

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕТАЛЛИЧНОСТИ А И F-ЗВЕЗД I-ГО ТИПА НАСЕЛЕНИЯ

Г. А. Галазутдинов, В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук

Анализируются причины низкой степени корреляции спектроскопических определений содержания железа и фотометрических оценок металличности. Показано, что основными причинами являются как несовершенство теоретического описания спектра железа, так и естественный шум в индексе m_1 системы Стрёмгrena, обусловленный уширением линий металлов.

The matters of the weak degree of correlation between the spectroscopic and photometric determinations of the iron abundance are analysed. It is shown that the main matters are as improvement of the theoretical description of the iron spectra as natural noise in the Strömrgren index m_1 that caused by the metal lines.

Анализ фотометрического парадокса Гиад указал на неоднозначность связи фотометрических и спектроскопических определений металличности (Клочкова и Панчук, 1985, 1986, 1987). Опираясь на однородные спектроскопические определения $[\text{Fe}/\text{H}]$ и компилируя наиболее надежные результаты из работы Керель и др. (1985), можно было предпринять очередную попытку калибровки фотометрического индекса металличности Δm_1 для звезд диска Галактики (Клочкова и Панчук, 1989). Практически одновременно на основании многолетних спектроскопических наблюдений был получен вывод об однородности диска Галактики по величине $[\text{Fe}/\text{H}]$ (Клочкова и др., 1989). Возможность ревизии спектроскопических определений металличности звезд диска Галактики появилась после построения каталога эквивалентных ширин W линий металлов в спектрах А и F-звезд (Клочкова и др., 1990). В работе Клочковой и др. (1991) такая попытка сделана. Была обнаружена зависимость металличности от потенциала возбуждения χ_L линии нейтрального железа, по W которой эта металличность вычислена методом моделей атмосфер. Эту зависимость (см. рис. 9 и 10 в работе Клочковой и др., 1991) можно интерпретировать: а) как следствие отклонений от бальцовановского равновесия для атомов нейтрального железа практически в каждой из исследованных атмосфер; б) как результат одинаково выраженного для всех звезд несоответствия структуры конкретных моделей атмосфер реальным распределениям температуры и давления; в) как следствие ошибок, возникающих на этапе построения сводной шкалы сил осцилляторов. Независимо от физической причины обнаруженного эффекта имеем эмпирический факт - для каждой исследуемой звезды мож-

но получить один индекс металличности и набор спектроскопических определений $[Fe/H]$, выполненных по группам линий с различными χ_L .

В данной работе ограничимся поисками ответа на вопрос, основной для оценки перспектив применения системы Стремгrena, - почему степень корреляции Δm_1 и $[Fe/H]$ для звезд диска невысока?

Прежде всего определим выборку исследуемых звезд. Как и в работе Клочковой и др. (1991), исключим из рассмотрения химически пекулярные звезды диска, звезды высокой светимости и звезды гало. После этого остались нормальные A и F-звезды главной последовательности и звезды Am и Fm с усиленными линиями металлов. Для этой выборки звезд используем результаты вычислений содержания железа $lg\epsilon(Fe)$, выполненных в работе Клочковой и др. (1991) методом моделей атмосфер с использованием параметров T_e , lgg , ξ_t из каталога Клочковой и др. (1990). Из-за нелинейной чувствительности фотометрической системы калибровку индекса металличности следовало бы проводить в достаточно узких интервалах спектральных классов, при этом чувствительность метода калибровки несомненно должна возрасти. Однако количества исследуемых звезд недостаточно для более детального разбиения на температурные группы. Следовательно, мы получим сглаженное соотношение, среднее для всех A и F-звезд.

