

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ СПЕКТРАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

2. АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ

И. М. Копылов, В. В. Леушин, Г. П. Тимольская*,
В. В. Цымбал**, Ю. А. Гвоздь**

Анализируются наблюдаемые эквивалентные ширины W_λ линий и наборы критериев количественной спектральной классификации звезд для трех спектральных интервалов (O8—B1, B1—B3, B3—A0) и соответствующих эффективных температур (32 000—25 000, 25 000—17 000, 17 000—10 000 К). Приводятся результаты расчетов эквивалентных ширины линий, входящих в критерии спектральной классификации для указанных температурных интервалов. Приводится также анализ ошибок определения эффективной температуры по этим критериям при неопределенности в выборе параметров моделей атмосфер ($\lg g, v_t$, химического состава).

The observed equivalent widths W_λ and the quantitative spectral classification criteria for stars of three spectral ranges (O8—B1, B1—B3, B3—A0) and corresponding effective temperatures (32 000—25 000 K, 25 000—17 000 K, 17 000—10 000 K) are analysed. The results of calculations of the equivalent widths and of spectral classification criteria for these temperature intervals are presented. The errors of effective temperature determination according to these criteria when the reliable parameters of the atmosphere models ($\lg g, v_t$, chemical composition) are difficult to choose are analysed.

1. Системы эквивалентных ширины и спектральных критериев

Для достаточно подробного и корректного исследования спектральных критериев, приведенных в работе [1], необходимы обширные ряды спектральных наблюдений. Такой материал был, в частности, в конце 50-х годов получен Копыловым в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР на щелевом однопризменном спектрографе 1.22-м рефлектора с дисперсией 75 Å/мм у H_γ . Позднее эта работа была продолжена в Специальной астрофизической обсерватории на ОЗСП БТА; и список W_λ , использовавшихся Копыловым [2, 3] для построения критериев, дополнен эквивалентными ширинами линий, полученными по спектрограммам с дисперсией 9 Å/мм. Методика получения и обработки спектрограмм описана в работе [4]. Малость дисперсии основного материала (75 Å/мм) компенсируется взвешенным выбором критериев классификации, в качестве которых используются отношения эквивалентных ширины линий или групп линий. Для расширения эмпирического материала и выявления каких-либо систематических или случайных расхождений в используемых W_λ и критериях были привлечены сводки эквивалентных ширины Конти и др. [5, 6], Диделона [7], Боярчука [8] и Кейна и др. [9]. Сопоставление изменений W_λ различных линий со спектральным классом по измерениям разных авторов позволяет составить представление о влиянии дисперсии на наши результаты и четко локализовать места появления и исчезновения линий (т. е. границы применимости соответствующих критериев), а также максимальные значения их величин и соответствующие спектральные классы.

* Ростовский-на-Дону государственный университет.

** Симферопольский государственный университет.

Количественный спектральный класс по нескольким критериям определяется с точностью до 0.2—0.3 спектрального подкласса [2], однако это внутренняя точность, а так как здесь мы используем материал разных исследователей, то необходимо сравнить соответствующие шкалы спектральных классов. Количественные спектральные классы Копылова [2, 3] определялись в системе МК, являющейся общепринятой, то же можно сказать и о системах других авторов. Рис. 1 дает в качестве примера сопоставление Sp Копылова [2] с Sp из работы Диделона [7], построенное по общим звездам. Видно, что системы здесь хорошо совпадают, систематических ошибок нет, имеется только случай-

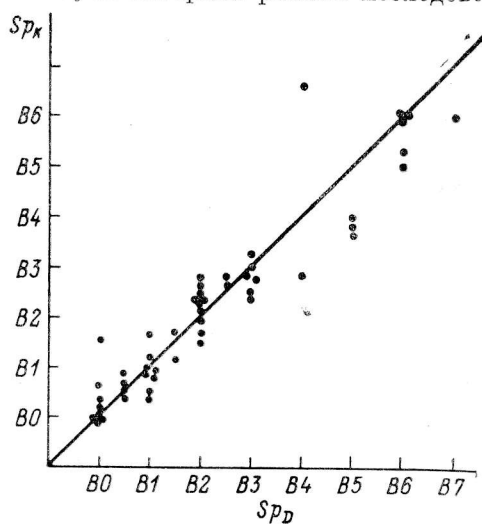


Рис. 1. Сравнение спектральной классификации (Sp_D) по работе Диделона [7] и (Sp_K) по работе Копылова [2], построенное по общим звездам.

ный разброс, и, таким образом, можно считать, что реальная ошибка определения Sp по набору критериев равна или меньше 0.5 спектрального подкласса.

Основываясь на хорошем совпадении разных систем Sp , по результатам Конти и др. [5, 6], Кейна и др. [9] и Диделона [7], мы посчитали значения

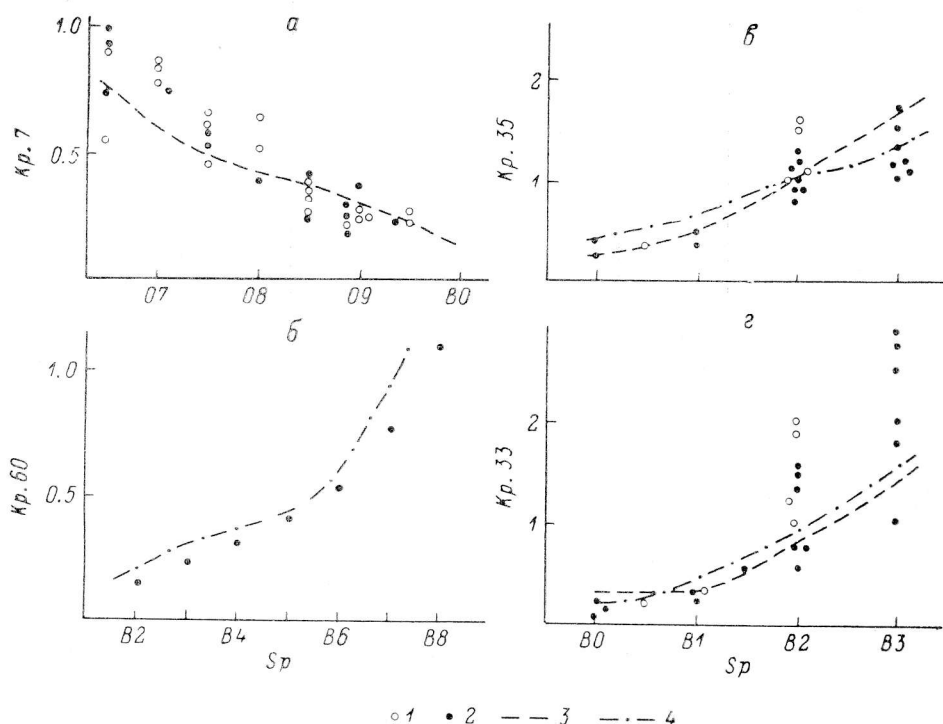


Рис. 2. Сравнение зависимостей нескольких критериев от спектрального класса по работам разных авторов с данными Копылова и др. [1].

а — по работе Конти [5, 6]; б — Диделона [7]; в и г — Кейна и др. [9]; 1, 3 — класс светимости III; 2, 4 — V.

критериев, отобранных в [1]. На рис. 2, а—в показано сопоставление хода этих критериев со спектральным классом (нумерацию критериев см. в [1]). Видно, что характер зависимости критериев от спектрального класса по раз-

ным источникам практически одинаков. Величина критерия № 7 по данным Конти [5, 6] и Копылова [2] совпадает с точностью до 10 %. Критерий № 60 по результатам Диделона [7] и Копылова [3] согласуется с точностью до 10 % для звезд III—V классов светимости (с точностью до 25 % для сверхгигантов).

В работе Кейна и др. [9] приведены эквивалентные ширины изолированных линий, не позволяющие полностью построить интересующие нас критерии. Для того чтобы использовать эти наблюдения, мы с помощью наших расчетов оценили добавки в эквивалентные ширины линий, которые вносят бленды, и построили два критерия — № 35 и № 33а [4]. Результаты сравнения (рис. 2, в, г) показывают, что величины критериев по работам Кейна и др. [9] и Копылова и др. [4] согласуются в среднем с точностью 10—30 %.

