

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧНОСТИ ЗВЕЗД МОЛОДЫХ РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЙ

В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук

Для 21 звезды спектральных классов В9—А2, членов рассеянных звездных скоплений и групп по спектрам высокого разрешения ($\Delta\lambda=0.25 \text{ \AA}$) измерены эквивалентные ширины 62 линий металлов. Методом моделей атмосфер определены эффективные температуры T_e , ускорения силы тяжести $\lg g$, микротурбулентные скорости ξ_t и содержания $\lg \epsilon$ кальция, магния, кремния, титана, хрома, железа, стронция, бария.

The equivalent widths for 62 metallic lines of 21 stars of В9—А2 spectral types, members of the open clusters and groups are measured from the high-resolution spectrograms ($\Delta\lambda=0.25 \text{ \AA}$). The effective temperatures T_e , the surface gravities $\lg g$, microturbulent velocities ξ_t and the abundances $\lg \epsilon$ of calcium, magnesium, silicon, titanium, chromium, iron, strontium, barium are determined by the model atmosphere method.

Задача спектроскопического определения содержания металлов в атмосферах звезд — членов рассеянных скоплений тесно связана с проблемами эволюции химического состава звезд в Галактике, построения исходной главной последовательности (ИГП), шкалы расстояний и возрастов скоплений.

Существующие определения содержания железа $\lg \epsilon$ (Fe) основаны на использовании разных наборов линий в спектрах звезд различных спектральных классов, полученных с разным спектральным разрешением [1]. Данные разных авторов трудно сравнивать из-за различий в используемых шкалах сил осцилляторов и моделей атмосфер. Цель настоящей работы — определение содержания металлов для выборки рассеянных скоплений в диапазоне возрастов $2 \cdot 10^6$ — $7 \cdot 10^8$ лет путем применения единой методики к однородному спектроскопическому материалу.

В процессе выполнения на 6-м телескопе программы детальной спектрофотометрии нормальных и пекулярных звезд в рассеянных скоплениях разного возраста нами была отобрана 21 звезда в ограниченном интервале спектральных классов (около А0—А2) с относительно узкими линиями (проекция скорости вращения на луч зрения $v \sin i < 120 \text{ км/с}$). Для каждой звезды получено по 3—4 спектрограммы на пластинках Kodak IIaO и IIIaJ с обратной дисперсией 9 \AA/мм (спектральное разрешение $\Delta\lambda=0.25 \text{ \AA}$), в спектральной области $\lambda=3900$ — 4900 \AA . Высота каждой спектрограммы 0.7 мм. Такой спектроскопический материал позволяет надежно измерять линии с эквивалентной шириной W_λ до 20 мА, что обеспечивает уверенное определение микротурбулентной скорости ξ_t . Выбор спектрального интервала исследуемых звезд обусловлен наличием в их спектрах достаточного количества неблендированных линий Fe I, Fe II, надежностью использованной нами сетки моделей атмосфер [2] в окрестностях спектрального класса А0V и возможностью наблюдений этих звезд с высоким спектральным разрешением даже в удаленных скоплениях.

В табл. 1 приведены сведения о звездах программы: номера по каталогам HD и BD, звездные величины и показатели цвета в системе *UBV* [3], спектральные классы в системе MK из [4, 5]. В столбце 7 указаны спектральные классы $S_p(W_\lambda)$, определенные нами количественно по эквивалентным ширинам набора линий H I, He I, Fe II, Ti II, Cr II, Cr I, Sr II, Ca II с использованием калибровочных зависимостей $W_\lambda(S_p)$ из работ [6, 7]. Показатели цвета *U—B*, *B—V* получены осреднением данных из [3]. Избытки цвета, приведенные в столбце 5, взяты из статьи [8], а для звезд HD 20961, 23387, 23763, 24736 покраснение