Для большинства звезд выборки определения фотометрического индекса металличности уже опубликованы. Часть звезд имеет только измерения в системе $uvby\beta$, а для некоторых звезд измерения β -индекса отсутствуют. Поэтому мы предприняли попытку перевычисления индекса Δm_1 для всех звезд выборки. С этой целью опубликованные (Мун, 1985) программы определения параметров звездных атмосфер по данным стремгреновской фотометрии были переведены с языка Fortran-77 на язык QuickBasic и адаптированы для работы на персональной ЭВМ в диалоговом режиме. Основной объем исходной фотометрической информации взят из каталогов Хоука и Мермийе (1980) и Филипа и др. (1985). Таким образом, все фотометрические данные единообразно исправлены за покраснение. Кроме индекса Δm_1 , использованные алгоритмы (Мун, 1985) позволяют вычислить T_e и lgg . Следовательно, и для этих параметров методом моделей атмосфер по данным каталога Клочковой и др. (1990) можно вычислить $[Fe/H]$. Мы от этой процедуры отказались с тем, чтобы сохранить уровень независимости спектроскопических и фотометрических определений металличности.

Объединяющими свойствами всех широкополосных и среднеполосных фотометрических систем являются взаимосвязанность любой физической характеристики с большинством индексов и нелинейная связь любого из индексов и соответствующей физической характеристики. Поэтому вся совокупность звезд разбивается на группы, более компактные по температуре и светимости. В каждой группе действуют свои калибровочные соотношения и своя последовательность их применения. Проиллюстрируем это на примере используемого алгоритма (Мун, 1985), ограничиваясь группами, соответствующими исследуемой выборке звезд.

Группа A0-A3, III-V. Покраснение определяется методом итераций (Хайдич и др., 1983). Если индекс β не измерен, его можно оценить из показателей цвета, используя для ранних спектральных подклассов связь между β и m_o и c_o (Кроуфорд, 1978) и связь между β и $(b-y)$, c_1 для более поздних подклассов (Кроуфорд, 1966). Из-за низкой чувствительности мощных водородных линий к светимости для определения M_V используется линейная комбинация β и c_1 . Металличность $\Delta m_o = m_o(ZAMS) - m_o(*)$, где $m_o(ZAMS)$ вычисляется с помощью уравнения для $(b-y)_o$ из работы Хайдич и др. (1983).

Группа АЗ-Г0, III-V. При отсутствии β ее величина оценивается из соотношения между β и $(b-y)$, c_1 (Кроуфорд, 1966). Затем по β оцениваются c_1 (ZAMS) и M_V (ZAMS). Для определения M_V используются M_V (ZAMS) и Δc_1 (Кроуфорд, 1979). Величину m_1 (ZAMS) находят из квадратичной связи с β и Δm_1 , где $\Delta m_1 = m_1$ (ZAMS) - m_1 (*). Индекс $(b-y)_0$ находят согласно Кроуфорду (1979). Эффективную температуру определяют по связи между θ_e и $(b-y)_0$, полученной по калибровке T_e и $(B-V)$ из обзора Бем-Витензе (1981).

Группа F1-G2, III-V. Соотношения, используемые в этой группе, даны Кроуфордом (1975), учитываются поправки для M_V (ZAMS) и β , предложенные в работе Хайдича и др. (1983). Если индекс β не измерен, то его величина определяется через $(b-y)$, корректируемый с помощью Δm_1 . Как и в предыдущей группе, из-за нелинейности связи интенсивности линий водорода и светимости интервал β разбивается на две части, для каждой из частей выполняется оценка M_V (ZAMS). Затем по соотношениям из работы Кроуфорда (1975) определяем M_V . Эффективную температуру и m_1 (ZAMS) определяем, как и в предыдущей группе.

В результате работы программы имеем исправленные за покраснение величины $(b-y)_0$, m_0 , c_0 , параметры T_e и M_V , индекс металличности Δm_1 и радиус.