Системы критериев для определения спектрального класса обуславливаются, как правило, тем наблюдательным материалом, которым располагает автор, поэтому понятно, что они не всегда совпадают. Кажется, однако, что предлагаемая здесь система критериев достаточно универсальна и может быть сконструирована на основе многих наблюдательных рядов. В то же время критерии, предложенные, например, Боярчуком [8], не всегда могут быть использованы из-за требования большей дисперсии и ограниченности применения (узость спектрального интервала).

ТАБЛИЦА 1
Критерии для γ Peg, подсчитанные по разным источникам

Номер критерия	Дисперсия, $\text{\AA}/\text{мм}$, и источник						σ , %	
	7.5 [11]	4.6 [41]	3.4 [41]	2.9 [41]	3 [10]	7.5 [2]		5—10 [9]
41a	1.62	2.15	2.24	2.22	1.53	1.93	7	
41b	1.62	1.46	1.52	1.41	1.50	1.24	3.5	
57		0.55	0.48	0.54	0.42	0.46	5	
60	0.13	0.14	0.13	0.13		0.19	8	
D2	6.15	6.06	7.28	5.88		4.54	7	
D4	2.48	2.44	2.85	2.35	2.58	2.77	3	
33					2.90	1.44	33	
38					1.27	0.67	31	
33a					1.63	0.92	1.92	24
53					0.31	0.65		35
35					1.02		1.46	18

В табл. 1 для звезды γ Peg (B2.5 IV) представлены величины критериев, посчитанные по результатам работ [2, 9—41] с разной дисперсией. Ошибка в величине критерия зависит от интенсивности линий, входящих в критерий, и изменяется от 3 до 35 %. Здесь результат каждой работы формально считается равнозначным, хотя в действительности данные, полученные по высокодисперсионным спектрам, должны, в принципе, обладать большей точностью.

Таким образом, здесь еще раз подтверждается заключение о том, что при использовании в качестве критериев спектральной классификации отношений эквивалентных ширин линий [4] в значительной мере уменьшается влияние систематических ошибок W_λ , обусловленных различием дисперсий и индивидуальным подходом к измерениям. Случайная же ошибка, если и возрастает, то незначительно, оставаясь в пределах ошибки единичных измерений спектральных линий.

2. Расчет теоретических критериев

Для вычисления W_λ линий, входящих в критерии, была использована сетка бланкетированных моделей атмосфер Куруца [12] в интервале эффективных температур T_e от 10 000 до 35 000 K и $\lg g$ от 3.0 до 4.0. Наряду с этим была посчитана сетка небланкетированных моделей атмосфер в ЛТР-приближении по программе SAM 1 [13]. Учитывались следующие источники непрозрачности: поглощение H⁻, H I, He⁻, He I, He II, Mg II, Si II, C I—IV, N I—V, O I—VI,

Al, CaII, FeI—VI, а также рассеяние на свободных электронах и атомах H и He. Бланкетирование линиями не учитывалось. При вычислении моделей особое внимание уделялось их сходимости, в результате чего для всех моделей достигнута ошибка потока меньше 0.3 % на всех глубинах. Модели рассчитаны для T_e от 10 000 до 32 000 K и $\lg g=3.0, 3.5, 4.0$.

Профили и эквивалентные ширины линий поглощения рассчитывались в приближении ЛТР по программе KONTUR [14]. Использовалась система сил осцилляторов из работы [15]. Для тех линий, параметры которых отсутствовали в этой работе, значения fg брались из других источников и редуцировались в шкалу [15]. Для линий SiII и SiIII использовались данные из [16].

ТАБЛИЦА 2
Список рассчитанных линий

Линия	Компоненты бленды	fg	ϵ , эВ	Интервал T_e , K
HeII 4199	HeII 4199.83 NIII 4200.02	0.26	51.01	25000—32500
HeII 4541.59	Изолированная	0.60	51.01	25000—32500
HeI 3820	HeI 3819.64 HeI 3819.76	0.19 0.02	20.96 20.96	10000—17000
HeI 4121	OII 4119.20 OII 4120.28 OII 4120.55 HeI 4120.82 OII 4121.48	3.00 0.66 0.07 0.03 0.48	25.85 25.85 25.85 20.96 25.83	10000—25000
HeI 4387.93	Изолированная	0.13	21.22	10000—32500
HeI 4471	HeI 4471.48 HeI 4471.68	0.92 0.22	20.96 20.96	10000—32500
HeI 4713	HeI 4713.15 HeI 4713.38	0.08 0.01	20.96 20.96	10000—25000
СII 3920	СII 3918.28 NII 3919.00 OII 3919.29 СII 3920.68	0.26 0.69 0.64 0.52	16.33 20.41 25.66 16.33	10000—27500
СII 4267	СII 4267.02 СII 4267.20 СII 4267.26	3.76 0.27 5.34	18.05 18.05 18.05	10000—32500
СIII 4647.40	Изолированная	1.26	29.53	25000—32500
NII 3995.00	»	1.35	18.50	17000—27500
NII 4630.54	»	1.35	18.47	17000—32500
NIII 4097	OII 4097.26 OII 4097.26 NIII 4097.30	6.00 0.64 0.97	28.69 25.83 27.32	25000—32500
OII 4317	OII 4317.14 СII 4317.40 СII 4318.60 OII 4319.63 OII 4319.93	0.48 0.69 0.28 0.48 0.34	22.96 23.00 23.11 22.98 28.82	17000—27500
OII 4415	OII 4414.91 OII 4416.97	2.00 1.10	23.44 23.42	17000—27500
OII 4641	NIII 4640.60 OII 4641.81 NIII 4641.90 NII 4642.02	2.70 1.52 0.17 2.04	23.00 22.98 30.32 23.42	17000—27500
OII 4661.76	Изолированная	0.68	22.98	25000—32500
OII 4676.23	»	0.50	23.00	25000—32500
OIII 3961.59	»	2.29	38.01	25000—32500
MgII 4481	MgII 4481.13 MgII 4481.33	5.89 3.72	8.86 8.86	10000—27500
SiII 3856.09	Изолированная	0.22	6.83	10000—17000
SiII 4128.05	»	2.04	9.80	10000—17000
SiII 4128.30	SiII 4128.05 SiII 4128.30	2.04 2.88	9.80 9.80	10000—17000
SiIII 4552	NII 4552.53 SiIII 4552.65	2.10	23.47 18.92	25000—32500
SiIII 4567.57	Изолированная		18.92	25000—32500
SiIII 4574.78	»		18.92	25000—32500
FeII 4583.85	»	10.00	2.80	10000—17000