ТАБЛИЦА 1

Фотометрические и спектральные характеристики звезд программы

HD, BD	m_B	$U - B$	$B - V$	$E(B - V)$	Sp (MK)	Sp (W_λ)	$v \sin i$	Скопление
1	2	3	4	5	6	7	8	9
22327	7 ^m 58	-0 ^m 18	0 ^m 14	0.20	B9III	B8.3	75	Персей OB2
24736	8.65	-0.04	0.12	0.18	A0IV	B9.5	22	
23387	7.34	0.08	0.16	0.10	A1V	B9.1	27	Плеяды
23489	7.45	0.12	0.10	0.06	A2V	A1.2	116	
23763	7.06	0.09	0.12	0.12	A1V	A0.3	95	
20808	8.82	0.13	0.14	0.10	A2V	A1.3	27	α Персея
20842	7.95	0.04	0.10	0.10	A0V	B9.6	84	
20961	7.77	0.02	0.12	0.16	B9.5sn	B9.0	20	
21046	8.93	0.04	0.29	0.10	A7V	A4.3	66	
205171	8.53	0.02	0.01	0.02	A0Vs	B9.9	15	M39
205331	6.81	0.03	-0.02	0.02	A1III	A0.0	37	
47°3454	9.01	0.12	0.09	0.02	A2V	A1.3	91	
107966	5.27	0.11	0.08	0	A3IV	A2.2	48	Волосы Вероники
108382	5.03	0.13	0.08	0	A4V	A3.2	71	
116706	5.81	0.06	0.09	0	A2V	A2.0	53	
192907	4.34	-0.12	-0.04	0	B9III	B9.0	15	Группа Плеяд
31647	5.04	0.03	0.03	0.01	A0V	B9.0	94	
16861	6.36	0.08	0.07	0	A2Vs	A0.8	27	Группа Большой Медведицы
28978	5.73	0.08	0.03	0	A2V	A0.0	22	
31278	4.41	-0.01	-0.01	0	A1V	B9.7	37	
95418	2.37	-0.02	-0.01	0	A1Vs	A0.6	37	

учтено общепринятым способом по линии покраснения с наклоном 0.72, линия истинных цветов взята из [9]. Величины $v \sin i$ определены нами по полуширине линии Mg II 4481 Å.

Определение параметров атмосфер. Для определения эффективной температуры T_e и ускорения силы тяжести $\lg g$ мы использовали сравнение наблюдаемых и теоретических значений следующих характеристик: показателей цвета $(B-V)_0$, эквивалентных ширин и контуров линии H_γ (полуширины линии $\Delta\lambda$ измерены на глубинах 0.1, 0.2 и 0.3).

В работе [10] обоснована система поправок, использование которой позволяет связать фундаментальные характеристики звезд, определенные без предположений о структуре звездных атмосфер, с фундаментальными характеристиками,

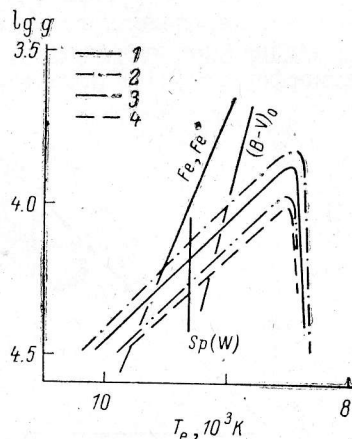


Рис. 1. Определение параметров атмосферы звезды HD 23489 на плоскости $T_e - \lg g$.

1 — $W(H_\gamma)$; 2 — $\Delta\lambda$ (0.1); 3 — $\Delta\lambda$ (0.2); 4 — $\Delta\lambda$ (0.3).

определенными методом моделей атмосфер. Суть такого перехода состоит во введении поправок к наблюдаемым параметрам водородных линий перед сравнением их с аналогичными величинами из моделей [2]. В работе [11] выполнено подробное исследование методики определения T_e и $\lg g$ методом моделей атмосфер. Для иллюстрации этой методики приводим рис. 1, где на плоскости $T_e - \lg g$ нанесены изолинии $(B-V)_0$, $W_\lambda(H_\gamma)$, $\Delta\lambda$ (0.1), $\Delta\lambda$ (0.2), $\Delta\lambda$ (0.3), $Sp(W_\lambda)$, а также линия ионизационного равновесия для железа (Fe I, Fe II). В табл. 2 приведены параметры T_e и $\lg g$, полученные пересечением изолиний, характеризующих спектральную линию H_γ , с изолиниями $(B-V)_0$, $Sp(W_\lambda)$ (Fe I, Fe II), — столбцы 3, 4, 5 соответственно.

