

ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕРЫ И МЕТАЛЛИЧНОСТЬ  $\theta$  Leo (A2V)

В. Г. Клочкова, В. Е. Павчук, В. В. Цымбал

Для звезды  $\theta$  Leo методом моделей атмосфер определены  $T_e=9300$  К,  $\lg g=3.4$ ,  $\lg \epsilon(\text{Fe})=-4.46$ ,  $\lg \epsilon(\text{Cr})=-6.28$ ,  $\lg \epsilon(\text{Ti})=-6.86$ . Изучены ошибки метода.

Using the method of model atmospheres for the star  $\theta$  Leo  $T_e=9300$  K,  $\lg g=3.4$ ,  $\lg \epsilon(\text{Fe})=-4.46$ ,  $\lg \epsilon(\text{Cr})=-6.28$ ,  $\lg \epsilon(\text{Ti})=-6.86$  are defined. The errors of the method are estimated.

В САО АН СССР проводятся спектроскопические исследования звезд — членов рассеянных скоплений [1, 2]. Кроме задач количественной спектральной классификации, определения типа и степени пекулярности, определения величины  $v \sin i$  мы планируем применять детальный анализ спектров методом моделей атмосфер. Есть надежда, что такой комплексный подход в применении к обширному спектроскопическому материалу позволит в некоторых деталях уточнить картину эволюции звезд второго поколения. Ниже мы приведем результаты определения параметров звезды спектрального класса A2V методом моделей атмосфер.

В качестве примера для выяснения некоторых методических особенностей и оценки ошибок избранного нами пути анализа атмосферы мы исследовали стандартную звезду  $\theta$  Leo (A2V). Выбор звезды обусловлен прежде всего хорошей привязкой сетки моделей атмосфер [3] к наблюдениям в точке с близкими параметрами  $T_e$  и  $\lg g$  — параметрами атмосферы Веги. Мы использовали результаты определения эквивалентных ширин линий элементов FeI, FeII, TiII, CrI и CrII, линий  $H_\gamma$  и  $H_\delta$  и профиль линии  $H_\gamma$  из работы [4].

**Параметры модели атмосферы.** Основная идея излагаемого подхода состоит в определении характеристик модели атмосферы по таким деталям спектра, которые формируются в глубоких слоях атмосферы, прилегающих к уровню формирования непрерывного спектра. Ошибки, которые неизбежны при современном моделировании звездной атмосферы, в таком случае должны быть минимальными, так как эмпирическая калибровка сетки моделей атмосфер основана главным образом на характеристиках излучения в непрерывном спектре. Такими деталями являются слабые линии металлов и крылья водородных линий.

На плоскости  $T_e - \lg g$  условию равенства наблюдаемой и теоретической характеристик удовлетворяет не точка с координатами  $T_e$  и  $\lg g$ , а совокупность точек, которую можно называть изолинией данной характеристики. Область пересечения большинства изолиний определяет характеристики искомой модели. На рис. 1 приведены изолинии для эквивалентных ширин  $W(H_\gamma)$  и  $W(H_\delta)$ , для полуширин на заданном уровне остаточной интенсивности  $r$  линии  $H_\gamma - \Delta\lambda(r)$ .

К этим изолиниям следует добавить изолинии характеристик, имеющих иную чувствительность к  $T_e$  и  $\lg g$  и, следовательно, дающих уверенную область пересечения с изолиниями  $W$  и  $\Delta\lambda$ . Такими характеристиками для A-звезд являются показатель цвета  $B-V$  и индекс  $c_1$  системы Стремгrena. Недостатком их использования является чувствительность этих характеристик к металличности и необходимость учета межзвездного поглощения, но в случае хорошо изученных фотометрически близких объектов использование  $B-V$  и  $c_1$  не ухудшает общей точности метода.