ТАБЛИЦА
Эквивалентные ширины

Турбулентная скорость 2.5 км/с													
Элемент, длина, волны Å	[E/H]	lg g = 3.0				lg g = 3.5				lg g = 4.0			
		10 000	12 000	15 000	17 000	10 000	12 000	15 000	17 000	10 000	12 000	15 000	17 000
HeI 3820.	-0.3	96.	270.	552.	623.	78.	249.	646.	727.	56.	231.	717.	879.
	0.0	141.	395.	768.	858.	122.	370.	919.	1121.	96.	353.	1048.	1260.
	0.3	207.	552.	1075.	1178.	189.	570.	1308.	1431.	160.	526.	1481.	1778.
	0.6	310.	771.	1512.	1664.	293.	880.	1835.	2050.	261.	785.	2163.	2538.
HeI 4388.	-0.3	22.	103.	268.	336.	13.	91.	294.	435.	2.	72.	305.	506.
	0.0	37.	147.	378.	463.	25.	145.	433.	618.	11.	124.	459.	735.
	0.3	59.	214.	528.	643.	47.	217.	615.	869.	28.	198.	673.	1058.
	0.6	93.	312.	739.	891.	78.	326.	873.	1235.	58.	307.	976.	1495.
HeI 4471.	-0.3	70.	203.	456.	550.	57.	204.	498.	699.	47.	190.	534.	806.
	0.0	97.	274.	617.	731.	82.	277.	681.	948.	70.	268.	738.	1131.
	0.3	133.	370.	821.	975.	117.	383.	929.	1315.	106.	381.	1038.	1560.
	0.6	184.	503.	1113.	1345.	172.	531.	1289.	1810.	160.	528.	1423.	2180.
HeI 4713.	-0.3	15.	55.	149.	204.	9.	42.	131.	195.	5.	32.	112.	181.
	0.0	22.	74.	187.	248.	15.	59.	170.	244.	9.	46.	153.	237.
	0.3	32.	97.	232.	300.	22.	80.	219.	307.	15.	65.	207.	309.
	0.6	44.	125.	289.	362.	32.	108.	280.	385.	24.	92.	270.	401.
HeI 4121.	-0.3	16.	54.	141.	203.	11.	50.	125.	192.	8.	34.	112.	179.
	0.0	25.	75.	179.	245.	18.	70.	166.	242.	13.	51.	156.	237.
	0.3	36.	101.	225.	294.	27.	90.	219.	304.	20.	76.	214.	313.
	0.6	51.	134.	283.	355.	40.	130.	289.	385.	31.	108.	292.	416.
SiII 4128.30	-1.0	109.	135.	113.	82.	94.	125.	118.	93.	80.	111.	117.	97.
	0.0	225.	249.	220.	192.	220.	251.	230.	200.	216.	250.	245.	210.
	1.0	437.	456.	378.	317.	458.	497.	441.	363.	491.	539.	498.	400.
SiII 4128.05	-1.0	54.	69.	57.	41.	46.	62.	59.	45.	38.	55.	58.	48.
	0.0	113.	125.	110.	93.	107.	122.	115.	99.	103.	119.	119.	105.
	1.0	205.	211.	174.	147.	213.	226.	199.	166.	225.	244.	227.	192.
SiII 3856.	-1.0	90.	94.	71.	47.	81.	88.	73.	53.	72.	79.	73.	55.
	0.0	148.	147.	122.	100.	143.	143.	126.	106.	138.	138.	128.	109.
	1.0	237.	229.	179.	148.	239.	234.	196.	159.	246.	241.	206.	171.
CII 3920.	-1.0	6.	20.	64.	247.	3.	13.	47.	82.	1.	8.	35.	61.
	0.0	23.	68.	153.	455.	17.	53.	127.	185.	11.	38.	102.	157.
	1.0	69.	156.	282.	760.	61.	134.	260.	337.	47.	112.	236.	321.
CII 4267.	-1.0	7.	28.	81.	124.	3.	19.	63.	103.	1.	13.	47.	83.
	0.0	30.	78.	167.	223.	21.	62.	148.	208.	15.	48.	126.	188.
	1.0	79.	164.	307.	375.	63.	144.	292.	386.	49.	125.	273.	383.
FeII 4583.	-1.0	66.	46.	10.	3.	58.	44.	12.	3.	51.	37.	12.	4.
	0.0	121.	101.	50.	22.	115.	101.	54.	27.	109.	95.	56.	30.
	1.0	181.	156.	99.	68.	175.	151.	104.	76.	164.	150.	108.	80.
MgII 4481.	-1.0	220.	197.	134.	100.	215.	198.	142.	110.	210.	197.	147.	117.
	0.0	342.	302.	231.	196.	352.	314.	243.	209.	372.	328.	259.	220.
	1.0	541.	521.	359.	298.	704.	582.	407.	336.	804.	662.	473.	384.

Профиль линии описывался функцией Фойгта, при этом учитывались три механизма уширения: естественное, доплеровское и штарковское. Для большинства линий параметры штарковского уширения брались из работ [17—20]. В случае отсутствия данных для нужных нам линий штарковская ширина вычислялась по приближенной формуле [20]

Турбулентная скорость 10 км/с											
lg g = 3.0				lg g = 3.5				lg g = 4.0			
10 000	12 000	15 000	17 000	10 000	12 000	15 000	17 000	10 000	12 000	15 000	17 000
100.	280.	577.	656.	80.	254.	661.	752.	55.	231.	725.	895.
146.	408.	795.	892.	124.	377.	941.	1049.	95.	354.	1059.	1060.
214.	568.	1105.	1229.	192.	538.	1331.	1461.	160.	529.	1497.	1802.
319.	802.	1546.	1700.	297.	765.	1861.	2110.	261.	789.	2174.	566.
24.	109.	289.	370.	14.	92.	305.	453.	2.	71.	309.	517.
39.	155.	403.	502.	26.	148.	448.	640.	11.	124.	465.	748.
62.	227.	567.	683.	48.	223.	633.	893.	28.	198.	682.	1077.
97.	333.	773.	933.	78.	332.	896.	1261.	52.	308.	989.	1512.
79.	231.	506.	610.	64.	220.	535.	744.	49.	200.	561.	846.
109.	305.	669.	793.	91.	299.	722.	994.	74.	281.	769.	1165.
149.	405.	876.	1037.	129.	408.	978.	1361.	112.	397.	1074.	1589.
204.	541.	1183.	1407.	185.	559.	1337.	1856.	167.	547.	1452.	2207.
16.	66.	183.	252.	10.	50.	156.	233.	6.	36.	132.	212.
26.	90.	229.	306.	17.	70.	202.	293.	11.	53.	176.	278.
37.	119.	282.	368.	26.	96.	259.	361.	17.	76.	236.	353.
53.	153.	347.	437.	39.	127.	326.	445.	27.	104.	305.	450.
18.	62.	166.	244.	12.	49.	143.	226.	8.	36.	123.	201.
28.	86.	211.	295.	20.	70.	190.	283.	13.	55.	171.	265.
41.	116.	263.	352.	30.	99.	248.	352.	21.	82.	233.	348.
58.	154.	327.	418.	44.	135.	322.	438.	33.	117.	315.	454.
208.	269.	203.	129.	168.	237.	214.	150.	131.	200.	209.	160.
509.	584.	504.	404.	461.	549.	519.	434.	415.	507.	519.	450.
866.	901.	780.	667.	849.	899.	821.	713.	839.	894.	856.	753.
95.	124.	92.	57.	75.	108.	96.	67.	58.	90.	94.	71.
242.	281.	242.	192.	217.	262.	248.	207.	193.	239.	247.	213.
413.	433.	377.	323.	400.	426.	393.	341.	392.	421.	406.	358.
182.	195.	125.	67.	155.	174.	132.	80.	129.	150.	129.	86.
353.	352.	280.	213.	330.	334.	288.	229.	309.	312.	286.	237.
507.	493.	410.	341.	493.	482.	421.	538.	483.	469.	428.	368.
45.	57.	163.	247.	11.	16.	128.	112.	7.	9.	98.	80.
120.	160.	342.	455.	47.	75.	294.	292.	33.	53.	248.	240.
220.	345.	618.	760.	137.	217.	576.	544.	108.	175.	525.	495.
7.	33.	107.	166.	4.	22.	81.	135.	2.	14.	59.	105.
38.	106.	238.	318.	26.	83.	202.	284.	17.	62.	168.	249.
110.	230.	417.	504.	86.	196.	386.	497.	65.	165.	351.	477.
124.	74.	11.	2.	101.	63.	12.	2.	82.	50.	14.	3.
332.	261.	86.	26.	310.	242.	97.	34.	288.	217.	101.	39.
502.	429.	254.	145.	484.	414.	268.	165.	467.	401.	275.	176.
361.	314.	194.	135.	342.	315.	207.	151.	324.	305.	215.	161.
568.	506.	377.	313.	563.	511.	394.	331.	563.	513.	406.	344.
862.	741.	552.	471.	905.	782.	591.	503.	982.	838.	642.	541.

$$\Delta\lambda_{St} = \frac{10^{-8}\lambda^2}{4\pi c} \frac{[(Z+1)^2 \cdot 13.595]^{3/2}}{x_{up}} N_e,$$

где Z — заряд иона; x_{up} — потенциал ионизации с верхнего уровня. При расчетах учитывались тонкая структура и блендирование линий. Поскольку основ-

