

УДК: 524.3—36:520.8

О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ЗВЕЗД МЕТОДОМ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР

В. В. ЛЕУШИН, Г. П. ТОПИЛЬСКАЯ

Поступила 2 октября 1985

Принята к печати 20 марта 1986

Сравниваются разные программы расчета профилей и эквивалентных ширин линий поглощения. Показана необходимость точного учета квадратичного эффекта Штарка при расчетах средних и сильных линий. Исследуется влияние моделей атмосфер на теоретические эквивалентные ширины линий. Оценивается точность определения содержания элементов при использовании метода моделей атмосфер.

1. *Введение.* Определение химического состава звезд на основе моделей атмосфер сравнением теоретически рассчитанных и наблюдаемых контуров и эквивалентных ширин линий связано с целым рядом упрощений и приближений при расчетах. В настоящее время в литературе встречаются довольно обширные сводки расчетов эквивалентных ширин и контуров линий по программам разных авторов [1—5]. Особенно часто для подобных расчетов используются программы WIDTH 5 и WIDTH 6. Каждая из этих программ использует определенные математические и физические приближения, к тому же при счете применяются разные модели атмосфер.

В настоящей работе сопоставлены результаты расчетов по некоторым программам счета контуров и эквивалентных ширин линий с использованием разных моделей с целью выяснения важности тех или иных приближений и методов устранения различий в расчетах разных авторов. Для того, чтобы оценить ошибку определения химического состава методом моделей атмосфер, вызванную только теоретическими расчетами и не связанную с ошибками атомных параметров и измерений, одни и те же линии были посчитаны по трем программам расчета линий и для моделей, полученных по разным программам. С этой целью использовались три программы вычисления профилей и эквивалентных ширин линий поглощения в предположении ЛТР: программы Куруца WIDTH 5 и WIDTH 6 и программа KONTUR, созданная нами на основе программы Снежко [6].

2. *Вычисление потока излучения.* В программах WIDTH 5 и WIDTH 6

используется шкала геометрических глубин $M = - \int_r^{\infty} \nu dr$, содержащая 40

точек по глубине, в которой должна быть задана модель. В этих глубинах вычисляются коэффициенты поглощения в континууме и в линии. Опти-

ческие глубины находятся интегрированием $\tau_\lambda = \int_0^M x_\lambda dM$, после чего с

помощью квадратичной интерполяции по τ_λ осуществляется переход к фиксированным глубинам t_j , которые используются при интегрировании в процессе вычисления функции источника и потока.

В программе KONTUR модель задается в шкале оптических глубин $\tau_{\lambda St}$ на некоторой фиксированной длине волны λ_{St} , максимальное количество точек по глубине — 50. При вычислении потока на длине

волны λ решается дифференциальное уравнение $d\tau_{\lambda St} = \frac{x_{\lambda St}}{x_\lambda} dt$, методом Рунге-Кутты прогноза и коррекции четвертого порядка, в результате чего находятся точки $\tau_{\lambda St}^*$, соответствующие коэффициенту поглощения x_λ . При вычислении потока в линии в это уравнение добав-

ляется коэффициент поглощения в линии a_λ , $d\tau_{\lambda St} = \frac{x_{\lambda St}}{x_\lambda + a_\lambda} dt$. В вычисленных точках $\tau_{\lambda St}^*$ квадратичной интерполяцией по $\tau_{\lambda St}$ находятся параметры модели T , P_s , P_g , и с этими значениями вычисляются функция источника S_λ и поток H_λ .

Методика вычисления S_λ и H_λ такая же, как в программе ATLAS 5 [7]. Для функции источника методом итераций Гаусса — Зайделя решается уравнение

$$S_\lambda = (1 - \rho_\lambda) B_\lambda + \rho_\lambda J_\lambda,$$

где ρ_λ — доля рассеяния в полном поглощении, B_λ — функция Планка, J_λ — средняя интенсивность,

$$J_\lambda = \frac{1}{2} \int_0^\infty S_\lambda(t) E_1(|t - \tau|) dt.$$

В первом приближении принимается $S_\lambda = B_\lambda$, итерации прекращаются

после достижения точности $\Delta S_\lambda / S_\lambda < 10^{-5}$ во всех точках по глубине. Интегрирование средней интенсивности и потока,

$$H_i(\tau) = \frac{1}{2} \int_0^\infty S_\lambda(t) E_2(|t - \tau|) dt,$$

осуществляется 43-точечной квадратурой Гаусса.