Из рис. 1 видно, что ускорение силы тяжести в атмосфере  $\theta$  Leo ( $\lg g \leq 3.5$ ) ниже, чем у звезд A2V главной последовательности ( $\lg g=4.0 \div 4.1$ ). Возмож-

ные причины такого несоответствия анализируются отдельно [5], здесь же отметим, что в рамках использования метода моделей атмосфер величина ускорения силы тяжести в атмосфере является внутренним параметром метода, связанным системой поправок с ускорениями, определенными другими методами. Поэтому для внутренней самосогласованности метода моделей атмосфер мы не вносим поправок, о которых говорится в [5].

**Анализ металлического спектра.** Мы ограничимся рассмотрением спектра элементов FeI, FeII, TiII, CrI, CrII, используя неблендированные линии, отобранные по списку [4] и по спектрам А-звезд, полученным на ОЗСП БТА. Для анализа этих линий мы применили программу WIDTH5, разработанную Р. Куручем. Использование этой и аналогичных, менее распространенных программ обычно сводится к следующим процедурам:

а) На плоскости  $T_e - \lg g$  выбирается узел сетки моделей, ближайший к полученным параметрам (см., например, [6]), или для полученных параметров рассчитывается модель (см., например, [7]);

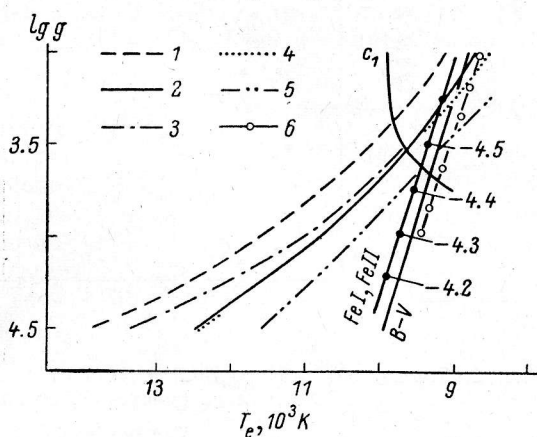


Рис. 1. Изолинии характеристик водородного спектра, ионизационного равновесия и показателей цвета  $\theta$  Leo.

Цифрами указаны значения  $\lg \epsilon(\text{Fe})$  вдоль изолинии FeI, FeII. 1 — W (H $\delta$ ); 2—5 — H $\gamma$  [2 — W, 3 —  $\Delta\lambda$  ( $r=.9$ ), 4 —  $\Delta\lambda$  ( $r=.8$ ), 5 —  $\Delta\lambda$  ( $r=.7$ )]; 6 — CrI, CrII.

б) для выбранной таким образом модели вычисляется зависимость содержания  $\epsilon$  элемента от эквивалентной ширины  $W$ . Определяется то значение микротурбулентной скорости  $\xi_t$ , при котором  $\epsilon$  постоянно в пределах ошибок для всех  $W$ ;

в) для избранной  $\xi_t$  вычисляется содержание других элементов.

Мы придерживались в основном этой схемы, изменив некоторые детали по следующим причинам.

1. В ряде случаев металлический спектр можно привлекать для уточнения или подтверждения выбранных параметров  $T_e$  и  $\lg g$ .

2. Задача массового анализа спектров десятков звезд трудно совместима с вышеописанной процедурой анализа избранных звезд.

3. Необходимо иметь систему оценок точности метода для обоснованного определения числа используемых линий, количества спектрограмм каждого объекта, точности модельных приближений.

В связи с этим для линий FeI и FeII мы провели расчеты в следующих узлах сетки моделей [3]: (10000, 3.5), (9500, 3.5), (9000, 3.5), (9500, 4.0), (9000, 4.0), (9500, 4.5), (10000, 4.0), используя три значения микротурбулентной скорости:  $\xi_t = 3.0, 2.5$  и  $2.0$  км/с. Результаты использования полуэмпирических сил осцилляторов линий FeI из [8] видны на рис. 2. Кроме неточностей списка [8] (см., например, [9]) определенный вклад в ошибки вычисления химического состава вносит ошибочное отождествление слабых линий. Поэтому список линий был ограничен, а силы осцилляторов взяты из работ [10—12] для FeI и [13, 16] для FeII. Сопоставимость шкал [13] и [16] можно оценить по табл. 1.

