2.0	-0.58	-0.64	-0.61
9	184499		7.20	5950	4.5	1.5	-0.82	-1.17	-1.00

Примечание. Звезда 99 Her является визуально-двойной системой ($a = 1.077$) с характеристиками компонент $V_1 = 5.10$, $(B - V)_1 = 0.50$, $V_2 = 8.45$, $(B - V)_2 = 1.10$, $M_{V_1} = +4.2$, $M_{V_2} = +7.5$, $M_1 = 0.80 M_\odot$, $M_2 = 0.44 M_\odot$ [35]. Однако отсутствие прямых определений радиуса не позволяет получить эффективную температуру $T_{\text{эф}}$ и ускорение силы тяжести наиболее точными методами для компонента № 1.

4. Результаты определения $[\text{Fe}/\text{H}]$ и сравнение с другими авторами. В табл. 6 приведены результаты определения $[\text{Fe}/\text{H}]$ для 9 звезд программы. Эффективная температура и ускорение силы тяжести определены по индексам β и c_1 фотометрической системы uvby β , опубли-

ликованным в работе [5]. Использована калибровка этих индексов по $T_{эф}$ и $\log g$ из работы [34]. Микротурбулентная скорость ξ_t получена по линиям Fe I из условия независимости $\log \epsilon$ (Fe) от W_λ и при расчетах значение ξ_t округлено до 0.5 км/с. Исключение составляет звезда HD 84123, для которой принято значение $\xi_t = 5.0$ км/с — среднее по линиям Fe I ($\xi_t = 7.0$ км/с) и Fe II ($\xi_t = 3.0$ км/с). В табл. 6 приведена также звездная величина в цвете B .

ТАБЛИЦА 7
Сравнение с результатами других авторов

HD	[Fe/H] по Fe I, данная работа	[Fe/H] из каталога [8]				
84937	-2.14	-2.21	-2.18	-1.84		
106516	-0.74	-0.65	-0.61	-0.92	-0.86	
128167	-0.44	-0.42	-0.60			
165908	-0.58	-0.53	-0.42	-0.39	-0.51	-0.45
184499	-0.82	-0.66	-0.66	-0.55		

В табл. 7 даны величины [Fe/H], определенные в данной работе по линиям Fe I, и аналогичные результаты других авторов [8].

Выводы. 1. Для фотографических исследований с высоким спектральным разрешением доступно относительно небольшое число F- и G-карликов с пониженным содержанием металлов в окрестностях Солнца (100—120 пк). Это заставляет обратиться в дальнейшем к использованию современных фотоэлектронных приемников света.

2. Точность спектроскопических определений содержания железа по линиям Fe I и Fe II составляет $\Delta [Fe/H] = \pm 0.2 \div 0.3$ и ограничена не качеством фотографических наблюдений, а неопределенностями в параметрах звездных атмосфер. Эти неопределенности связаны с отсутствием прямых определений параметров $T_{эф}$, $\log g$, ξ_t для F- и G-карликов с дефицитом металлов.

3. Содержание железа (величина [Fe/H]) определено для девяти F- и G-карликов, для четырех из них [Fe/H] впервые определено спектроскопически.

4. Сравнение с результатами других авторов показывает хорошее согласие. В заключение автор выражает благодарность В. Е. Панчуку и В. Г. Ключковой за полезные советы, обсуждения и замечания при выполнении данной работы.

Литература

1. Spite M., Spite F. The composition of field halo stars and the chemical evolution of the halo // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 1985. 23. P. 225—238.
2. Edvardsson B., Gustafsson B., Nissen P. E. Light element abundances in F stars and the chemical evolution of the galactic disk // *ESO Messenger*. 1984. N 38. P. 33—38.
3. Страйжис В. Звезды с дефицитом металлов. Вильнюс: Мокслас, 1982. 312 с.
4. Страйжис В. Многоцветная фотометрия звезд. Вильнюс: Мокслас, 1977. 312 с.
5. Hauck W., Mermilliod M. *uvby β photoelectric photometric catalogue // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1980. 40. P. 1—32.*
6. Марсаков А. А., Сучков А. А., Шевелев Ю. Г. Химический состав F-звезд околосолнечной окрестности // *Астрон. журн.* 1984. 61. С. 483—490.
7. Марочник Л. С., Сучков А. А. Галактика. М.: Наука, 1984. 392 с.
8. A catalogue of [Fe/H] determination, 1984 edition / G. Cayrel de Strobel, C. Bertolila, B. Hauck, A. Duquennoy // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1985. 59. P. 145—186.
9. Peterson R. Abundance analyses of metal-poor stars. I. Blue spectra of 15 high-velocity dwarfs // *Astrophys. J.* 1978. 222. P. 181—190.
10. Tomkin J., Lambert D. L., Balachandran S. Light element abundances in 20 F and G dwarfs // *Astrophys. J.* 1985. 290. P. 289—295.
11. Бартьявичюс А. А. Каталог звезд F—M с дефицитом металлов. Ч. I. Звезды, классифицированные спектроскопически // *Бюл. Вильнюс. астрон. obs.* 1980. № 51.
12. Бикмаев И. Ф., Ключкова В. Г., Панчук В. Е. Фотометрические характеристики Основного звездного спектрографа 6-м телескопа (БТА) // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1986. 23. С. 118—126.