3. Коэффициент поглощения в линии. Профиль коэффициента поглощения в линии во всех программах описывается функцией Фойгта,

$$H(a, v), \text{ где } a = \frac{\Delta\lambda_R + \Delta\lambda_{St} + \Delta\lambda_W}{\Delta\lambda_D}, \quad v = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_D}.$$

Здесь $\Delta\lambda_D$ — доплеровская ширина линии, $\Delta\lambda_R$ — ширина вследствие затухания излучения, $\Delta\lambda_{St}$ — штарковская ширина, $\Delta\lambda_W$ — ширина, обусловленная эффектом Ван-дер-Ваальса.

В программе WIDTH 5 для учета эффектов Штарка и Ван-дер-Ваальса необходимо задать соответствующие константы C_4 и C_6 . Тогда $\Delta\lambda_{St}$ и $\Delta\lambda_W$ вычисляются по приближенным формулам Унзольда.

$$\Delta\lambda_{St} = \frac{\lambda^2}{4\pi c} C_4^{2/3} 38.3 \left(\frac{8kT}{\pi m_e} \right)^{1/6} N_e,$$

$$\Delta\lambda_W = \frac{\lambda^2}{4\pi c} C_6^{0.4} (34 N(\text{H I}) + 10 N(\text{He I})) \left(\frac{8kT}{\pi m_H} \right)^{0.3}.$$

Если C_4 и C_6 не заданы, то приближенно считается $a = \frac{10 \Delta\lambda_R}{\Delta\lambda_D}$.

В программе WIDTH 6 уширение Ван-дер-Ваальса вычисляется также по Унзольду,

$$\Delta\lambda_W = \frac{\lambda^2}{4\pi c} C_6 (2N(\text{H I}) + 0.42 N(\text{He I})) (7 \cdot 10^{-4})^{0.3},$$

а для оценки уширения Штарка применяется аппроксимация

$$\Delta\lambda_{St} = \frac{\lambda^2}{4\pi c} C_4 N_e \quad [8].$$

В случае, если константы C_4 и C_6 не заданы, они вычисляются в программе:

$$C_4 = 10^{-8} \left(\frac{(Z+1)^2 13.595}{\chi} \right)^{5.2}, \quad C_6 = 6.5 \cdot 10^{-9} \left(\frac{(Z+1)^2 13.595}{\chi} \right)^{4.5},$$

где Z — заряд иона, χ — потенциал ионизации с верхнего уровня.

В программе KONTUR для учета квадратичного эффекта Штарка используются результаты наиболее точных расчетов, проведенных Гримом [9, 10]. Для этого для каждой линии вводятся зависящие от температуры электронная ударная полуширина w , ионная ударная полуширина α и сдвиг d . Штарковская ширина линии и сдвиг вычисляются в каждой точке по глубине по формулам

$$\Delta\lambda_{St} = 2wN_e \cdot 10^{-16} (1 + \alpha N_e^{1/4} A),$$

$$d = wN_e \cdot 10^{-16} (d/w + \alpha N_e^{1/4} B),$$

где

$A = 1.75 (1 - 0.75 r)$, $B = 2 (1 - 1.2 r)$ для нейтральных атомов

и

$A = 1.75 (1 - 1.2 r)$, $B = 2 (1 - 1.2 r)$ для ионизованных атомов.

Здесь r —параметр дебаевского экранирования, $r = 1.85 \pi^{1/6} N_e^{1/6} \left(\frac{e^2}{kT} \right)^{1/2}$.

В случае применения программы KONTUR для изучения звезд равных спектральных классов, с $T_e > 8000^\circ$, уширение вследствие эффекта Ван-дер-Ваальса может не учитываться из-за его незначительности. Тогда параметры функции Фойгта имеют вид $a = \frac{\Delta\lambda_R + \Delta\lambda_{St}}{\Delta\lambda_D}$,

$v = \frac{\Delta\lambda + d}{\Delta\lambda_D}$. Важным преимуществом здесь является использование точных, зависящих от температуры штарковских ширин.

4. Сравнение результатов расчетов по программам WIDTH 5, WIDTH 6 и KONTUR. По программам WIDTH 5, WIDTH 6, KONTUR были проведены расчеты спектральных линий для моделей с $T_e = 8850^\circ$, $\lg g = 4.0$ и $T_e = 22500^\circ$, $\lg g = 3.4$. При сравнении теоретических значений с экспериментальными использовались эквивалентные ширины линий для звезд TX Leo ($T_e = 8850^\circ \pm 100^\circ$, $\lg g = 3.8 \pm 0.2$, $v_t = 1.3$ км/с) и V 380 Cyg ($T_e = 22500^\circ \pm 200^\circ$, $\lg g = 3.4 \pm 0.2$, $v_t = 3.3$ км/с). Модели рассчитывались по двум модификациям программы ATLAS 5: для WIDTH 6—по ATLAS 6, для WIDTH 5 и KONTUR—по SAM 1 [11]. Модели, рассчитанные по этим программам, почти идентичны, различия лежат в пределах различий двух последовательных итераций одной модели, для которой достигнута хорошая сходимость (то есть ошибка потока меньше 1% на всех глубинах), хотя скорость сходимости может быть разной. Различия температуры в верхних слоях моделей не удается уменьшить проведением дальнейших итераций, что связано с методами расчетов и используемыми процедурами температурной коррекции. Таким образом, в