На рис. 3 дан пример расчета зависимости содержания железа от  $W$  для трех значений микротурбулентной скорости. Интенсивность слабых линий слабо зависит от значения микротурбулентной скорости. Поэтому именно для линий с  $W \leq 65$  мА мы вычисляли  $\Delta \lg \epsilon = \lg \epsilon(\text{FeII}) - \lg \epsilon(\text{FeI})$  — разность средних обилий, полученных по линиям нейтрального и ионизованного железа. Комбинации параметров  $T_e$  и  $\lg g$ , для которых  $\Delta \lg \epsilon = 0$ , определяют на плоскости  $T_e - \lg g$  изолинию ионизационного равновесия, вдоль которой изменяется содержание железа. Положение этой изолинии (рис. 1) подтверждает и

уточняет первоначально определенные параметры  $\theta$  Leo :  $T_e = 9300 \pm 200$  К,  $\lg g = 3.4 \pm 0.2$ . Линия ионизационного равновесия для хрома, приведенная на

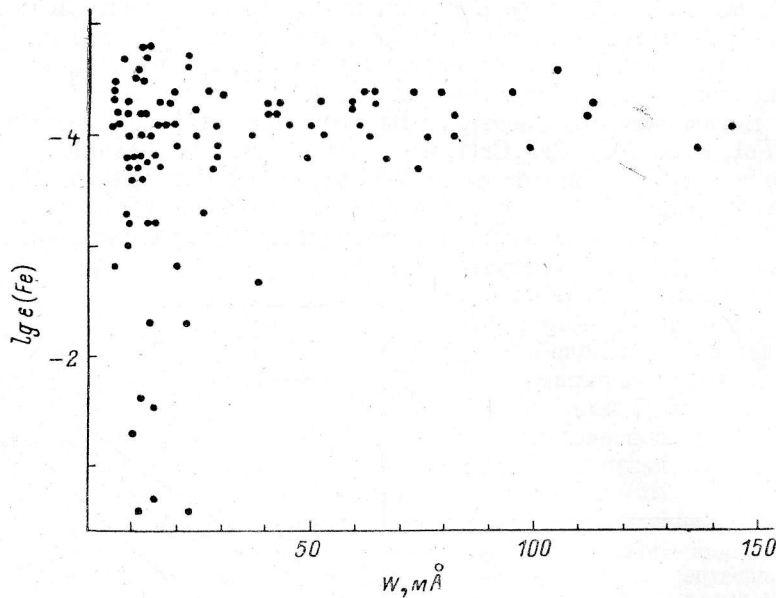


Рис. 2. Зависимость содержания железа от эквивалентной ширины, полученная для всех линий из списка [4] со значениями  $gf$  из [8].  
 $T_e = 10\,000$  К;  $\lg g = 4.0$ ;  $\xi_t = 3.0$ .

рис. 1, определена менее уверенно вследствие малого количества линий нейтрального хрома и низкой точности нуль-пунктов шкал сил осцилляторов CrI и CrII.