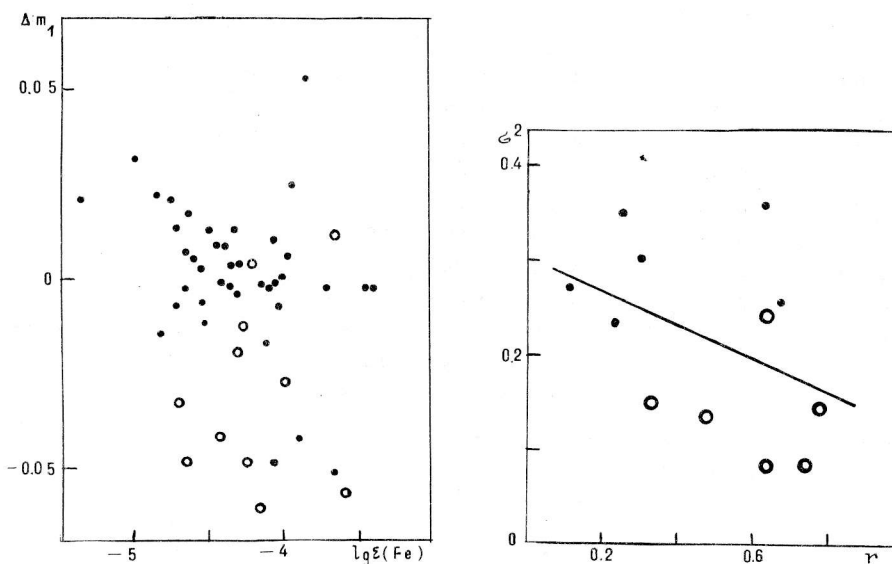


Рис.1. Сопоставление фотометрических индексов металличности Δm_1 с результатами спектроскопических определений металличности $\lg \epsilon(\text{Fe})$, выполненных по линиям с $\lambda_L = 3.20 - 3.29$ eV. Обозначения: • - нормальные звезды, о - Am и Fm - звезды.

Рис.2. Сопоставление дисперсии спектроскопических определений металличности $\sigma^2 \langle \lg \epsilon(\text{Fe}) \rangle$ с величиной коэффициента корреляции фотометрических и спектроскопических определений металличности $r[\Delta m_1; \lg \epsilon(\text{Fe})]$. Обозначения: • - группы мультиплетов с $\lambda < 5000$ А, о - группы мультиплетов с $\lambda > 5000$ А.

Вычислив индексы металличности, мы сопоставили их с результатами спектроскопических определений. На рис.1 дан пример такого сопоставления. Видно, что звезды с усиленными линиями металлов выпадают из общей совокупности нормальных

звезд, тогда как спектроскопические определения дают для них значения металличности, в среднем, не отличимые от нормальных А и F-звезд (Клочкова и др., 1991). Выполняя регрессионный анализ для различных интервалов χ_L , мы убедились, что исключение звезд Am и Fm из общей выборки приводит к увеличению коэффициента корреляции индекса Δm_1 и спектроскопического определения $\lg \epsilon(\text{Fe})$. Поэтому в дальнейшем эти звезды не рассматриваем. В табл. 1 даны интервалы потенциалов возбуждения нижнего уровня χ_L для переходов, по которым определялись индивидуальные значения $\lg \epsilon(\text{Fe})$. Эти определения, выполненные методом моделей атмосфер по каждой из линий, попадающей в указанный интервал, сравнивались с индексом металличности Δm_1 , определенным для каждой звезды. Коэффициенты корреляции $r[\Delta m_1; \lg \epsilon(\text{Fe})]$ и коэффициенты соответствующего регрессионного соотношения $-\lg \epsilon(\text{Fe}) = A + B(\Delta m_1)$ также даны в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции r фотометрического индекса металличности Δm_1 и спектроскопических определений $\lg \epsilon(\text{Fe})$, и параметры регрессионного соотношения $-\lg \epsilon(\text{Fe}) = A + B(\Delta m_1)$, вычисленные для различных интервалов $\Delta \chi_L$. N - число определений. Внизу повторена часть табл. 3 из работы Клочковой и Панчука (1989)

$\Delta \chi_L$ (ev)	$r[\Delta m_1; \lg \epsilon(\text{Fe})]$	A	σ_A	B	σ_B	N
0.00 - 0.09	0.25	4.56	0.06	8.29	5.66	34
0.10 - 0.99	0.64	4.44	0.05	20.64	5.04	27
1.40 - 1.49	0.63	4.56	0.06	10.17	6.42	57
1.50 - 1.99	0.30	4.44	0.06	16.05	6.94	56
2.80 - 2.89	0.24	4.52	0.05	6.26	4.86	34
3.20 - 3.29	0.68	4.26	0.05	20.25	4.52	27
4.10 - 4.19	0.48	4.46	0.04	7.60	4.20	14
4.20 - 4.29	0.63	4.31	0.06	16.18	6.58	12
4.30 - 4.39	0.34	4.38	0.07	10.80	7.82	18
4.40 - 4.49	0.78	4.39	0.04	16.34	4.21	13
4.50 - 4.59	0.74	4.23	0.06	21.94	6.99	11