пределах точности применяемого метода эти модели являются одинаковыми. Модели считались с учетом отклонений от ЛТР и бланкетирования H-линиями. Микротурбулентная скорость для первой модели принималась

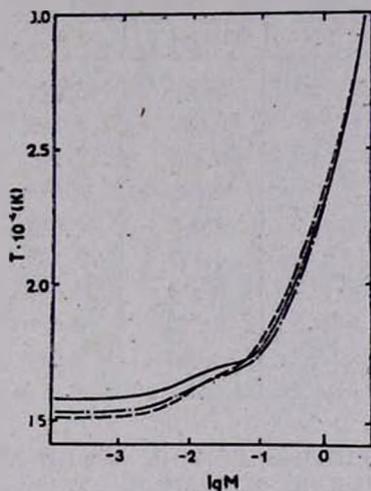


Рис. 1. Распределение температуры с глубиной для не-ЛТР моделей с параметрами $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 3.4$. Сплошная линия — модель посчитана по программе SAM 1, 5 итераций; штрих-пунктирная — SAM 1, 6 итераций; штриховая — ATLAS 6, 5 итераций.

равной 1.3 км/с, для второй — 3.3 км/с. Распределение температуры с глубиной в используемых не-ЛТР моделях показано на рис. 1, результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

При расчетах по программам WIDTH 5 и WIDTH 6 использовались те параметры уширения линий, которые вычисляются внутри этих программ. Сравнение показывает, что для слабых линий нет систематических различий между результатами, полученными по программам WIDTH 6 и KONTUR. Имеющийся разброс вызван отличиями в моделях и алгоритмах программ WIDTH 6 и KONTUR, то есть фактически обусловлен внутренней точностью метода моделей атмосфер. При усреднении по всем линиям каждого элемента эти программы дают одинаковые содержания элементов. Программа WIDTH 5 дает систематически заниженные значения эквивалентных ширин, что может привести к избыткам в содержании элементов на 0.3—0.5 логарифма относительно содержания, определенного по WIDTH 6 и KONTUR. Для сильных линий, например для линий He I в модели с $T_e = 22\,500^\circ$, программы WIDTH 5 и WIDTH 6 дают систематически заниженные значения эквивалентных ширин, что приводит к нереально большим избыткам гелия при сравнении с наблюдаемыми эквивалентными ширинами в V 380 Cyg.

Таблица 1

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ ЛИНИЙ (W_{λ} , А),
РАССЧИТАННЫЕ ПО МОДЕЛИ $T_e = 8850^\circ$, $\lg g = 4.0$,
 $v_t = 1.3$ км/с

Линия	$\lg \frac{N_{el}}{\Sigma N}$	Программа		W_{λ} , набл.
		WIDTH 6	KONTUR	
Mg II 4391	-3.25	0.083	0.049	0.061
4433		0.096	0.115	0.036
Fe I 4045	-4.40	0.129	0.193	0.260
4187.04		0.069	0.076	0.054
4187.80		0.068	0.070	0.065
Fe II 4233		0.117	0.103	0.230
4576		0.076	0.089	0.078
Ti II 4300	-7.12	0.097	0.091	0.182
4399		0.066	0.060	0.103

Таблица 2

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ ЛИНИЙ (W_{λ} , А),
РАССЧИТАННЫЕ ПО МОДЕЛИ $T_e = 22\ 500^\circ$, $\lg g = 3.4$,
 $v_t = 3.3$ км/с

Линия	$\lg \frac{N_{el}}{\Sigma N}$	Программа			W_{λ} , набл.
		W5	W6	KONTUR	
He I 3965	-1.0	0.151	0.186	0.328	0.23
4121		0.118	0.150	0.175	0.38
4388		0.153	0.199	0.512	0.58
4438		0.071	0.088	0.110	0.19
N II 3995	-4.45	0.049	0.064	0.060	0.148
4035		0.016	0.025	0.022	0.045
4176		0.012	0.019	0.016	0.070
4601		0.022	0.034	0.030	0.099
O II 4317	-3.45	0.039	0.052	0.044	0.190
4367		0.041	0.054	0.047	0.201
Mg II 4390	-3.85	0.022	0.032	0.037	0.071
4428		0.006	0.010	0.012	0.074
4433		0.012	0.018	0.021	0.065
4481		0.096	0.122	0.125	0.368

Используя параметры штарковского уширения, рассчитанные Гримом [9, 10], мы определили S_e для температуры, характерной для глубин формирования линий He I. Для модели $T_e = 22\ 500^\circ$, $\lg g = 3.4$ линии He I.