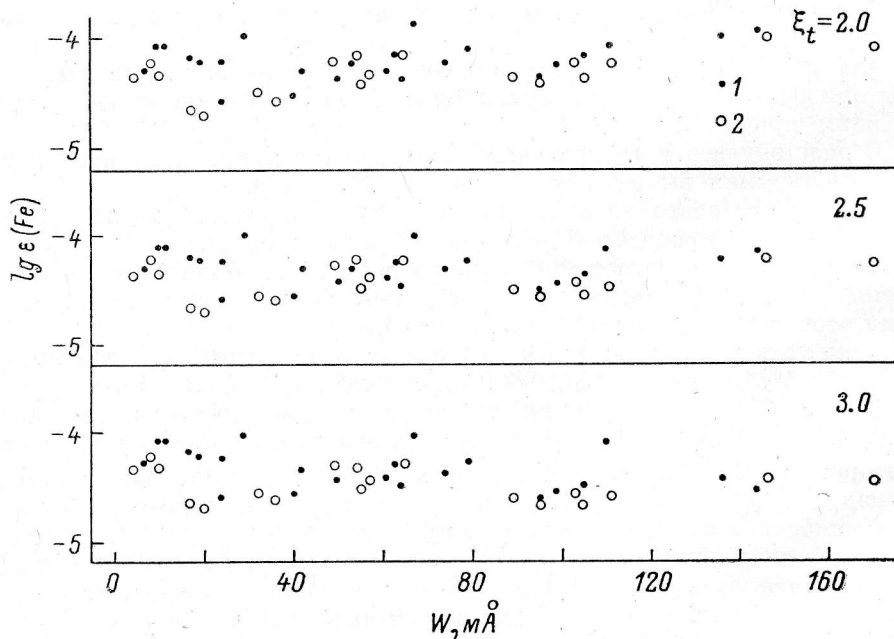


Рис. 3. Зависимость содержания железа от эквивалентной ширины линий FeI (1) и FeII (2), рассчитанная для модели с  $T_e = 9500$  К,  $\lg g = 3.5$  при трех значениях микротурбулентной скорости  $\xi_t$ .

На рис. 4 показаны зависимости  $\lg \epsilon(\text{FeI})$  и  $\lg \epsilon(\text{FeII})$  от  $T_e$  и  $\lg g$ , из которых следует, что предпочтительным является определение содержания железа по линиям FeII. В окрестности точки (9500, 3.5) уменьшение эффективной тем-

ТАБЛИЦА 1  
Сравнение сил осцилляторов линий

$\lambda$ [8]	$\lg gf$ [13]	$\lg gf$ [16]
4178.86	-2.71	-2.898
4413.60	-3.87	-4.020
4416.83	-2.61	-2.603
4491.40	-2.70	-2.780
4508.29	-2.43	-2.417

пературы на 200 К уменьшит  $\lg \epsilon$  на 0.04, а увеличение  $\lg g$  на 0.1 приведет к увеличению  $\lg \epsilon$  на 0.04. Использование линий FeI приводит к поправкам обратного знака, также практически компенсирующим друг друга. Геометрически это означает, что в плоскости  $T_e - \lg g$  линии постоянного химического состава в окрестности изолинии ионизационного равновесия перпендикулярны к последней. Следовательно, для основных расчетов химического состава вместо вычисления модели (9300, 3.4) можно воспользоваться готовой моделью (9500, 3.5) из работы [3], пересчитав затем полученный состав на точку (9300, 3.4).

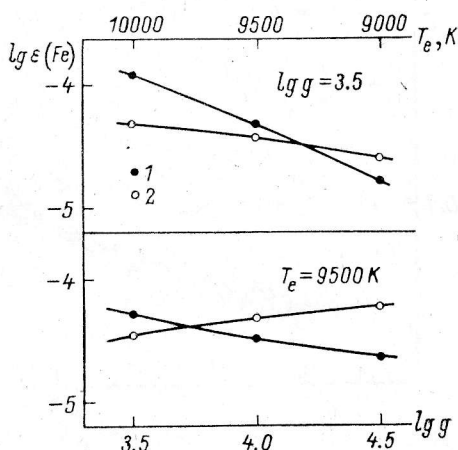


Рис. 4. Чувствительность результатов определения содержания железа к параметрам модели атмосферы.

1 — определения по FeI; 2 — по линиям FeII.

Процедура выбора величины микротурбулентной скорости ясна из рис. 3. Аналогичные зависимости мы строили и для линий TiII и CrII. В дальнейших расчетах мы приняли  $\xi_t = 2.5$  км/с. Расчеты показывают, что выбор  $\xi_t$  можно также проводить по модели из узла сетки, ближайшего к параметрам атмосферы, определенным по ( $T_e - \lg g$ )-диаграмме.