Сравнение эффективных температур, определенных по изолиниям количественной спектральной классификации $Sp(W_\lambda)$ и по изолиниям ионизационного

равновесия (Fe I, Fe II), проведенное на рис. 2, а, позволяет усреднить данные столбцов 4 и 5. Эти средние значения T_e , полученные по спектроскопическим данным без привлечения фотометрии, мы сравнили на рис. 2, б с T_e , полученными с использованием показателей цвета $(B-V)_0$. Из рис. 2, б следует, что «спектроскопические» температуры T_e систематически выше температур, определенных с привлечением $(B-V)_0$, причем это справедливо как для покрасневших,

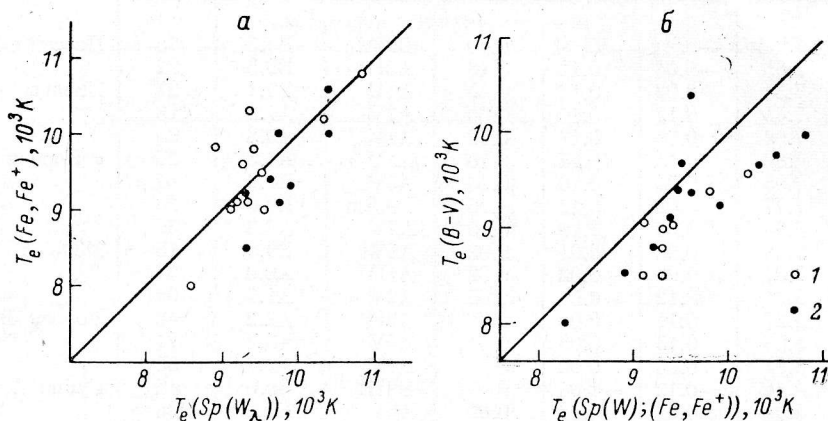
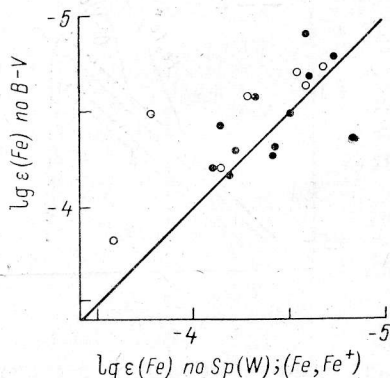


Рис. 2. Сравнение эффективных температур.

а — определенных из условия ионизационного равновесия T_e (Fe, Fe+) и по результатам количественной спектральной классификации T_e (Sp (W_λ)); б — полученных спектроскопически T_e (Sp (W); (Fe, Fe+)) и с привлечением фотометрических данных; 1 — звезды, для которых межзвездное покраснение учтено; 2 — звезды, для которых учет покраснения не проводился.

так и для близких, непокрасневших звезд. Влияние этой систематической разности на результат определения содержания железа $\lg \epsilon$ (Fe) видно из рис. 3, на котором сравниваются величины $\lg \epsilon$ (Fe) из табл. 3, определенные для двух последовательностей T_e и $\lg g$. В столбце 2 табл. 2 приведены значения микро-турбулентной скорости ξ_t , полученные нами из условия равенства содержания железа, определенного по сильным и слабым линиям.

Процедура определения $\lg \epsilon$ (Fe) состояла в следующем. Для 26 моделей атмосфер из [2] в интервале $T_e = 7500 \div 12000$ К, $\lg g = 2.5 \div 4.5$ и набора значений ξ_t по программе WIDTH 5 на ЭВМ ЕС 1035



рассчитаны кривые роста избранных линий Fe I и Fe II. Величина, определяющая крылья затухания, принята равной $\gamma = 10 \gamma_{\text{классич.}}$. Нами использованы линии Fe I: 4071.74, 4202.03, 4222.22, 4271.16, 4404.75, 4415.13, 4430.62, 4447.72 Å и линии Fe II: 4122.67, 4178.86, 4233.17, 4303.18, 4384.32, 4413.60, 4491.40, 4508.29 Å, для которых в [12—15] имеются экспериментальные значения сил осцилляторов, при-

Рис. 3. Сравнение результатов определения содержания железа: выполненного чисто спектроскопически (ось абсцисс) и с привлечением данных фотометрии.

чем в работах [13—14] для линий Fe I даны gf с точностью 0.5—1.0 %. При малых $v \sin i$ указанные линии практически неблендированы и охватывают диапазон W_λ от 20 до 200 м/Å. Как правило, пары T_e и $\lg g$, определенные для индивидуальных звезд, не совпадают с узлами сетки моделей [2], поэтому нам приходилось определять $\lg \epsilon$ (Fe) по теоретическим кривым роста для нескольких ближайших узлов сетки моделей с последующей интерполяцией на конкретные значения T_e и $\lg g$.