формируются на глубине $\tau \sim 0.3 \div 0.4$, чему соответствует $T_e = 18\,000^\circ$. Оказалось, что найденные таким образом C_i примерно на 1.0—1.5 порядка больше, чем те, которые вычисляются для линий He I в программе WIDTH 6. Так как линии He I при $T_e = 22\,500^\circ$ довольно сильные, то они оказываются очень чувствительны к таким различиям в C_i . Вводя C_i , посчитанные по штарковским ширинам, данным Гримом, в программу WIDTH 6, мы пересчитали линии He I. В результате получилось гораздо лучшее согласие с эквивалентными ширинами, полученными по программе KONTUR. В табл. 3 приведены результаты этих расчетов вместе с соответствующими значениями $\lg C_i$. Таким образом, для корректных расчетов сильных линий по программам WIDTH 5 и WIDTH 6 необходимо задавать соответствующие константы уширения за счет квадратичного эффекта Штарка.

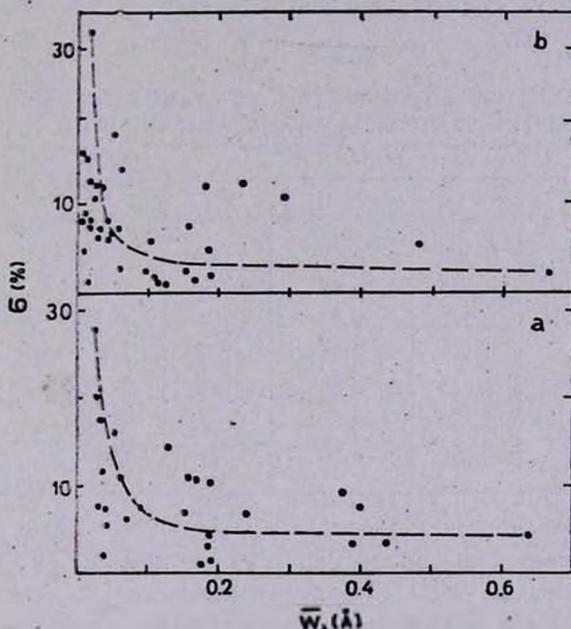


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичной ошибки от средней эквивалентной ширины линии, а — по результатам измерений трех спектрограмм, б — по результатам расчетов по программам WIDTH 6 и KONTUR.

На рис. 2 показана зависимость среднеквадратичной ошибки,
$$\sigma = \bar{W}^{-1} \sqrt{\frac{\Sigma(W_i - \bar{W})^2}{n(n-1)}}$$
 от средней эквивалентной ширины, \bar{W} , посчитанной по результатам измерений трех спектрограмм с дисперсией 8 А/мм, полученных на ОЗСП БТА САО АН СССР и по расчетам для двух программ,

WIDTH 6 и KONTUR. Для сильных линий при расчетах по программе WIDTH 6 использовались пересчитанные нами значения C_4 . Зависимость теоретической ошибки от эквивалентной ширины имеет тот же характер, что и для ошибки измерений и достигает 30% для слабых линий. При использовании одинаковых атомных параметров для расчетов одинаковых линий эта ошибка вызвана только приближенными методами вычислений и различиями в алгоритмах программ при одной и тех же применяемых физических предположениях. Ошибка расчетов максимальна именно для слабых линий по той же причине, что и для измерений: если уровень континуума и профиль линии проводятся или рассчитываются с некоторой неопределенностью, то относительная ошибка будет тем больше, чем слабее линия. Таким образом, современный уровень метода моделей атмосфер накладывает ограничения на точность определения химического состава по слабым линиям в пределах точности спектрального материала с умеренной дисперсией (8—10 Å/мм), что соответствует ~ 0.3 dex в содержании элемента.

Таблица 3

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ (W_λ , Å) ЛИНИЙ № I ДЛЯ МОДЕЛИ
С $T_e = 22\,500^\circ$ ПРИ РАЗНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ C_4

Линия	WIDTH 6				KONTUR	W_λ , набл.	
	$-\lg C_4^{SBS}$	W_λ	$-\lg C_4^G$	W_λ	W_λ	V 390 Cyg	α Pux
3965	4.99	0.186	3.60	0.251	0.328	0.23	
4026	4.51	0.285	3.14	0.752	0.896	0.70	1.075
4121	4.64	0.150	3.67	0.174	0.175	0.38	
4388	4.51	0.199	2.95	0.458	0.512	0.58	0.640
4433	4.57	0.088	3.50	0.098	0.110	0.19	0.105
4471	4.99	0.300	3.64	0.652	0.681	1.07	1.130
4713	5.16	0.179	4.07	0.199	0.181	0.35	0.335