Группа	$r[\Delta m_1; \lg \epsilon(\text{Fe})]$	a	b	N
A	0.21	4.29	3.19	38
AF	0.49	4.44	5.44	41
F	0.58	4.89	6.89	43

В нижней части табл. 1 повторены данные из табл. 3 работы Клочковой и Панчука (1989). Сравнение коэффициентов b и B показывает, что при переходе от классического метода калибровки индекса металличности к методу, реализуемому в данной работе, наклон калибровочного соотношения становится более крутым. Подчеркнем, что ширина температурного интервала А и F-звезд, рассматриваемых в данной работе, намного шире любого из трех температурных интервалов, соответствующих группам "А", "AF", "F", поэтому, как отмечено выше, коэффициенты B оценены снизу.

На рис. 2 величина коэффициента корреляции сопоставляется с величиной дисперсии металличности диска Галактики, оцененной в работе Клочковой и др. (1991) по

группам линий с различными χ_L . Видно, что для определений $\lg \varepsilon(\text{Fe})$, выполненных преимущественно по линиям в красном диапазоне спектра, степень корреляции фотометрических и спектроскопических определений металличности выше. Таким образом, приходим к выводу, что низкие коэффициенты корреляции связаны с точностью измерения W в перегруженном линиями синем диапазоне спектра. К этому фактору добавим невысокую точность теоретического описания сильных линий (см., например, работу Клочковой и Панчука, 1986).

Мы попытались искать другие причины различий коэффициентов r для различных интервалов $\Delta\chi_L$. Сгруппировав интервалы $\Delta\chi_L$ по величине r , ($r < 0.5$ и $r > 0.5$), мы рассмотрели мультиплетность всех переходов, попадающих в данный интервал $\Delta\chi_L$. Оказалось, что по вероятности встретить ту или иную мультиплетность эти две группы интервалов $\Delta\chi_L$ неразличимы.

Были определены также регрессионные соотношения между коэффициентами A и B из табл. 1 и средним для каждого интервала значением χ_L . Сопоставление этих характеристик дано на рис. 3 и 4.

Рис. 3. Сравнение коэффициентов уравнения линейной регрессии $-\lg \varepsilon(\text{Fe}) = A + B(\Delta m_1)$, определенных для групп линий с избранными $\Delta\chi_L$.

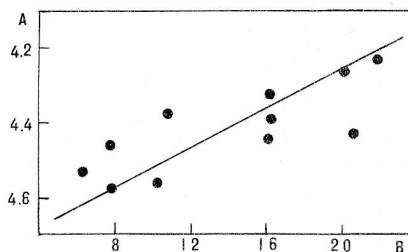
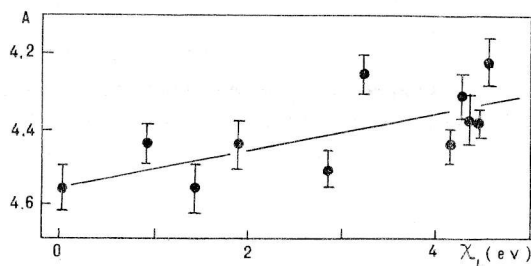


Рис. 4. Зависимость нуля-пункта регрессии $-\lg \varepsilon(\text{Fe}) = A + B(\Delta m_1)$ от среднего потенциала χ_L .



Затем мы получили регрессионное соотношение, связывающее величины χ_L (eV), Δm_1 и $\lg \varepsilon(\text{Fe})$:

$$-\lg \varepsilon(\text{Fe}) = 4.556 - 0.0481\chi_L + (8.6718 + 1.8371\chi_L)\Delta m_1.$$

Подчеркнем относительный характер зависимости - абсолютная величина $\lg \varepsilon(\text{Fe})$ зависит от того, какие группы линий FeII преимущественно участвовали в определении параметров моделей атмосфер (подробнее см. в работе Клочковой и др., 1991). Таким образом, выделена вторая причина слабой связи спектроскопических и фотометрических определений металличности - наклон зависимости определен и тем, по каким группам линий работает спектроскопист.