Турбулентная скорость 2.5 км/с													
элемент, длина волны, Å	[E/H]	lg g = 3.0				lg g = 3.5				lg g = 4.0			
		17 000	20 000	22 500	25 000	17 000	20 000	22 500	25 000	17 000	20 000	22 500	25 000
СII 4267.	-1.0	124.	161.	132.	82.	103.	152.	157.	125.	83.	135.	156.	141.
	0.0	223.	259.	233.	182.	208.	263.	263.	227.	188.	260.	277.	258.
	1.0	375.	403.	343.	270.	386.	460.	432.	363.	383.	506.	516.	449.
СII 3920.	-1.0	247.	149.	135.	88.	82.	135.	151.	135.	61.	112.	142.	143.
	0.0	455.	270.	249.	177.	185.	257.	272.	242.	157.	229.	263.	260.
	1.0	760.	389.	353.	283.	337.	403.	401.	359.	321.	410.	429.	401.
СIII 4647.	-1.0	3.	9.	21.	43.	2.	6.	11.	28.	2.	3.	6.	16.
	0.0	10.	25.	47.	85.	5.	17.	34.	65.	3.	11.	23.	47.
	1.0	25.	53.	86.	135.	12.	43.	71.	114.	13.	35.	60.	92.
NII 3995.	-1.0	14.	29.	27.	11.	11.	23.	30.	29.	7.	17.	26.	27.
	0.0	37.	79.	83.	59.	38.	68.	86.	81.	28.	56.	76.	85.
	1.0	86.	132.	140.	116.	82.	122.	142.	141.	69.	109.	133.	144.
NII 4631.	-1.0	10.	25.	26.	11.	6.	19.	27.	23.	3.	12.	21.	25.
	0.0	30.	73.	81.	58.	29.	60.	80.	79.	19.	46.	69.	80.
	1.0	79.	126.	139.	117.	75.	112.	137.	139.	55.	97.	125.	140.
OII 4649.	-1.0	14.	90.	180.	255.	10.	54.	130.	200.	6.	30.	85.	174.
	0.0	50.	162.	268.	354.	38.	115.	213.	290.	30.	82.	159.	265.
	1.0	128.	255.	371.	458.	80.	204.	314.	420.	72.	162.	257.	371.
OII 4415.	-1.0	13.	56.	86.	81.	5.	38.	70.	65.	4.	24.	51.	81.
	0.0	63.	131.	179.	187.	38.	102.	159.	180.	22.	77.	131.	179.
	1.0	138.	225.	281.	293.	96.	193.	262.	285.	72.	162.	233.	291.
OII 4317.	-1.0	20.	63.	76.	56.	15.	49.	73.	78.	5.	35.	60.	78.
	0.0	57.	135.	176.	167.	40.	107.	163.	211.	20.	79.	134.	180.
	1.0	110.	212.	264.	262.	67.	171.	262.	304.	37.	125.	211.	271.
OII 4641.	-1.0	30.	70.	98.	110.	13.	54.	85.	105.	7.	41.	69.	96.
	0.0	62.	118.	150.	165.	47.	99.	136.	160.	35.	83.	119.	150.
	1.0	105.	180.	223.	231.	83.	156.	205.	242.	73.	135.	179.	221.
MgII 4481.	-1.0	100.	59.	32.	40.	110.	72.	47.	28.	117.	80.	56.	37.
	0.0	196.	153.	112.	68.	209.	169.	138.	104.	220.	180.	151.	116.
	1.0	298.	237.	194.	144.	336.	268.	228.	189.	384.	302.	257.	214.

ной наблюдательный материал мы брали из [2, 3], при расчетах учитывались те бленды, которые указаны в этих работах. Линии рассчитывались для двух значений турбулентной скорости $v_t = 2.5$ и 10 км/с, для четырех содержаний гелия

$$\lg = \frac{N(\text{He})}{\Sigma N} = \lg \left(\frac{N(\text{He})}{\Sigma N} \right)_{\odot} + 0.3i, \quad i = -1, 0, 1, 2,$$

и трех содержаний остальных элементов

$$\lg \frac{N(E)}{\Sigma N} = \lg \left(\frac{N(E)}{\Sigma N} \right)_{\odot} + i, \quad i = -1, 0, 1.$$

Параметры линий для расчета контуров и W_{λ} приведены в табл. 2. В ней указаны: линии, входящие в состав бленды, для каждой из них сила осциллятора, потенциал возбуждения и интервал T_e , в котором вычислялась линия.

ТАБЛИЦА 3 (продолжение)

Турбулентная скорость 10 км/с											
lg g = 3.0				lg g = 3.5				lg g = 4.0			
17 000	20 000	22 500	25 000	17 000	20 000	22 500	25 000	17 000	20 000	22 500	25 000
166.	215.	168.	97.	135.	205.	205.	156.	105.	179.	208.	181.
318.	374.	327.	245.	284.	367.	368.	315.	249.	349.	377.	348.
504.	549.	480.	381.	497.	584.	563.	484.	477.	682.	629.	562.
247.	204.	177.	104.	112.	185.	202.	174.	80.	150.	189.	186.
455.	421.	357.	236.	292.	402.	409.	343.	240.	360.	403.	375.
760.	657.	580.	439.	544.	654.	645.	563.	495.	631.	662.	613.
6.	16.	35.	62.	5.	11.	22.	37.	2.	5.	12.	20.
23.	51.	82.	133.	13.	29.	56.	99.	7.	18.	37.	68.
61.	105.	157.	222.	31.	68.	120.	187.	21.	53.	94.	148.
20.	36.	31.	32.	12.	29.	37.	40.	7.	20.	31.	42.
100.	128.	133.	132.	57.	108.	137.	153.	41.	85.	120.	144.
205.	240.	251.	253.	114.	218.	254.	260.	116.	189.	236.	278.
20.	31.	30.	12.	5.	23.	33.	26.	2.	14.	26.	29.
60.	118.	129.	81.	36.	94.	129.	121.	22.	69.	108.	125.
112.	232.	252.	200.	83.	201.	248.	246.	80.	169.	224.	249.
15.	122.	241.	331.	10.	69.	167.	292.	4.	38.	106.	115.
130.	258.	417.	565.	60.	179.	328.	481.	20.	122.	243.	392.
383.	500.	617.	750.	140.	357.	530.	688.	160.	282.	440.	601.
20.	80.	124.	164.	5.	51.	100.	154.	4.	31.	69.	120.
108.	221.	311.	386.	80.	166.	270.	400.	22.	119.	214.	340.
217.	413.	521.	620.	250.	347.	479.	635.	195.	282.	417.	610.
46.	74.	91.	116.	23.	56.	86.	126.	14.	39.	68.	104.
120.	192.	263.	354.	74.	144.	233.	346.	36.	102.	184.	285.
215.	296.	375.	450.	135.	238.	344.	440.	75.	180.	295.	430.
62.	118.	170.	216.	21.	88.	145.	186.	12.	63.	114.	163.
124.	216.	276.	318.	86.	181.	250.	298.	43.	147.	216.	273.
233.	327.	393.	448.	184.	289.	364.	415.	152.	254.	328.	389.
135.	71.	35.	14.	151.	90.	55.	38.	161.	101.	66.	44.
313.	228.	155.	95.	331.	255.	197.	147.	344.	270.	218.	170.
471.	379.	300.	218.	503.	410.	350.	308.	541.	438.	377.	317.

Эквивалентные ширины основных рассчитанных линий с использованием моделей [12] приведены в табл. 3.