13. Kurucz R. L. Model atmospheres for G, F, A, B and O stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1979. 40. P. 1—340.
14. Böhm-Vitense E. The effective temperature scale // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 1981. 19. P. 295—318.
15. Saxner M., Hammarbäck G. An empirical temperature calibration for F dwarfs // *Astron. and Astrophys.* 1985. 151. P. 372—390.
16. Глушневa И. Н. Спектрофотометрия стандартных звезд: физические параметры атмосфер и шкала эффективных температур // *Астрон., журн.* 1985. 62. С. 1132—1138.
17. Грей Д. Наблюдения и анализ звездных фотосфер. М.: Мир, 1980. 496 с.
18. Peterson R. C., Carney B. W. Abundance analyses of metal-poor stars. II. Yellow spectra of five dwarfs // *Astrophys. J.* 1979. 231. P. 762—780.
19. Steffen M. A model atmosphere analyses of the F5 IV—V subgiant Procyon // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1985. 59. P. 403—427.
20. Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Цымбал В. В. Параметры атмосферы и металличность θ Leo (A2V) // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1985. 19. С. 22—27.
21. Peterson R. Abundance analyses of metal-poor stars. III. Red spectra of nine dwarfs // *Astrophys. J.* 1980. 235. P. 491—503.
22. Клочкова В. Г., Панчук В. Е. К вопросу о металличности Гиад // *Письма в Астрон. журн.* 1985. 11. С. 692—695.
23. Griffin R. and R. A photometric atlas of the spectrum of Procyon, λ 3140—7410. Cambridge, 1979.
24. Delbouille L., Roland G., Neven L. Photometric atlas of the solar spectrum from λ 3000 to λ 10 000 Å. Liege, 1973.
25. Moore Ch. E. A multiplet table of astrophysical interest. Revised ed. Princeton, 1945. Pt. 1—2.
26. Swenson J. W. The spectrum of Procyon: a typical star of class F // *Astrophys. J.* 1946. 103. P. 207—248.
27. Pierce A. K., Breckinridge J. B. The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths // *Kitt Peak National Obs. Contribution.* 1973. N 559.
28. Боярчук А. А., Саванов И. С. Силы осцилляторов для нейтрального железа и его содержание в атмосфере Солнца // *Изв. КрАО.* 1986. 70.
29. Blackwell D. E., Shallis M. I., Simmons G. I. Oscillator strengths of Fe II lines derived from solar spectrum: choice of solar model atmosphere // *Astron. and Astrophys.* 1980. 81. P. 340—343.
30. Шеминова В. А. Содержание железа на Солнце // *Астрометрия и астрофиз.* 1983. 50. С. 17—23.
31. The Harvard—Smithsonian reference atmosphere / O. G. Gendrich, R. W. Noyes, W. Kalkofen, J. Cury // *Solar Phys.* 1971. 18. P. 347—365.
32. Holweger H., Müller E. A. The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // *Solar Phys.* 1974. 39. P. 19—30.
33. Carney B. W., Latham D. W. BD-6°855: a mildly metal-deficient dwarfs from the outer halo // *Astrophys. J.* 1985. 298. P. 803—807.
34. Moon T. T., Dvoretzky M. M. Grids for the determination of effective temperature and surface gravity of B, A and F stars using *uvby* β photometry // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1985. 217. P. 305—315.
35. Kamper K. W., Beardsley W. R. Orbit, mass ratio, and parallax of 99 Herculis // *Astron. J.* 1986. 91. P. 419—424.

Поступила в редакцию
12 марта 1986 г.