ТАБЛИЦА 2  
Результаты определения содержания Fe, Ti, Cr в атмосфере  $\theta$  Leo

Элемент	Число линий	Источник сил осцилляторов	$\lg \epsilon \pm \Delta \lg \epsilon$ (9500, 3.5)	$\lg \epsilon$ (9300, 3.4)
FeI	23	[10-12]	$-4.30 \pm 0.04$	-4.42
FeII	19	[13, 16]	$-4.43 \pm 0.04$	-4.51
CrI	3	[7]	$-5.95 \pm 0.06$	-6.16
CrII	18	[14]	$-6.31 \pm 0.04$	-6.39
TiII	29	[8, 15]	$-6.72 \pm 0.04$	-6.86

В табл. 2 приведены результаты расчетов для модели с параметрами  $T_e = 9500$ ,  $\lg g = 3.5$ ,  $\xi_t = 2.5$  км/с. В ней указаны число использованных линий, источники сил осцилляторов, средние значения содержания элементов и их среднеквадратичная ошибка. В последнем столбце даны значения  $\lg \epsilon$ , пересчитанные на точку (9300, 3.4) с помощью зависимостей, аналогичных рис. 4. Различное содержание элемента, получаемое по разным стадиям ионизации, отражает то обстоятельство, что изолиния ионизационного равновесия на плоскости  $T_e - \lg g$  не проходит через точку с параметрами модели. Одной из причин может

являться неудовлетворительная сопоставимость шкал сил осцилляторов нейтральных атомов и их ионов.

**Глубины формирования линий и кривая роста.** На рис. 5 представлена зависимость эффективной глубины формирования линий  $\lg \tau$  от эквивалентной ширины. Видно, что для  $W \leq 90$  мÅ зависимость является общей для исследуемых элементов.