Результаты наших расчетов мы сравнили с расчетами других авторов [21—29], проведенными как в приближении ЛТР, так и с учетом отклонений от ЛТР. Полученные нами W_λ линий HeI 4121, 4388, 4713, SiII 3856, 4128, 4130, MgII 4481, CaII 3933 согласуются с результатами аналогичных расчетов в работах [21, 25—27] с точностью не хуже 5 %, причем почти на всем интересующем нас интервале температур отклонения от ЛТР незначительны и только для линий HeI 4388 и 4471 при $T_e > 27\,500$ К, lg g = 3.0 ошибка, связанная с неучетом отклонений от ЛТР, может достигать 25 %. Для линии HeI 4471 в области $25\,000$ К $\geq T_e \geq 17\,000$ К полученные значения W_λ оказались примерно на 20 % меньше, чем в работе [21], вследствие неучета нами запрещенной компоненты. Сравнение с наблюдениями линий SiIII 4552, 4567, 4574, рассчитанных в работе [27], показало, что они гораздо слабее наблюдаемых в В-звездах главной последовательности [8, 30]. Поэтому мы использовали другие

Турбулентная скорость 2.5 км/с

элемент, длина, волны, Å	[E/H]	lg g = 3.0			lg g = 3.5			lg g = 4.0			
		22 500	25 000	30 000	22 500	25 000	30 000	22 500	25 000	30 000	35 000
HeI 4387.	-0.3	227.	160.	60.	383.	315.	161.	568.	495.	317.	113.
	0.0	308.	219.	95.	534.	451.	227.	806.	712.	473.	180.
	0.3	412.	294.	150.	741.	626.	317.	1136.	1023.	679.	268.
	0.6	559.	396.	210.	1034.	870.	444.	1599.	1430.	966.	388.
HeI 4471.	-0.3	404.	289.	123.	616.	461.	279.	874.	683.	471.	230.
	0.0	509.	355.	175.	821.	610.	355.	1199.	918.	634.	298.
	0.3	661.	440.	240.	1112.	812.	448.	1664.	1273.	846.	388.
	0.6	865.	557.	390.	1523.	1096.	583.	2306.	1735.	1177.	509.
HeII 4199.	-0.3	8.	18.	117.	1.	4.	52.	0.	1.	32.	91.
	0.0	9.	22.	128.	2.	5.	63.	0.5	2.	42.	115.
	0.3	11.	28.	140.	4.	7.	79.	1.	4.	54.	146.
	0.6	13.	34.	155.	6.	13.	98.	3.	6.	73.	187.
HeII 4541.	-0.3	3.	14.	105.	0.8	3.	48.	0.	0.8	29.	93.
	0.0	5.	20.	115.	1.2	5.	62.	0.2	1.4	37.	115.
	0.3	6.	26.	128.	2.	7.	79.	0.5	2.2	58.	141.
	0.6	7.	34.	143.	3.	12.	96.	1.5	5.5	74.	175.
CII 4267.	-1.0	132.	82.	9.	157.	125.	40.	156.	141.	80.	6.
	0.0	233.	182.	22.	263.	227.	140.	277.	258.	187.	47.
	1.0	343.	270.	75.	432.	363.	226.	516.	449.	302.	147.
CIII 4647.	-1.0	21.	43.	102.	11.	28.	73.	6.	16.	59.	72.
	0.0	47.	85.	159.	34.	65.	127.	23.	47.	119.	129.
	1.0	86.	135.	242.	71.	114.	184.	60.	92.	170.	189.
NII 4631.	-1.0	26.	11.	1.	27.	23.	4.	21.	25.	9.	1.
	0.0	81.	58.	2.	80.	79.	31.	69.	80.	51.	8.
	1.0	139.	117.	23.	137.	139.	88.	125.	140.	114.	47.
NIII 4097.	-1.0	48.	70.	107.	33.	54.	65.	47.	70.	79.	53.
	0.0	55.	79.	120.	40.	64.	91.	45.	69.	93.	95.
	1.0	73.	98.	153.	60.	84.	126.	60.	78.	121.	137.
OII 4641.	-1.0	98.	110.	122.	85.	96.	102.	69.	96.	114.	112.
	0.0	150.	165.	156.	136.	147.	157.	119.	150.	171.	157.
	1.0	223.	231.	228.	205.	216.	222.	179.	221.	236.	213.
OII 4669.	-1.0	180.	255.	395.	130.	200.	343.	85.	174.	388.	320.
	0.0	268.	354.	480.	213.	290.	430.	159.	265.	485.	400.
	1.0	371.	458.	555.	314.	420.	533.	257.	371.	587.	520.
OII 4661.	-1.0	12.	28.	21.	5.	20.	13.	14.	28.	24.	4.
	0.0	52.	80.	85.	30.	55.	58.	45.	74.	78.	29.
	1.0	91.	131.	140.	75.	108.	112.	88.	124.	133.	78.
OII 4676.	-1.0	25.	30.	27.	10.	16.	14.	23.	30.	26.	4.
	0.0	60.	83.	91.	39.	60.	62.	54.	77.	82.	31.
	1.0	95.	130.	146.	82.	108.	116.	95.	125.	137.	70.
OIII 3961.	-1.0	1.5	6.	39.	0.5	3.	15.	0.	0.7	9.	23.
	0.0	6.	18.	71.	2.	7.	40.	1.	4.	29.	59.
	1.0	15.	39.	110.	7.	21.	76.	4.	14.	61.	100.
SiIII 4552.	-1.0	82.	81.	61.	1.	10.	49.	2.	16.	79.	10.
	0.0	146.	138.	98.	150.	140.	100.	305.	284.	168.	61.
	1.0	260.	234.	144.	346.	318.	211.	900.	802.	445.	176.
SiIII 4567.	-1.0	71.	64.	38.	60.	53.	30.	96.	88.	57.	4.
	0.0	133.	118.	85.	133.	118.	85.	247.	223.	137.	43.
	1.0	263.	235.	151.	295.	266.	175.	710.	629.	351.	145.
SiIII 4574.	-1.0	52.	40.	18.	46.	35.	13.	66.	54.	30.	1.
	0.0	112.	91.	53.	118.	98.	58.	158.	142.	93.	17.
	1.0	200.	166.	107.	235.	195.	121.	440.	381.	219.	90.

Т А Б Л И Ц А 3 (продолжение)

Турбулентная скорость 10 км/с									
lg g = 2.0			lg g = 3.5			lg g = 4.0			
22 500	25 000	30 000	22 500	25 000	30 000	22 500	25 000	30 000	35 000
256.	188.	110.	407.	333.	165.	584.	507.	324.	115.
343.	280.	138.	563.	473.	234.	826.	727.	484.	186.
452.	385.	200.	772.	651.	321.	1157.	1041.	693.	277.
601.	520.	270.	1066.	897.	436.	1622.	1450.	985.	400.
461.	365.	217.	666.	513.	329.	915.	723.	504.	254.
570.	445.	265.	872.	658.	412.	1240.	959.	669.	324.
722.	575.	355.	1162.	861.	522.	1703.	1314.	881.	416.
926.	727.	445.	1571.	1141.	680.	2345.	1775.	1212.	538.
8.	21.	123.	1.	6.	60.	0.	1.	36.	102.
10.	25.	132.	3.	8.	72.	0.	2.	47.	128.
12.	31.	139.	5.	12.	89.	0.	3.	60.	161.
14.	39.	155.	7.	17.	111.	1.	6.	80.	206.
5.	16.	120.	0.	2.	57.	0.	1.	31.	107.
10.	22.	130.	1.	6.	74.	0.	1.	44.	135.
14.	31.	151.	3.	10.	92.	0.	2.	59.	165.
21.	42.	174.	6.	16.	115.	1.	5.	76.	201.
168.	97.	23.	205.	156.	41.	208.	181.	92.	5.
327.	245.	97.	368.	315.	176.	377.	348.	246.	50.
480.	381.	202.	563.	484.	304.	619.	562.	396.	183.
35.	62.	160.	22.	37.	106.	12.	20.	84.	99.
82.	133.	245.	56.	99.	201.	37.	68.	176.	199.
157.	222.	333.	120.	187.	302.	94.	148.	279.	301.
30.	12.	1.	33.	26.	2.	26.	29.	9.	1.
129.	81.	23.	129.	121.	36.	108.	125.	67.	7.
252.	200.	90.	248.	246.	136.	224.	249.	185.	60.
112.	106.	74.	126.	120.	82.	82.	106.	115.	44.
112.	106.	75.	126.	121.	82.	83.	106.	116.	44.
114.	108.	76.	128.	122.	83.	87.	109.	118.	45.
170.	216.	226.	145.	186.	200.	114.	163.	181.	96.
276.	318.	338.	250.	298.	249.	216.	273.	293.	189.
393.	448.	469.	364.	414.	444.	328.	389.	404.	294.
241.	331.	456.	167.	292.	467.	106.	115.	448.	387.
417.	565.	695.	328.	481.	653.	243.	392.	615.	466.
617.	750.	879.	530.	688.	858.	440.	601.	804.	612.
44.	33.	6.	46.	44.	14.	26.	36.	28.	2.
147.	131.	68.	151.	141.	84.	96.	122.	123.	35.
267.	244.	165.	265.	253.	192.	186.	231.	238.	121.
52.	36.	7.	55.	48.	15.	28.	39.	31.	4.
157.	137.	63.	156.	147.	90.	96.	127.	128.	37.
253.	220.	140.	253.	243.	185.	232.	245.	211.	93.
2.	7.	52.	1.	2.	19.	0.	1.	10.	30.
7.	26.	106.	3.	12.	60.	1.	4.	41.	88.
31.	62.	152.	14.	38.	123.	5.	21.	97.	163.
178.	136.	44.	220.	170.	61.	188.	168.	113.	8.
300.	253.	116.	358.	320.	176.	394.	363.	249.	77.
550.	416.	260.	850.	681.	290.	1010.	883.	535.	289.
123.	107.	20.	167.	139.	37.	196.	172.	82.	3.
262.	225.	113.	303.	279.	146.	324.	302.	215.	49.
496.	368.	263.	680.	564.	281.	838.	711.	441.	231.
88.	55.	8.	114.	82.	13.	98.	77.	37.	1.
205.	170.	85.	236.	206.	90.	117.	209.	148.	16.
330.	293.	170.	438.	395.	211.	510.	463.	308.	129.