Итак, складывается впечатление, что резервы точности спектроскопической калибровки фотометрических индексов металличности исчерпаны. Дальнейшее накопление спектроскопической информации эту точность не повышает, так как мы не знаем, для каких интервалов $\Delta\chi_L$ мы определяем реалистические значения $\lg \varepsilon(\text{Fe})$. Из общих со-

образований это должны быть интервалы с высокими значениями χ_L (Густафссон, 1983), что подтверждается и оценками дисперсии химического состава диска (Клочкова и др., 1991, Клочкова, 1991).

Обратимся теперь к проблеме дисперсии индекса металличности Δm_1 . В работе Клочковой и Панчука (1986) предложен метод оценки вклада линий в покровной эффект и было показано, что феномен усиления линий в спектрах F-карликов Гиад существенно изменяет индексы uvby-системы. Применим этот метод с целью оценки дисперсии индекса Δm_1 . Предварительно по данным каталога Клочковой и др. (1990) рассмотрим поведение избранных линий FeI.

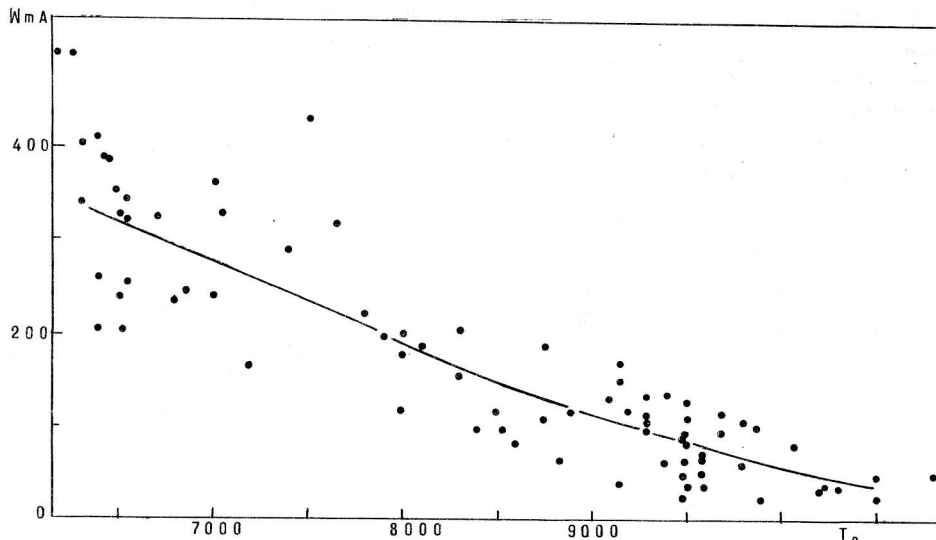


Рис.5. Зависимость эквивалентной ширины W линии FeI $\lambda 4404.75$ ($\chi_L = 1.56 \text{ eV}$) от эффективной температуры T_e .