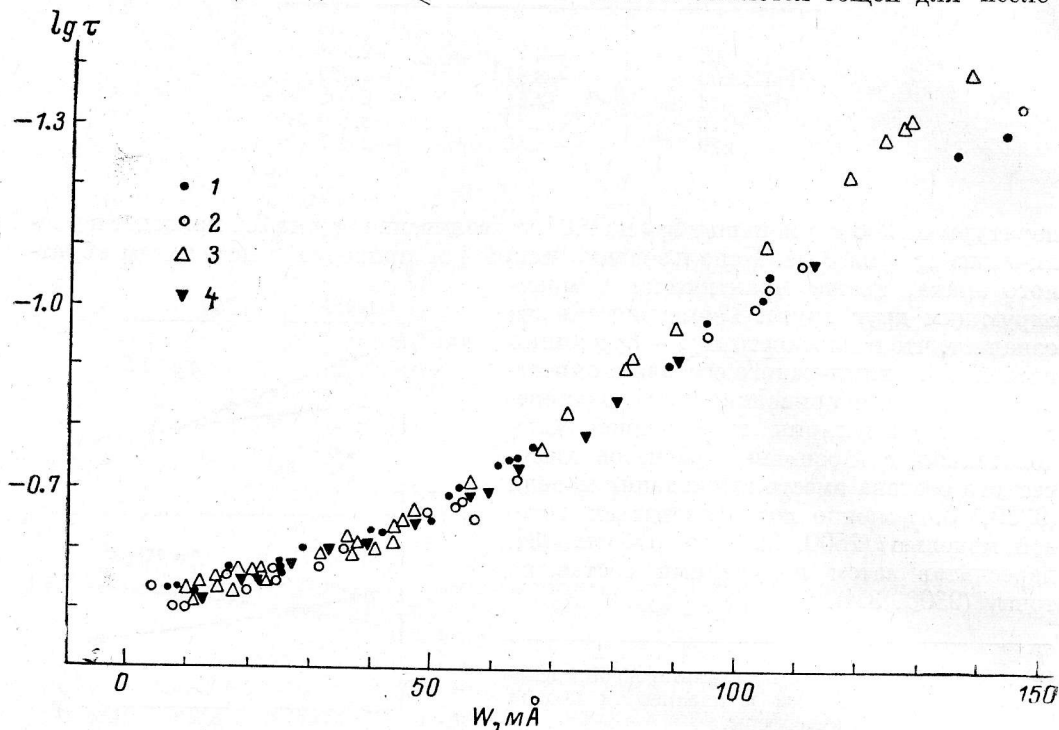


Рис. 5. Зависимость эффективной глубины формирования линий в атмосфере от эквивалентной ширины.

$T_e=9500$  К;  $\lg g=3.5$ ;  $\xi_t=2.5$ , 1 — FeI; 2 — FeII; 3 — TiII; 4 — CrII.

дованных элементов. Линии с  $W < 60$  мÅ формируются в слоях, для которых различие в температуре не превышает 300 К. Эти слои не подвержены существенному дифференциальному влиянию покровного эффекта на температурное распределение, и, следовательно, формирующиеся здесь линии наиболее пригодны для исследования звезд с металличностью  $\pm 0.5$  dex при помощи сетки моделей, рассчитанной для солнечного химического состава.

На рис. 6 приведены кривые роста для двух линий — FeI и FeII, рассчитанные при различных значениях микротурбулентной скорости. Рис. 6 позволяет

ТАБЛИЦА 3

Связь ошибок определения химического состава с ошибками определения параметров атмосферы

Ошибка определения параметра	Элемент	Ошибка определения состава	Ошибка определения параметра	Элемент	Ошибка определения состава
$\Delta T_e=200$ К	Fe I	0.17	$\Delta \lg g=0.2$ $\Delta \xi_t=0.5$ км/с	Cr II	0.05
	Fe II	0.06		Ti II	0.01
	Cr I	0.24		FeI $W < 65$ мÅ	0.01
	Cr II	0.06		FeII $W < 65$ мÅ	0.02
	Ti II	0.11		FeI $W > 65$ мÅ	0.11
$\Delta \lg g=0.2$	Fe I	0.06	$\Delta W=20\%$ $\Delta W=10\%$	FeII $W > 65$ мÅ	0.12
	Fe II	0.04		FeI, II $W < 65$ мÅ	0.12
	Cr I	0.06		FeI, II $W > 65$ мÅ	0.14

наглядно оценить связь ошибок определения  $W$  и  $\xi_t$  с ошибками определения  $\lg \varepsilon$  (Fe) при использовании линий существенно разной интенсивности.

**Ошибки метода.** В табл. 3 приведены ошибки определения содержания элементов Fe, Ti, Sr в зависимости от ошибок определения параметров  $T_e$ ,  $\lg g$ ,  $\xi_t$ ,  $W$ . Ошибки, приведенные в четвертом столбце табл. 2, связаны с внутренней точностью использованных шкал сил осцилляторов и ошибками определения эквивалентных ширин. Определенную роль играют также ошибки отождествления и блендирование линий. Из табл. 2 и 3 следует, что металличность звезд A2V можно определять по спектрам с высоким спектральным разрешением (0.2–0.3 Å) с точностью

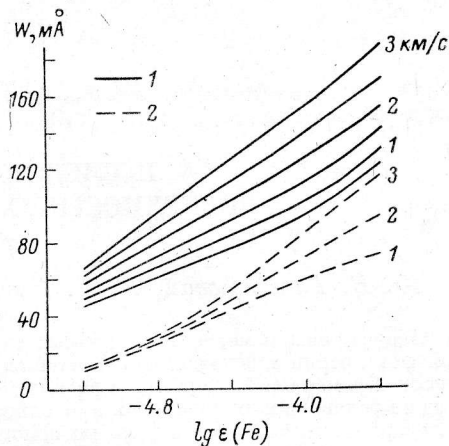


Рис. 6. Кривая роста для двух избранных линий в спектре  $\theta$  LeO.