Влияние ошибок определения T_e , $\lg g$, ξ_t , W_λ , gf на точность величин $\lg \epsilon$ (Fe) рассмотрено в [11]. Средняя квадратичная ошибка определения $\lg \epsilon$ (Fe) для одной звезды (три спектрограммы, 16 линий) равна 0.10—0.15.

ТАБЛИЦА 2
Параметры атмосфер исследуемых звезд

HD, BD	ξ_t , км/с	По (B - V) ₀		По Sp (W _λ)		По (Fe I, Fe II)		Принятые параметры	
		T _e	lg g	T _e	lg g	T _e	lg g	T _e	lg g
1	2	3		4		5		6	
22327	1	10000	3.2	10840	3.5	10800	3.5	10800	3.5
24736	1	10400	3.8	9890	3.5	9300	3.3	9600	3.4
23387	1	9700	4.2	10350	4.3	10200	4.3	10300	4.3
23489	2	9100	4.1	9270	4.2	9600	4.3	9400	4.2
23763	1	9400	3.9	9440	4.0	9800	4.1	9600	4.1
20808	3	8800	3.7	9330	3.9	9100	3.8	9200	3.9
20842	3	9250	3.7	9770	4.0	10000	4.0	9900	4.0
20961	2	9800	3.6	10400	3.9	10600	4.1	10500	4.0
21046	2	8000	4.0	8600	3.3	8000	4.0	8300	3.7
205171	2	9450	3.8	9550	3.8	9400	3.8	9500	3.8
205331	2	9700	3.5	9550	3.5	9500	3.5	9500	3.5
47°3454	3	8550	3.8	9330	3.9	8500	3.8	8900	3.9
107966	3	8500	3.7	9120	3.9	9000	4.1	9100	4.0
108382	3	8500	3.8	8910	3.9	9800	4.3	9300	4.1
116706	3	9080	4.4	9220	4.4	9090	4.4	9150	4.4
192907	1	9600	3.1	10400	3.5	10000	3.3	10200	3.4
31647	3.5	9500	4.4	10000	4.5	9550	4.4	9800	4.4
16861	3	9000	4.1	9330	4.3	9200	4.3	9300	4.3
28978	1	8800	3.2	9550	3.6	9000	3.3	9300	3.5
31278	1	9100	3.2	9770	3.6	9100	3.3	9400	3.5
95418	1	9400	3.8	9380	3.8	10300	4.2	9800	4.0

ТАБЛИЦА 3
Результаты определения содержания железа lg ε (Fe)

HD, BD	lg ε (Fe)			Скопление	lg t	$\overline{\lg \varepsilon} (\text{Fe})$	$\overline{\lg \varepsilon} (\text{Fe}) [1]$
	По (B - V) ₀	По Sp (W _λ) (Fe I, Fe II)	Среднее				
22327	-4.42	-4.13	-4.28	Персей OB2	6.3	-4.44 ± 0.16	
24736	-4.38	-4.82	-4.60				
23387	-4.60	-4.31	-4.46	Плеяды	7.7	-4.27 ± 0.16	-4.66 ± 0.18 (8)
23489	-4.21	-4.10	-4.16				
23763	-4.18	-4.18	-4.18				
20808	-4.30	-4.21	-4.26	α Персея	7.4	-4.50 ± 0.21	
20842	-4.69	-4.60	-4.65				
20961	-4.92	-4.57	-4.75				
21046	-4.28	-4.41	-4.34				
205171	-4.50	-4.50	-4.50	M39	8.0	-4.54 ± 0.19	
205331	-4.32	-4.42	-4.37				
47°3454	-4.80	-4.72	-4.76				
107966	-4.60	-4.28	-4.44	Волосы Вероники	8.8	-4.18 ± 0.23	-4.51 ± 0.08 (3)
108382	-4.50	-3.76	-4.13				
116706	-3.98	-3.98	-3.98				
192907	-4.64	-4.57	-4.60	Группа Плеяд		-4.68 ± 0.08	
31647	-4.84	-4.68	-4.76				
16861	-4.72	-4.52	-4.62	Группа Большой Медведицы	8.5	-4.30 ± 0.41	-4.14 ± 0.40 (4)
28978	-4.21	-4.14	-4.18				
31278	-4.75	-4.66	-4.71				
95418	-3.82	-3.57	-3.70				