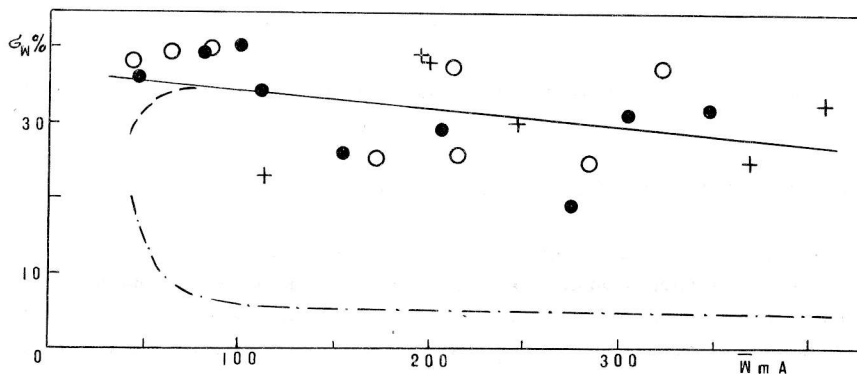


Рис.6. К оценке естественной дисперсии эквивалентных ширин. Обозначения: ● - FeI $\lambda 4404.75$ Å; ○ - FeI $\lambda 4202.03$ Å; + - FeI $\lambda 4063.60$ Å; ——— - зависимость среднеквадратичного отклонения σ_W от среднего значения W , вычисленного для групп звезд с $\Delta T_e = 500$ К; - - - - - зависимость ошибки измерения W , - - - - - откорректированная зависимость $\sigma_W - W$.

На рис. 5 показана зависимость эквивалентной ширины линии FeI $\lambda 4404.75$ от эффективной температуры, определенной методом моделей атмосфер. Нанесены W нормальных A и F-звезд главной последовательности. Анализ аналогичной зависимости $W-199$ показал, что разброс точек на рис. 5 практически не связан с эффектом светимости. Разбивая всю совокупность точек на интервалы шириной $\Delta T_e = 500$ К для зависимостей, подобных приведенной на рис. 5, вычислим средние значения W и среднеквадратичные отклонения σ_W .

На рис. 6 величины σ_W и W сопоставлены для трех линий FeI с $\chi_L \sim 1.5$ eV. Кроме линейной регрессии $\sigma_W = a + bW$, нанесена зависимость относительной ошибки измерения эквивалентной ширины, определенная Клочковой (1985) по наблюдениям звезд - стандартов эквивалентных ширин. Для того, чтобы оценить естественную дисперсию эквивалентных ширин, следует учесть ошибки определения W . Кроме того, следует учесть ошибки, возникающие при редукции списков W в систему каталога Клочковой и др. (1990). Пунктиром на рис. 6 нанесена зависимость σ_W от W , полученная из линейного регрессионного соотношения в предположении о независимости двух указанных типов ошибок. Для оценки влияния естественной дисперсии эквивалентных ширин на индекс Δm_1 примем $\sigma_W \sim 30\%$, не зависящую от W .

Для оценки влияния среднестатистического усиления ($W+\sigma$) и ослабления ($W-\sigma$) линий на индексы $uvby$ используем построенную по спектру Проциона гистограмму распределения линий в указанных фотометрических полосах от их остаточной глубины (Клочкова, Панчук, 1986). Сделаем допущение, что усиление (ослабление) линий не изменяет характер распределения линий внутри данной фотометрической полосы. Тогда оценку величины изменения потока в полосе можно выполнить, перенормируя ось " W " на рис. 1 работы Клочковой и Панчука (1986). Итак, долю излучения, поглощаемого линиями в каждой из полос, оценим, вычисляя суммы $\sum nW$, $\sum n(W+\sigma)$ и $\sum n(W-\sigma)$. В табл. 2 даны результаты оценок. Переводя потоки в звездные величины и вычисляя затем поправки к индексу $m_1 = (v-b) - (b-y)$, получим, что усиление W линий на величину σ увеличивает m_1 на 0.07, а ослабление линий - уменьшает на 0.08 зв. вел. Индекс $b-y$ соответственно увеличивается на 0.01 и уменьшается на 0.01 зв. вел.

Таблица 2. Оценка потоков, выходящих в полосах системы Стремгрена из атмосферы карлика F5V с нормальными (W), усиленными ($W+\sigma$) и ослабленными ($W-\sigma$) линиями.

Относительные потоки в полосах				
(W)	u	v	b	y
(W+ σ)	0.83u	0.91v	0.98b	0.99y
(W- σ)	1.16u	1.09v	1.02b	1.01y

На рис. 7 приведена диаграмма $m_1, b-y$, построенная для скопления Гиады по данным Филипа и др. (1976). Крестиком указано положение Проциона, стрелками - смещения, оцененные выше.