значения атомных параметров для этих линий, в результате чего получили значения W_λ примерно в 2 раза больше, чем в работе [27]. W_λ линий SiII по нашим расчетам неплохо согласуются с наблюдениями [8, 30]. Линии SiI 3920 и 4267 в ЛТР- и не-ЛТР-приближении были посчитаны в работе [29]. Проведенное там сравнение с наблюдениями показало, что согласно этим расчетам в В-звездах главной последовательности должен быть дефицит углерода в среднем на 0.5—1.0 dex. Некоторый дефицит углерода можно было бы объяснить тем, что В-звезды главной последовательности в среднем уже прошли большую часть стадии горения водорода через CNO-цикл и в результате частичного перемешивания вещества содержание углерода на поверхности понизилось, однако полученный в [29] дефицит углерода слишком велик и не согласуется с предсказаниями теории. По нашим расчетам W_λ линий SiI 3920 и 4267 получились значительно меньше, чем в [29], и хорошо согласуются с наблюдениями при нормальном содержании углерода.

Линии NiI 3995 и 4631 при ЛТР- и не-ЛТР-приближении посчитаны в работе [24]. Эффект отклонения от ЛТР здесь оказался существенным: от 15 до 40 % в величине W_λ в области $32\,500\text{ K} \geq T_e \geq 20\,000\text{ K}$, причем при ЛТР-приближении линии систематически слабее. По нашим расчетам W_λ линий азота получились еще меньше (при близких значениях атомных параметров), однако различия всех теоретических расчетов лежат в пределах наблюдаемого разброса W_λ ; таким образом, можно полагать, что наши расчеты, как и расчеты [24], в целом согласуются с данными наблюдений.

Чтобы проверить влияние эффектов отклонения от ЛТР на используемые нами критерии спектральной классификации, мы вычислили значения нескольких критериев по результатам ЛТР- и не-ЛТР-расчетов W_λ из работ [21, 25, 27, 29]. Полученные значения критериев и среднеквадратичные ошибки σ для трех значений T_e и $\lg g = 4.0$ приведены в первых трех столбцах табл. 4. Видно, что ошибки не превышают типичную ошибку измерений W_λ и в среднем вдвое меньше, когда величины критериев близки к 1, т. е. когда W_λ линий, входящих в критерии, примерно одинаковы. В последнем столбце табл. 4 для $T_e = 15\,000\text{ K}$ приведено также сравнение нескольких критериев по нашим ЛТР-расчетам и по не-ЛТР-расчетам из работ [21, 25, 27]. В этом случае ошибка несколько больше, чем в первом столбце, но также не превышает ошибку эмпирических критериев.

ТАБЛИЦА 4
Сравнение значений критериев по ЛТР- и не-ЛТР-расчетам

Номер критерия	15000 K			20000 K			25000 K			15000 K		
	ЛТР	не-ЛТР	$\sigma, \%$	ЛТР	не-ЛТР	$\sigma, \%$	ЛТР	не-ЛТР	$\sigma, \%$	ЛТР	не-ЛТР	$\sigma, \%$
48	0.99	1.07	4	0.31	0.38	10	0.19	0.25	14	0.83	1.07	13
53				0.30	0.31	2	0.22	0.24	4			
60				0.11	0.12	4	0.09	0.10	5			
Д1	1.26	1.16	3	3.78	3.10	10	5.80	4.51	14	1.21	1.16	3
Д2				7.10	6.99	1	9.14	8.72	2			
Д6	0.83	0.85	1	0.94	0.97	2	0.90	1.05	8	1.02	0.86	9

Расчитанные W_λ линий мы сравнили с измеренными в спектрах нормальных В-звезд классов светимости III—V. Использовались данные наблюдений с дисперсией лучше $25\text{ \AA}/\text{мм}$ из работ [8, 9, 22, 25, 28, 29, 31]. Примеры сравнения приведены на рис. 3. Видно, что наши расчеты в целом хорошо согласуются с наблюдениями — большая часть наблюдаемых точек заключена между теоретическими зависимостями W_λ от T_e , полученными для разных значений $\lg g$ и v_t при нормальном содержании элементов. Однако W_λ линий HeI 4121, 4388, 4471, наблюдаемых в спектрах звезд классов В7—В9, оказываются систематически больше посчитанных нами для $T_e = 12\,000, 10\,000\text{ K}$. С первого взгляда может показаться, что здесь проявляется эффект, связанный с систематическим

завышением W_λ слабых линий при использовании спектрограмм с низким спектральным разрешением. Однако в работах [8, 9, 22, 25, 28, 29] дисперсия спектрограмм достаточно высокая, и некоторое завышение W_λ слабых линий может быть ощутимо только при $W_\lambda \approx 20 \div 30 \text{ м\AA}$, когда интенсивность линии сравнима с шумом фотоэмульсии. Однако по нашим расчетам линия HeI 4121 в этой области спектральных классов не слабее $75-20 \text{ м\AA}$, W_λ линии HeI 4388 изменяется от ~ 140 до $\sim 25 \text{ м\AA}$, а линии HeI 4471 — от 250 до 70 м\AA . Воз-

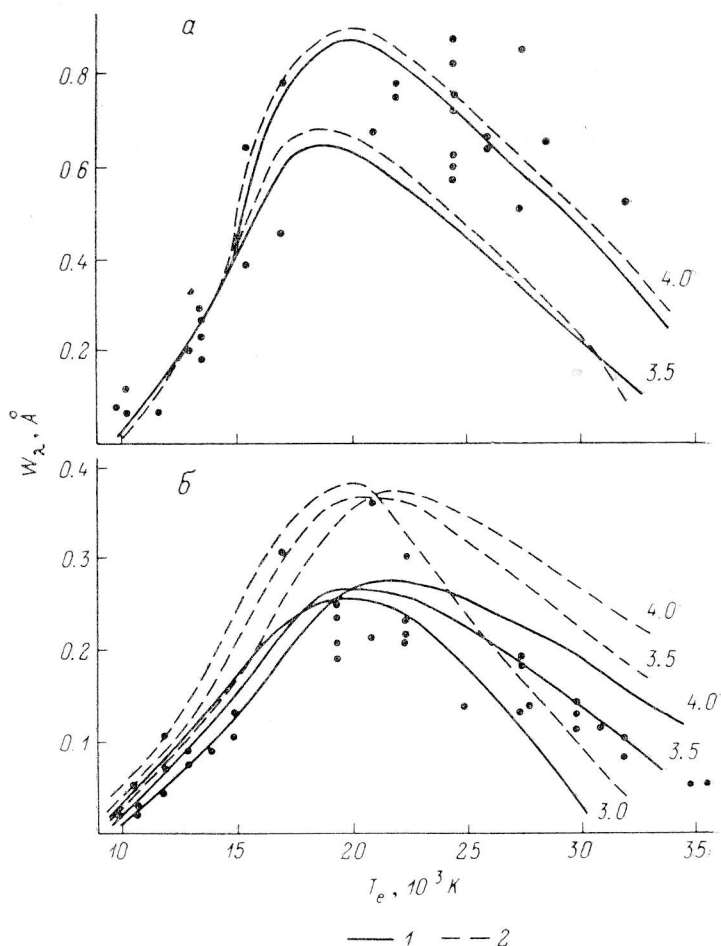


Рис. 3. Сравнение наблюдаемых (точки) и теоретических W_λ -линий.
 а — HeI 4387; б — SiI 4267; 1 — $v_t=2.5 \text{ км/с}$; 2 — $v_t=10 \text{ км/с}$. Около каждой группы кривых указан $\lg g$. Обилие He и Si принято солнечное.