Расчитанные профили некоторых линий показаны на рис. 3. Видно, что профили некоторых линий по программам WIDTH 6 и KONTUR близки, по программе WIDTH 5 линии мельче и уже, сильные линии по программе KONTUR имеют хорошо выраженные штарковские крылья, отсутствующие при расчетах по программам WIDTH 5 и WIDTH 6. Заметим, что даже при использовании новых значений C_4 , линии He I, посчитанные по программе WIDTH 6, в большинстве случаев оказались слабее и уже, чем по программе KONTUR, что вызвано, по-видимому, тем, что в WIDTH 6 не учитывается зависимость штарковского уширения от температуры.

5. Сравнение с расчетами других авторов. Для сравнения наших расчетов с результатами других авторов первоначально были посчитаны три

модели со стандартным химическим составом, $v_t = 0$, в приближении не-ЛТР: $T_e = 15\,000^\circ$, $\lg g = 4.0$; $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 3.0$; $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 4.0$. По этим моделям по программам WIDTH 6 и KONTUR были рассчитаны профили и эквивалентные ширины ряда линий He I, Si II, Si III и K Ca II. Результаты приведены в 4 столбце табл. 4—6. При рас-

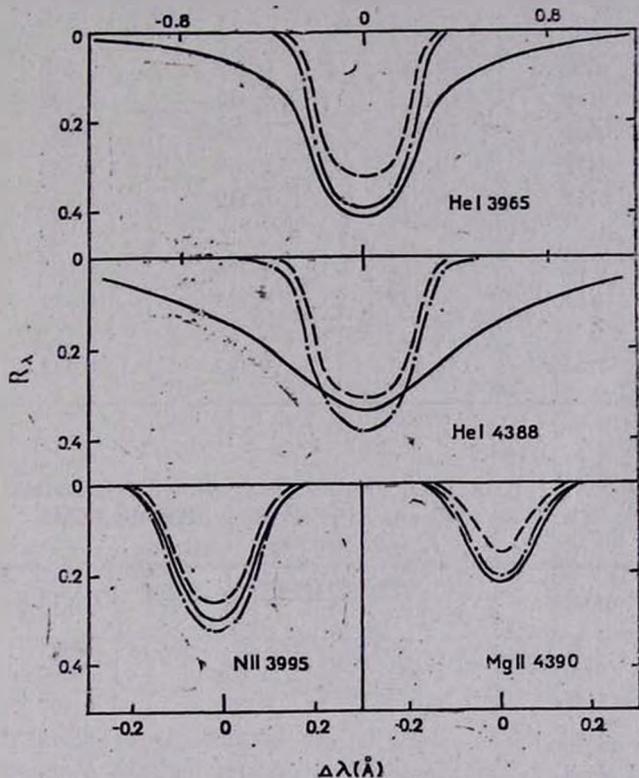


Рис. 3. Сравнение профилей линий, рассчитанных по разным программам: KONTUR—сплошная линия, WIDTH 6—штрих-пунктирная линия, WIDTH 5—штриховая линия.

четах по программе WIDTH 6 линий He I использовались значения C_i , определенные по данным Грима. Во 2 и 3 столбцах приведены результаты не-ЛТР и ЛТР расчетов Ауэра, Михаласа [1] для линий He I, Михаласа [2] для K Ca II и Кэмпса [3] для Si II и Si III. Видно, что по нашим расчетам все линии для моделей с $T_e = 22\,500^\circ$ получились гораздо слабее, чем соответствующие ЛТР-линии других авторов, причем различие гораздо больше, чем различие ЛТР и не-ЛТР расчетов в работах [1—3]. Для модели с $T_e = 15\,000^\circ$, $\lg g = 4.0$ согласие наших расчетов с расчетами других авторов хорошее.

Таблица 4

СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ
ШИРИН, W_λ (A) НЕКОТОРЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИ
 $T_e = 15\,000^\circ$, $\lg g = 4.0$

Линия	[1-3]		WIDTH 6
	NLTE	LTE	
He I			
4026	0.848	0.829	0.812
4121	0.115	0.112	0.108
4438	0.040	0.038	0.052
4471	0.693	0.659	0.618
4713	0.110	0.112	0.130
Si II			
4128	0.117	0.104	0.093
4130	0.133	0.117	0.103
Ca II			
3933	0.110	0.122	0.112

Таблица 5

СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ
ШИРИН, W_λ , A, ЛИНИЙ He I ДЛЯ МОДЕЛИ
 $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 4.0$