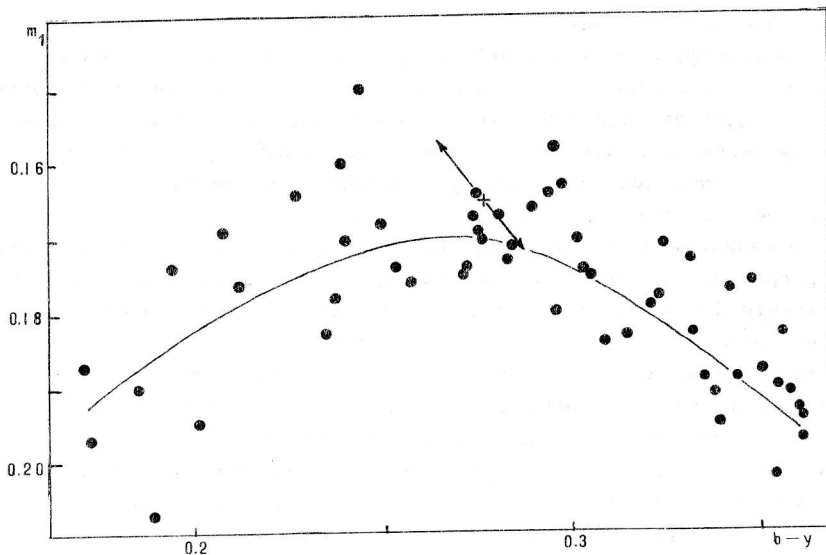


Рис. 7. К оценке дисперсии индекса металличности Δm_1 . Обозначения: ● - звезды Гиад; _____ - среднее положение главной последовательности Гиад; + - Процион; Стрелками указано смещение, оцененное для F-карликов с усиленным ("W+O") и ослабленным ("W-C") бланкетированием.

В целом приходим к выводу, что естественный разброс значений W , наблюдаемый для звезд каталога, согласуется с разбросом значений m_1 , наблюдаемым для скопления, металличность звезд которого одинакова и равна солнечной (Клочкова, Панчук, 1986; Бесгаард и Фрайл, 1990). Следовательно, второй и основной причиной невысокой корреляции фотометрических и спектроскопических определений металличности являются индивидуальные особенности звездных атмосфер, в одинаковой степени проявляющиеся как в дисперсии W , так и в дисперсии m_1 , и не связанные непосредственно с величиной $\lg \epsilon(\text{Fe})$.

ЛИТЕРАТУРА

- Бем-Витензе (Bohm-Vitense E.): 1981, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 19, 295.
 Бесгаард и Фрайл (Boesgaard A. M., Friel E. D.): 1990, *Astrophys. J.*, 352, 467.
 Густафссон (Gustafsson B.): 1983, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 95, 101.
 Керель и др. (Cayrel de Strobel G., Bentolila C., Hauck B., Duquennoy A.): 1985, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 59, 145.
 Клочкова В. Г.: 1985, Канд. дисс., Нижний Архыз.
 Клочкова В. Г.: 1991, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 34, 31.
 Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1985, *Письма в астрон. ж.*, 11, 692.
 Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1986, *Письма в астрон. ж.*, 12, 446.
 Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1987, В сб.: *Звездные скопления*, Свердловск, ред. Бархатова К. А.
 Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1989, *Письма в астрон. ж.*, 15, 236.
 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. В.: 1991, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 33, 41.
- Кроуфорд (Crawford D. L.): 1966, *IAU Symp.*, No. 24, 170.
- Кроуфорд (Crawford D. L.): 1975, *Astron. J.*, 80, 955.
- Кроуфорд (Crawford D. L.): 1978, *Astron. J.*, 83, 48.
- Кроуфорд (Crawford D. L.): 1979, *Astron. J.*, 84, 1858.
- Мун (Moon T. T.): 1985, *Comm. Univ. London. Obs.*, No. 78.
- Филип и др. (Philip A. G. D., Miller T. M., Relyea L. J.): 1976, *Dudley Obs. Rep.*, No. 12.
- Хайдич и др. (Hiditch R. M., Hill G., Barner J. V.): 1983, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 204, 241.
- Хоук и Мермийе (Hauck B., Mermillod M.): 1980, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 40, 1.

Поступила в редакцию
8 января 1991 г.