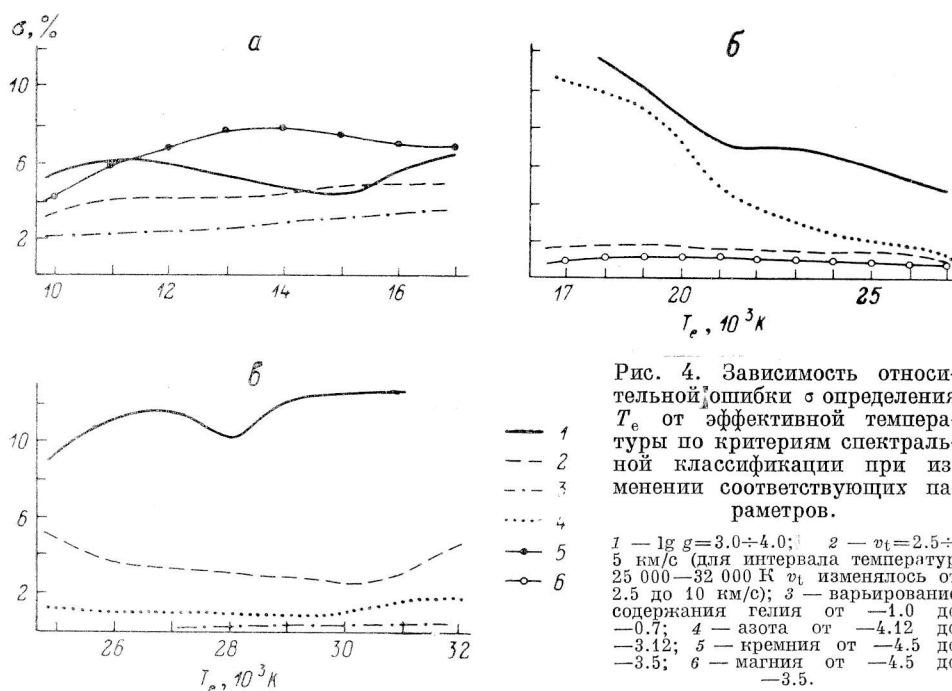
можно, что некоторая часть расхождений связана с неточным определением T_e для конкретных звезд: поскольку линии HeI в этой области практически не чувствительны к изменениям $\lg g$ и v_t , то ошибки в T_e для них не маскируются варьированием этих параметров, как для других линий. Основной же причиной систематических расхождений в расчетных и наблюдаемых W_λ для некоторых линий HeI при $T_e \leq 12\,000 \text{ K}$ приходится считать несовершенство теории.

Из сравнения результатов расчетов в разных приближениях с наблюдениями следует, что в случае значительного отклонения величины T_e , полученной для звезды по какому-либо одному критерию, от остальных, необходим дополнительный анализ возможных причин этого отклонения.

3. Зависимость теоретических критериев от v_t , химического состава, $\lg g$

Так как при определении эффективной температуры звезды обычно неизвестны другие параметры, влияющие на ее спектральные характеристики ($\lg g$, v_t , химический состав), то необходимо выяснить, какую ошибку в T_e могут внести изменения этих параметров. Эта ошибка была посчитана для каждого критерия для разных значений T_e . Ниже мы проводим анализ зависимости критериев от $\lg g$, v_t и содержания элементов для трех интервалов T_e .

На рис. 4, а—в для трех интервалов температур приведены примеры ошибок в определении T_e , усредненных по всем критериям с приданным каждому критерию весом (систему весов см. в табл. 3 в [1]), при изменении соответствующих параметров ($\lg g$, v_t , обилие).



а) $10\ 000\ \text{K} \leq T_e \leq 17\ 000\ \text{K}$ (рис. 4, а). Все критерии в этой спектральной области можно разделить на две группы по степени их чувствительности к изменениям $\lg g$. Для одной группы зависимостью критериев от $\lg g$ при изменении этого параметра от 3.0 до 4.0 можно пренебречь, так как это приводит к ошибкам в T_e не более 4 % по одному критерию, при усреднении по всем критериям эта ошибка становится меньше 2 %. К этой группе относятся критерии № 60, Д1, Д2, Д3.

Другая группа критериев более чувствительна к изменению $\lg g$, их использование приводит к ошибкам в T_e до 6 %—10 % по одному критерию. Сюда относятся критерии № 48, 53, 56, 57, Д4, Д6.

Данные наблюдений показывают, что в этом (и следующем) интервале температур турбулентная скорость v_t заключена в более узких интервалах, чем принято в наших расчетах. Поэтому мы решили ограничиться интервалом 2.5—5 км/с. Для этого наши расчеты W_λ для $v_t = 2.5$ и 10 км/с были интерполированы к $v_t = 5$ км/с. Ошибка в определении T_e при изменении турбулентной скорости в этих пределах не превосходит 8 % для отдельного критерия, а при усреднении по всем критериям эта ошибка снижается до 4—5 %. Из всей группы критериев критерий № 57 практически не зависит от v_t , ошибка лежит в пределах 2 %.

Величина критериев существенно меняется с изменением обилия элементов, линии которых входят в критерий. Наиболее сильно от обилия зависят критерии, содержащие линии кремния и углерода. Так, например, увеличение содержания этих элементов в 10 раз по сравнению с солнечным приводит к ошибкам в T_e для соответствующих критериев до 13—14 %. Наиболее слабо от обилия зависят критерии, содержащие линии железа, здесь ошибка не превосходит 3.5 %.

Заслуживает внимания тот факт, что некоторые критерии зависят практически только от одного из двух параметров, $\lg g$ или v_t . Например, критерий № 57 почти не зависит от v_t , но зависит от $\lg g$, а критерий № 60, Д1, Д2, Д3 — наоборот.

б) $17\,000\text{ К} \leq T_e \leq 25\,000\text{ К}$ (рис. 4, б). Для теоретических критериев в этой области температур характерна однотипная зависимость от $\lg g$. В среднем ошибки определения T_e при изменении $\lg g$ от 3.0 до 4.0 лежат в пределах 10—15 %. Наиболее слабая зависимость от $\lg g$ наблюдается для критериев № 33, 33а, 38 — здесь ошибка не превышает 4—5 %. Критерий № 35 выделяется среди других тем, что для низких температур в этой области T_e он дает ошибку в T_e при изменении $\lg g$ от 3.0 до 4.0, превышающую 20 %.

Зависимость критериев от v_t здесь значительно слабее, чем в случае «холодной» области. Средняя ошибка в T_e при изменении v_t от 2.5 до 5 км/с для большинства критериев не превышает 2 %. Лишь для единственного критерия № 41в в области 17 000—25 000 К ошибка в T_e достигает 7 %.

При изменении содержания соответствующих элементов наиболее сильно изменяются критерии № 35, 41а, 41б, 41в. Здесь ошибки в T_e лежат в пределах 10 %—20 %. Слабее чувствуют изменение содержания критерии № 33, 33а; ошибка в T_e не превышает 6 %. При этих оценках содержание входящих в критерии элементов увеличивалось в 10 раз по сравнению с солнечным.

в) $25\,000\text{ К} \leq T_e \leq 32\,000\text{ К}$ (рис. 4, в). Все критерии в этой области сильно и практически одинаково зависят от $\lg g$. Ошибки в определении T_e при изменении $\lg g$ от 3.0 до 4.0 лежат в пределах 9—15 %, что в температурной шкале соответствует ошибкам в 2300—5000 К.