Линия	Ауэр, Михалас [1]		KONTUR
	NLTE	LTE	
4026	1.532	1.605	1.300
4121	0.256	0.271	0.197
4388	0.957	0.914	0.718
4438	0.138	0.131	0.119
4471	1.381	1.455	0.907
4713	0.285	0.305	0.183
4921	0.908	0.827	0.475

Чтобы выяснить причины различий, мы сравнили модели, используемые нами, с моделями Михаласа [12], по которым рассчитывались линии в работах [1-3]. Сравнение, приведенное на рис. 4, показывает, что распределение температуры с глубиной в не-ЛТР моделях, посчитанных по методике Куруца, для $T_e = 22\,500^\circ$ значительно отличается от соответствующего распределения как ЛТР, так и не-ЛТР моделей Михаласа. Различие не-ЛТР моделей связано с разной методикой учета отклонений от ЛТР в моделях [7, 11] и [12].

Таблица 6

СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ
ШИРИН, W_λ , А, НЕКОТОРЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИ
 $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 3.0$

Элемент, линия	[1-3]		KONTUR		WIDTH 6 LTE модель
	NLTE	LTE	NLTE модель	LTE модель	
He I					
4026	0.756	0.819	0.579	0.665	0.573
4121	0.169	0.192	0.137	0.171	
4388	0.511	0.477	0.340	0.393	0.339
4438	0.103	0.096	0.092	0.098	0.094
4471	0.692	0.754	0.435	0.566	0.542
4713	0.206	0.244	0.150	0.333	0.205
4921	0.506	0.442	0.265	0.327	
Si II					
3856	0.066	0.049	0.035	0.047	
4128	0.056	0.050	0.037	0.049	0.041
4130	0.065	0.057	0.041	0.053	0.048
Si III					
4553	0.135	0.090	0.070	0.075	
4569	0.116	0.080	0.063	0.068	
4576	0.079	0.058	0.049	0.052	
Ca II					
3933	0.070	0.056	0.040	0.050	0.052

6. Влияние модели атмосферы на теоретический контур линии. При вычислении не-ЛТР моделей в работе [12] уравнения переноса решались одновременно с уравнениями стационарности, при этом учитывались не только переходы в континууме, но и в линиях. Учитывались пять уровней атома водорода, три уровня атома гелия и один уровень некоторого «среднего» легкого элемента. При расчетах не-ЛТР моделей [7, 11] используется итерационная процедура, в которой после вычисления поля излучения решаются уравнения статистического равновесия для шести уровней H I и одного уровня H⁻. Найденные неравновесные населенности уровней затем используются на следующем шаге для вычисления поля излучения и так далее. При этом переходы в линиях не учитываются.

Более грубый учет отклонений от ЛТР в моделях [7, 11] приводит к тому, что в верхних слоях атмосферы здесь не получается инверсии температуры с глубиной, которая явно выражена в моделях [12]. Кроме того, необходимо заметить, что модели [12] рассчитывались до глубины 8—563

$\lg M = -6.5$ в 70 точках по глубине, в то время как модели [7, 11] рассчитываются только в 40 точках до глубины $\lg M = -4.0$. Для моделей с параметрами $T_e = 15\,000^\circ$, $\lg g = 4.0$ распределения температуры с глубиной в ЛТР и не-ЛТР моделях [12] и в не-ЛТР моделях [7, 11] близки на глубинах $\lg M \geq -3.0$ (рис. 4). В более высоких слоях отклонения от ЛТР становятся существенными, и ЛТР и не-ЛТР модели Михаласа дают различный ход температуры с глубиной. Но поскольку на формирование линий (кроме линий водорода) самые верхние слои оказывают малое влияние, то хорошее согласие моделей на глубинах $\lg M \geq -3.0$ дало возможность получить совпадение эквивалентных ширин линий (табл. 4).

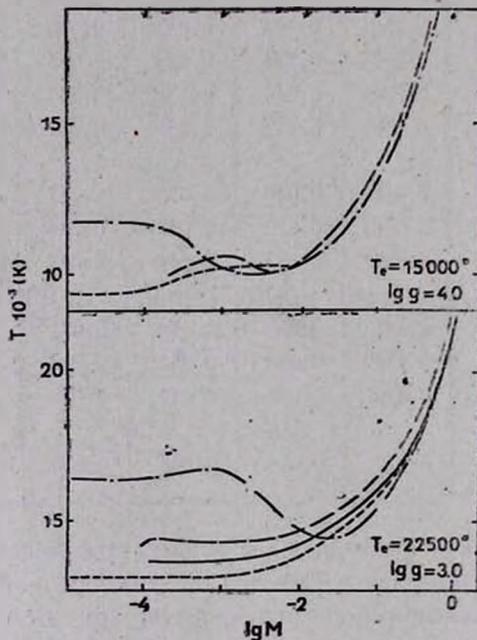


Рис. 4. Распределение температуры с глубиной для моделей $T_e = 15\,000^\circ$, $\lg g = 4.0$ и $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 3.0$. Сплошная линия — ЛТР модель, рассчитанная по программе SAM 1, штриховая линия — не-ЛТР модель, рассчитанная по SAM 1, пунктирная линия — ЛТР модель [12], штрих-пунктирная линия — не-ЛТР модель [12].