1 — FeII 4508.28, ( $W=85$  мÅ); 2 — FeI 4271.16 ( $W=40$  мÅ);  $T_e=9500$  К;  $\lg g=3.5$ .

$\Delta \lg \varepsilon = 0.1-0.2$ , если ошибки определения эффективной температуры не превосходят 200 К, а эквивалентные ширины десятка слабых линий измерены с точностью 20 %.

#### Литература

1. Клочкова В. Г., Копылов И. М., Кумайгородская Р. Н. Врп Арзвезды в движущемся скоплении Скорпиона—Центавра. — Письма в АЖ, 1981, 7, с. 366—371.
2. Клочкова В. Г. Пекулярные звезды в Плеядах. — Сообщ. САО, 1982, 37, с. 73—80.
3. Kurucz R. L. Model Atmospheres for G, F, A, B and O stars. — Astrophys. J. Suppl. Ser., 1979, 40, p. 1—340.
4. Line intensities in the spectra of representative stars of spectral types B to C / K. O. Wright, E. K. Lee, T. V. Jacobson, J. L. Greenstein — Publ. of the Dominion Astrophys. Observ., 1964, XII, No. 7, p. 173—291.
5. Клочкова В. Г., Копылов И. М., Панчук В. Е. К вопросу о применении моделей атмосфер для определения параметров горячих звезд. — Астрон. ж., 1983, 6, с. 1114—1119.
6. Sadakane K. Abundance analysis of 21 Pegasi (B 9.5 V) and HR 7338 (A0 III). — PASP, 1981, 93, p. 587—593.
7. Sadakane K., Nishimura M. Differential abundance analysis of Gamma Geminorum (A0 IV) relative to the standard star Alpha Lyrae (A0 V). — Publ. Astron. Soc. Japan, 1979, 31, p. 481—493.
8. Kurucz R. L., Peytremann E. A table of semiempirical  $gf$  values. — Smithsonian Astrophys. Observ. Special Report, 1972, No. 362, pt. 2.
9. Smith P. L. Absolute oscillator strengths for the iron group: a correction to the data of Warner for the second spectra and a comment on some of the semiempirical results of Kurucz and Peytremann. — Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1976, 117, p. 275—290.
10. Precision measurement of relative oscillator strengths. IV. Attainment of 0.5 per cent accuracy. FeI transitions from level  $a^5 D_{0-4}$  (0.00—0.12 eV) / D. E. Blackwell, P. A. Ibbetson, A. D. Petford, M. I. Shallis — Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1979, 186, p. 633—650.
11. Precision measurement of relative oscillator strengths. VIII. Measures of FeI 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. I. Shallis, G. I. Simmons — Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1980, 191, p. 445—450.
12. Precision measurement of relative oscillator strengths. IX. Measures of FeI 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),  $Z^7 D^{\circ}_{1-5}$  (2.48—2.40 eV) and  $a^3 H_{4-6}$  (2.45—2.40 eV) / D. E. Blackwell, A. D. Petford, M. I. Shallis, G. I. Simmons — Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1982, 199, p. 43—52.
13. Blackwell D. E., Shallis M. I., Simmons G. I. Oscillator strengths of FeII lines derived from the solar spectrum: choice of solar model atmosphere. — Astron. and Astrophys., 1980, 81, p. 340—343.
14. Warner B. Absolute oscillator strengths for once-ionized elements of the iron group. — Mem. Roy. Astron. Soc., 1967, 70, p. 165—253.
15. Roberts I. R., Anderson T., Sørensen G. Determination of atomic lifetimes and absolute oscillator strengths for neutral and ionized titanium. — Astrophys. J., 1973, 181, p. 567—586.
16. Kurucz R. L. Semiempirical calculation of  $gf$  values. IV. FeII. — Smithsonian Astrophys. Observ. Special Report, 1981, No. 390.

Поступила в редакцию 28 октября 1982 г.