В табл. 3 приведены также возраст скоплений lg t из [16, 17], средние для скоплений значения lg ε (Fe) и их дисперсия. Среднее по скоплениям значение и его дисперсия $\overline{\lg \varepsilon} (\text{Fe}) = -4.40 \pm 0.14$, что незначительно отличается от обилия железа в атмосфере Солнца $\lg \varepsilon_{\odot} (\text{Fe}) = -4.54 \pm 0.2$ [18]. Анализ ошибок пока-

зывает, что дисперсия металличности внутри скоплений и групп практически равна дисперсии металличности между скоплениями. В значительной мере эта дисперсия определяется точностью использованного метода наблюдений и интерпретации.

В последнем столбце табл. 3 мы приводим средние значения $\lg \epsilon$ (Fe) для нескольких скоплений, определенные по данным каталога [1] для А-звезд, число которых указано в скобках. Сравнить их с нашими определениями можно только после учета различий шкал сил осцилляторов.

Содержание Mg, Si, Ca, Ti, Cr, Sr, Ba. Более уверенные выводы о дисперсии металличностей можно получить, распространив анализ на линии других элементов. Так как линии нейтрального и ионизованного железа использовались нами при определении параметров T_e и $\lg g$, не исключена возможность происхождения дисперсии $\Delta \lg \epsilon$ за счет ошибок определения эффективной температуры. Использование линий других элементов, имеющих иную чувствительность к температуре в данном диапазоне спектральных классов, может оказаться решающим тестом.

В указанном выше диапазоне длин волн были измерены эквивалентные ширины 46 линий Mg I, Si II, Ca I, Ti II, Cr II, Cr I, Sr II, Ba II. Анализ этих линий выполнен другой модификацией программы WIDTH5, позволяющей по каждой линии определить величину $\lg \epsilon$. Такая процедура позволяет оценить ошибки, связанные с измерениями W_λ и с неточными значениями $\lg gf$. Например, для звезды HD 31278 по 18 линиям Ti II мы получили $\lg \epsilon$ (Ti) = -6.72 ± 0.09 , а по линиям Sr II — $\lg \epsilon$ (Sr) = -8.78 ± 0.15 . Результаты определения величин $\lg \epsilon$, приведены в табл. 4. Анализ данных табл. 4 показал, что диспер-

ТАБЛИЦА 4
Результаты определения содержания $\lg \epsilon$ Mg I, Si II, Ca I, Ti II, Cr II, Cr I, Sr II, Ba II

HD, BD	Mg I	Si II	Ca I	Ti II	Cr II	Cr I	Sr II	Ba II
22327	-4.32	-5.93	-5.46	-7.17	-6.74	-5.98	-9.40	-9.52
24736	-4.72	-3.88	-6.60	-7.21	-6.42	-6.30	-8.66	—
23387	-4.70	-4.02	-5.23	-6.92	-6.41	-6.10	-9.20	-9.18
23489	-4.57	-3.61	-5.05	-6.57	-6.37	-6.18	-8.85	-8.81
23763	-4.82	-3.20	-4.90	-6.47	-6.18	-7.07	-8.70	-7.81
20808	-4.11	-4.07	-5.46	-6.66	-6.02	-6.18	-8.78	-9.10
20842	-4.46	-4.62	-5.73	-7.34	-6.65	-6.25	—	—
20961	-4.10	-4.65	-6.18	-7.15	-6.60	-6.08	-9.35	-9.65
21046	-3.20	-3.32	-4.43	-6.28	-5.93	-6.37	-8.76	-8.72
205171	-4.36	-4.12	-6.32	-7.02	-6.40	-6.22	-8.66	-8.84
205331	-4.01	-3.66	-6.13	-7.00	-5.78	-5.66	-9.13	-9.37
47°3454	-4.60	-3.85	-5.38	-6.70	-6.33	-6.50	-9.28	—
107966	-3.99	-3.85	-5.18	-6.51	-6.25	-6.25	-8.75	-9.58
108382	-3.40	-3.93	-4.60	-5.90	-5.94	-5.26	-8.00	—
116706	-3.25	-3.88	-4.70	-5.97	-6.05	-5.77	-8.41	-8.61
192907	—	-4.42	-5.93	-7.10	-6.60	-6.15	-9.24	—
31647	-4.22	-4.58	-5.54	-6.87	-6.49	-6.42	-10.27	-9.72
16861	-4.37	-4.57	-5.90	-6.89	-6.34	-6.33	-9.35	-9.64
28978	-4.30	-4.76	-5.26	-6.49	-6.25	-6.16	-8.68	-8.78
31278	-4.60	-4.35	-5.55	-6.72	-6.39	-6.32	-8.78	-8.22
95418	-4.21	-3.63	-5.04	-6.11	-5.63	-5.59	-7.84	-7.37
Число линий	2	2	2	18	16	3	2	1