Чтобы устранить различия в линиях для горячих моделей, мы посчитали по программе SAM 1 две ЛТР модели с $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 3.0$ и $\lg g = 4.0$. Зависимость $T(M)$ для модели $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 3.0$ показана на рис. 4. Видно, что ЛТР модели холоднее в верхних слоях, чем не-ЛТР модели, посчитанные по программе SAM 1, однако они горячее, чем ЛТР модели Михаласа. При этом модели, рассчитываемые по программам SAM 1 или ATLAS 6, сходятся медленно и при проведении боль-

шого количества итераций постепенно приближаются к соответствующим моделям Михаласа, но при достижении ошибки потока $\Delta H < 0.5\%$ на всех глубинах ошибка стабилизируется и лучшей сходимости получить не удастся. Одной из причин медленной сходимости моделей Куруца и их отличия от ЛТР моделей Михаласа является то, что при большом вкладе рассеяния в коэффициент непрозрачности, имеющем место в нашем случае, итеративные методы решения уравнения переноса и температурной коррекции, используемые при вычислении моделей [7, 11], оказываются малоэффективными [13].

Для ЛТР модели $T_e = 22500^\circ$ $\lg g = 3.0$ по программе KONTUR были заново посчитаны линии поглощения некоторых элементов. Результаты приведены на рис. 5 и в пятом столбце табл. 6. Несмотря на остав-

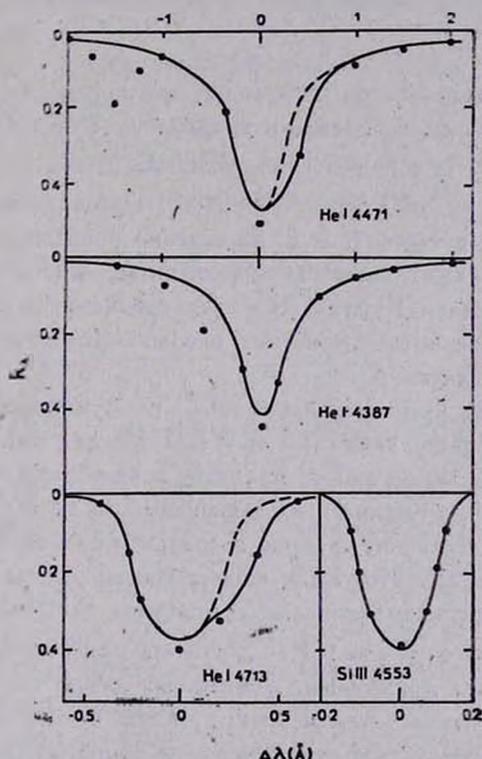


Рис. 5. Сравнение профилей линий, рассчитанных по программе KONTUR; сплошная линия, с расчетами [1] и [3], точки. Пунктирной линией показаны профили триплетных линий, рассчитанных как синглеты.

шееся небольшое различие в моделях, эти результаты хорошо согласуются с ЛТР расчетами Ауэра, Михаласа и Кэмпса [1—3]. Заметное отличие в эквивалентных ширинах и профилях имеется только для линий He I диффуз-

ной серии $\lambda\lambda$ 4026, 4388, 4471, 4921 А, для которых в расчетах Ауэра, Михаласа [1] учитывались затрещенные компоненты, а в наших расчетах — нет. Для изолированных линий He I $\lambda\lambda$ 4121, 4438, 4713 А согласие почти полное. Все линии He I рассчитывались с учетом асимметрии из-за штарковских сдвигов, а триплеты $\lambda\lambda$ 4026, 4121, 4471, 4713 А, кроме того, с учетом тонкой структуры. При этом триплеты получились сильнее, чем в тех случаях, когда они считались как синглеты, с использованием средне-взвешенных сил осцилляторов (пунктирная линия на рис. 5). Заметим, что программа WIDTH 6 не позволяет учитывать асимметрию и тонкую структуру линий, и это еще одна причина того, что линии He I, посчитанные по программе WIDTH 6, оказываются слабее, чем по программе KONTUR. Результаты расчетов некоторых линий по программе WIDTH 6 для ЛТР модели $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 3.0$, приведены в 6-ом столбце табл. 6.