Неопределенность в турбулентной скорости в пределах от 2.5 до 10 км/с вносит в определение эффективной температуры по разным критериям ошибку в среднем до 9 %. Однако следует отметить, что существует группа критериев (№ 3, 5, 7, 8), которые почти не зависят от изменения v_t в этих пределах. Для них ошибка в определении T_e не превосходит 1.5 %, а для критерия № 8 эта ошибка практически равна нулю. С другой стороны, для критериев № 1, 2, 6, 32 эта ошибка заключена в пределах 5—9 %.

Изменение химического состава элементов, входящих в критерии в этом интервале температур, довольно слабо влияет на точность определения T_e . Так, для критериев, содержащих линии гелия, изменение содержания гелия в 2 раза по сравнению, например, с солнечным почти не меняет величины критерия, ошибка в T_e не превосходит 0.5—1.5 %. Однако для критерия № 6 изменение содержания кремния, линии которого (SiIV) входят в критерий, в 10 раз по сравнению с солнечным приводит к ошибкам в T_e свыше 20 % (~6000 К). Это единственный критерий, который так сильно чувствует изменение содержания соответствующего элемента. Все остальные критерии приводят к ошибкам в T_e не более 7—9 % при изменении содержания соответствующих элементов в 10 раз по сравнению с солнечным.

4. Заключение

1. Выполненные теоретические расчеты W_λ спектральных линий, используемых для количественного определения спектральных классов и эффективных температур звезд O8—A0, в среднем достаточно хорошо согласуются с результатами наблюдений.

2. Обнаруживающиеся систематические различия в W_λ по разным наблюдениям не очень существенно изменяют величины эмпирически подобранных критериев спектральной классификации, что позволяет использовать для формирования критериев эквивалентные ширины линий, полученные как по высоко-

дисперсионным, так и по низкодисперсным спектрам, после соответствующего учета степени блендирования, обусловленной разной дисперсией спектрограмм и очень сильно различающимися скоростями вращения звезд.

3. Различия в методике расчетов моделей атмосфер и последующих расчетов W_λ спектральных линий, например учет или неучет отклонений от ЛТР, незначительно влияют на величины теоретических критериев, и ошибки, связанные с различными приближениями при таких расчетах, оказываются значительно меньше ошибок эмпирических критериев.

4. Анализ зависимостей теоретических критериев от параметров моделей ($\lg g$, v_t , химический состав) свидетельствует о том, что достаточно полный набор критериев при его аккуратном и комплексном использовании позволит не только определить T_e с необходимой точностью, но и выявлять особенности атмосфер исследуемых звезд, например аномалии химического состава.

5. Применение обоснованного в [1] и разработанного здесь метода установления надежной шкалы эффективных температур звезд O8—A0 главной последовательности (классов светимости III—V) возможно, как легко видеть из вышеизложенного, только путем последовательных приближений. Следующим шагом должен, естественно, явиться анализ реальных точностей определения исходных параметров атмосфер звезд ($\lg g$, v_t , химический состав элементов, линии которых использованы при формировании температурных критериев), что позволит в последующем выполнить обоснованные оценки ошибок как температурной шкалы звезд O8—A0 в целом, так и температур конкретных звезд.

Литература

1. Исследование критериев спектральной классификации и температурной шкалы спектральных классов. 1. Обзор проблемы и постановка задачи / И. М. Копылов, В. В. Леушин, В. В. Соколов и др. // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1989. 28. С. 59—71.
2. Копылов И. М. Двумерная количественная спектральная классификация 238 звезд O5—B7 и построение диаграммы спектр—абсолютная величина // Изв. КрАО. 1958. 20. С. 156—207.
3. Копылов И. М. Двумерная количественная спектральная классификация звезд спектральных классов B8—F2 // Изв. КрАО. 1960. 23. С. 148—173.
4. Клочкова В. Г., Копылов И. М., Кумайгородская Р. Н. Ври- и Ар-звезды в движущемся скоплении Скорпиона—Центавра // Письма в Астрон. журн. 1981. 7, № 6. С. 366—371.
5. Conti P. S., Alschuler W. R. Spectroscopic studies of O-type stars. 1: Classification and absolute magnitudes // Astrophys. J. 1971. 170, nr 2. P. 325—344.
6. Conti P. S. Spectroscopic studies of O-type stars. II: Comparison with non-LTE models // Astrophys. J. 1973. 179, nr 1. P. 161—179.
7. Didelon D. Largeurs equivalentes de raies spectrales dans les etoiles B // Astron. Astrophys. 1982. 50, nr 2. P. 199—207.
8. Боярчук А. А. Сравнение химического состава В и Ве звезд // Изв. КрАО. 1957. 17. С. 89—116.
9. Kane L., McKeith C. D., Dufton P. L. Carbon, nitrogen, and oxygen abundances in loose association and field B-type stars // Astron. Astrophys. 1980. 84, nr 1/2. P. 115—122.
10. Aller L. H., Jugaku J. The atmospheres of the B stars. VII: Quantitative chemical analysis of gamma Pegasi // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1959. 4. P. 109—156.
11. Line intensities in the spectra of representative stars of spectral types B to G / Wright K. O., Lee E. K., Jacobson T. V., Greenstein J. L. // Publ. Dominion. Astrophys. Observatory. 1964. 12, nr 7. P. 173—291.
12. Kurucz R. L. Model atmospheres for G, F, A, B, and O stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1979. 40, nr 1. P. 1—340.
13. Wright S. L., Arguros J. O. ATLAS 5 at the University of London (SAM1). 1: Programming and implementation // Comm. Univ. London. Obs. 1975. 75. P. 1—61.
14. Леушин В. В., Топильская Г. П. О точности определения химического состава звезд методом моделей атмосфер // Астрофизика. 1986. 25, № 1. С. 103—118.
15. Касабов Г. А., Елисеев В. В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. М.: Атомиздат, 1969.
16. Wiese W. L., Smith M. W., Miles B. M. Atomic transition probabilities, sodium through calcium // MSRDS—NBS, Washington. 1969. 22. Vol. 2.
17. Грим Г. Спектроскопия плазмы. М.: Мир, 1969.
18. Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М.: Мир, 1978.
19. Dimitrijevic M. S., Sahal-Brechot S. Stark broadening of neutral helium lines of astrophysical interest. Regularities within spectral series // Astron. Astrophys. 1984. 136, nr 2. P. 289—298.

20. Sahal-Brechot S., Segre E. R. A. Semi-classical calculations of electron and ion collisional broadening of the strongest U. V. ionic lines of astrophysical interest // *Astron. Astrophys.* 1971. 13, nr 1. P. 161—168.
21. Auer L. H., Mihalas D. Analyses of light-ion spectra in stellar atmospheres. IV: HeI in the B stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1973. 25. P. 433—462.
22. O'Mara B. J., Simpson R. W. Curves of growth and line profiles for neutral helium lines in early type stars // *Mem. Roy. Astron. Soc.* 1974. 75. P. 51—84.
23. Dufton P. L., Hibbert A. Non-LTE calculations of NII line strengths in B-Type stars // *Astron. Astrophys.* 1981. 95, nr 1. P. 24—31.
24. Mihalas D. Analyses of light-ion spectra in stellar atmospheres. I: Magnesium II in B and O stars // *Astrophys. J.* 1972. 177, nr 1. P. 115—128.
25. Mihalas D. Analyses of light-ion spectra in stellar atmospheres. II: The calcium II K-line in B stars // *Astrophys. J.* 1973. 179, nr 1. P. 209—220.
26. Kamp L. W. Statistical equilibrium calculations for silicon in early-type model stellar atmospheres / NASA TR R-455. Washington, 1976.
27. Norris J. Neutral-helium line strengths. IV: Fourteen «normal» stars of population I // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1971. 23. P. 193—212.
28. Dufton P. L., Kane L., McKeit C. D. The nitrogen to hydrogen abundance in main sequence B-type stars // *Mon. Not. R. astr. Soc.* 1981. 194, nr 1. P. 85—93.
29. Lennon D. J. Non-LTE calculations for CII in B-type stars // *Mon. Not. R. astr. Soc.* 1983. 205. P. 829—838.
30. Aller L. H., Jugaku J. Spectrophotometry of B stars // *Publ. Obs. Univ. Michigan.* 1969. 9, nr 9. P. 203—273.
31. Леушин В. В. Канд. дис. 1970.

Поступила в редакцию
3 ноября 1987 г.