сия содержания титана между скоплениями [σ_1 (Ti) = 0.32] втрое превосходит дисперсию содержания титана внутри скопления [σ_2 (Ti) = 0.10], а дисперсия содержания стронция между скоплениями [σ_1 (Sr) = 0.43] вдвое больше дисперсии содержания стронция внутри скопления [σ_2 (Sr) = 0.22].

Литература

1. Catalogue of Fe/H determinations / G. C. de Strobel, C. Bentolia, B. Hauck, A. Curchool. — Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 1980, 41, p. 405—419.
2. Kurucz R. L. Model atmospheres for G, F, A, B and O stars. — Astrophys. J. Suppl. Ser., 1979, 40, p. 1—340.

3. Photoelectric Catalogue / V. M. Blanco, S. Demers, G. G. Douglass, M. P. Fitzgerald. Washington, 1968.
4. Buscombe W. MK Spectral Classifications 3-d General Catalogue. Evanston, 1977.
5. Mermilliod I. C. Catalogue of *UBV* photometry and MK spectral type in open clusters. — *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 1977, **24**, p. 159–297.
6. Копылов И. М. Эквивалентные ширины линий поглощения в спектрах 109 звезд O5–B7. — *Изв. Кр. АО*, 1958, **20**, с. 123–155.
7. Леушин В. В. Количественное исследование peculiarностей в спектрах звезд Ар. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1971, **3**, с. 36–61.
8. Nicolet V. Geneva photometric boxes. III. Distances and reddenings for 43 open clusters. — *Astron. and Astrophys.*, 1981, **104**, p. 185–197.
9. Страйжис В. Л. Многоцветная фотометрия звезд. Вильнюс: Мокслас, 1977.
10. Клочкова В. Г., Копылов И. М., Панчук В. Е. К вопросу о применении моделей атмосфер для определения параметров горячих звезд. — *Астрон. ж.*, 1983, **60**, с. 1114–1119.
11. Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Цымбал В. В. Параметры атмосферы и металличность θ Leo (A2V). — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1984, **19**, с. 22–27.
12. Blackwell D. E., Shallis M. J., Simmons G. J. Oscillator strengths of Fe II lines derived from the solar spectrum: Choice of solar model atmosphere. — *Astron. and Astrophys.*, 1980, **81**, p. 340–343.
13. Precision measurement of relative oscillator strengths. VIII. Measures of Fe I transitions from levels $a^3 F_{2-4}$ (1.49–1.61 eV) with an accuracy of 1 per cent / D. E. Blackwell, A. D. Petford, M. J. Shallis, G. J. Simmons. — *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1980, **191**, p. 445–450.
14. Precision measurement of relative oscillator strengths. IX. Measures of Fe I transitions from levels $a^5 P_{1-3}$ (2.18–2.28 eV), $a^3 P_2$ (2.28 eV), $a^3 P_{0.1}$ (2.49–2.42 eV), $z^7 D_{1-5}^0$ (2.48–2.40 eV) and $a^3 (H_{4-6})$ (2.45–2.40 eV) / — D. E. Blackwell, A. D. Petford, M. J. Shallis, G. J. Simmons. — *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1982, **199**, p. 43–52.
15. Kurucz R. L. Semiempirical calculation of *gf* values. IV. Fe II. — *Smithsonian Astrophys. Observ. Special Report*, 1981, N 390, p. 1–321.
16. Abt H. A. The occurrence of abnormal stars in open clusters. — *Astrophys. J.*, 1979, **230**, p. 485–496.
17. Guetter H. H. Spectroscopic studies of stars in Per OB2. — *Astron. J.*, 1977, **82**, p. 598–605.
18. Blackwell D. E., Shallis M. J. Interpretation of the solar spectrum 300–900 nm. II. Fe I lines of excitation potential 0.00–1.01 eV: use of new oscillator strengths of 0.5 per cent accuracy. — *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1979, **186**, p. 673–684.

Поступила в редакцию 22 апреля 1983 г.