7. *Сравнение результатов расчетов с наблюдениями.* Результаты расчетов сравнивались с наблюдаемыми эквивалентными ширинами для звезд TXLeo, $T_e = 8850^\circ$, $\lg g = 4.0$ [14], V 380 Cyg, $T_e = 22\,500^\circ$, $\lg g = 3.4$ [15] и α Pux, $T_e = 22\,000^\circ$, $\lg g = 3.65$ [4]. Наблюдаемые эквивалентные ширины приведены в табл. 1, 2, 3. Сравнение показывает, что наилучшее согласие с наблюдениями дают расчеты по программе KONTUR с использованием ЛТР моделей Куруда. В случае расчетов с не-ЛТР моделями теоретические эквивалентные ширины оказываются меньше наблюдаемых практически для всех линий.

По результатам, приведенным в табл. 1—3, можно заключить, что использование программ WIDTH 5 и WIDTH 6 для расчетов эквивалентных ширин сильных линий может привести к ошибочному определению содержаний элементов, а именно к их завышению. В то же время, по слабым линиям получается большой разброс в содержаниях элементов, определенных по разным линиям. Этот факт отмечается во многих работах (см., например, [5], где при использовании программы WIDTH 5 разброс содержания Fe для линий с $W_\lambda < 0.1$ А достигает одного порядка) и обусловлен в основном тремя причинами: для слабых линий имеются большие неопределенности в атомных параметрах, для них велика ошибка измерений и, как показано выше, также велика ошибка теоретических расчетов.

Поэтому для определения содержания элементов нам представляется наиболее правильным использовать наблюдаемые эквивалентные ширины средних и сильных линий, сравнивая их с корректно проведенными расчетами.

8. *Выводы.* Результаты сравнения расчетов эквивалентных ширин линий по программам WIDTH 6 и KONTUR свидетельствуют о том, что су-

шествующие методы расчетов дают случайный разброс значений W_λ для слабых линий в пределах 20—30%.

Для сильных линий более корректным является использование программы KONTUR, которая дает возможность учесть зависимость штарковского уширения от температуры и включить в расчеты тонкую структуру линий.

Расчеты по программе WIDTH 5 во всех случаях приводят к получению завышенных содержаний элементов, что связано с некорректным учетом механизмов уширения линий.

Использование ЛТР моделей [7, 11] для ЛТР расчетов линий дает результаты, которые хорошо согласуются с результатами других авторов [1—3], причем до $T_e \sim 25\,000$ К эквивалентные ширины линий, рассчитанных в приближении ЛТР, не сильно отличаются от эквивалентных ширин, рассчитанных с учетом отклонений от ЛТР. В то же время использование моделей атмосфер, рассчитанных с учетом отклонений от ЛТР по методике Куруца, для ЛТР расчетов линий приводит к значительному ослаблению всех линий. Таким образом, результаты ЛТР расчетов линий позволяют корректно определять содержание элементов, по крайней мере в звездах с T_e до 25 000 К.

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Соколову и В. В. Цымбалу за полезные дискуссии.

Ростовский-на-Дону государственный
университет

ON THE ACCURACY OF DETERMINATION OF STELLAR ABUNDANCE USING THE MODEL ATMOSPHERES

V. V. LEUSHIN, G. P. TOPILSKAYA

Different programs for computing the profiles and the equivalent widths of the stellar absorption lines are compared. If a high accuracy for the medium and strong lines is needed, the quadratic Stark effect should be taken into account. The atmospheric model dependence of the computed equivalent widths is investigated. The overall accuracy of stellar abundance derived by using the model atmospheres is estimated.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. H. Auer, D. Mihalas, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 25, 433, 1973.
2. D. Mihalas, *Astrophys. J.*, 179, 209, 1973.
3. L. W. Kamp, NASA TR R-455, 1976.

4. *J. Norris*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **23**, 193, 1971.
5. *S. Adelman*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **208**, 637, 1984.
6. *А. И. Снежко*, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР*, **3**, 3, 1971.
7. *R. L. Kurucz*, *SAO Spec. Rept.*, **309**, 1979.
8. *S. Sahal-Brechot, B. Serge*, *Astron. and Astrophys.*, **13**, 161, 1971.
9. *Г. Грим*, *Спектроскопия плазмы*, Мир, М., 1969.
10. *Г. Грим*, *Уширение спектральных линий в плазме*, Мир, М., 1978.
11. *S. Wright, J. Argyros*, *Comm. Univ. London Observ.*, **76**, 1975.
12. *D. Mihalas*, *NCAR-TN/STR-76*, 1972.
13. *Д. Михалас*, *Звездные атмосферы*, т. 1, Мир, М., 1982.
14. *М. А. Евтихиева, В. В. Леушин*, *Химический состав атмосферы яркого компонента TX Leo*, Деп. № 2083—81, ВИНТИ, М., 1981.
15. *В. В. Леушин, Г. П. Топильская*, *Астрофизика*, 1986 (в печати).